

საქართველოს გეგნიკური უნივერსიტეტი

რ.ჩიხლაძე, კ. ნაცვლიშვილი

ელექტროტექნიკური მასალები



დამტკიცებულია სტუ-ს
სარედაქციო-საგამომცემლო
საბჭოს მიერ

თბილისი
2007

უაკ 621.315.5/6

სახელმძღვანელო შედგენილია სტუ-ს “ელექტროტექნიკური მასალების კურსის” პროგრამის მიხედვით, განკუთვნილია ელექტროტექნიკური სპეციალობის სტუდენტებისათვის და მაგისტრანტებისთვის, აგრეთვე სასარგებლო იქნება მონათესავე დარგების სპეციალისტებისათვის.

რეცენზენტები:

პროფესორი შ. ნაჭყებია

ასოცირებული პროფესორი კ. წერეთელი

წინასიტყვაობა

XVIII საუკუნის მეორე ნახევრიდან, როდესაც ფიზიკურ მოვლენებზე დაკვირვებასთან ერთად მათი შესწავლა დაიწყო, მუხტის წყაროს ხახუნის შედეგად დამუხტული ქარვის ან შალის ნაჭერი წარმოადგენდა, რადგან ქარვა (ბერძნულად *elektoron*) ხახუნის შედეგად ადვილად იმუხტებოდა, იზიდავდა სხვა სხულებს და უმეტეს ცდებში მას იყენებდნენ, ამიტომ მიზიდულობის ძალას, რომელსაც სხეული ხახუნის შედეგად იძენდა პილბეტმა (XVIII საუკუნეში) ელექტრული ძალები უწოდა, ხოლო მასთან დაკავშირებულ მოვლენებს კი ელექტრული მოვლენები. მოგვიანებით 1897 წელს ტომსონის მიერ აღმოჩენილ მუხტის მქონე პირველ ელემენტარულ ნაწილაკს ელექტრონი უწოდეს.

1723 წელს ფ. შარლმა ორი სახის მუხტის არსებობა დაადასტურა, ხოლო ს. გრეიმ, რომელიც 1729 წელს დამუხტული სხულიდან დაუმუხტავ სხეულზე მესამე სხეულის გამოყენებით მუხტის გადასვლას აკვირდებოდა აღმოაჩინა, რომ ზოგი სხეული მუხტს კარგად ატარებდა ზოგიერთი კი ცუდად, ანუ სხეულები დაყო ელექტრული მუხტის კარგ გამტარებად და არაგამტარ სხეულებად. ამ დროისათვის მუხტის გამტარებად ბრინჯაოს, რკინის, სპილენძის, ოქროს ან ვერცხლის ნაჭედი ღეროები გამოიყენებოდა, ხოლო ერთი სხეულიდან მეორეზე მუხტის გადასვლის შემზღუდველად მათ შორის მოთავსებული იყო ტყავის, მშრალი ხის, მარმარილოს, მინის ნაჭერი ან ცხენის ძუა. რადგან ის ქარვიდან მუხტების გადასვლას უშლიდა ხელს. მას ელექტრო იზოლაცია (განმცალკეებელი) უწოდეს, მოგვიანებით (1837წ) ფარადეიმ მათ დიელექტრიკი დაარქვა და გამოთქვა აზრი მათი პოლარიზაციის შესახებ.

გალვანური ელემენტის (1799წ) და დენის სხვა სახის წყაროების შექმნამ ელექტრული მოვლენების შესწავლას მეტი თანმიმდევრული და შემეცნებითი ხასიათი მისცა.

XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან ქიმიური ტექნოლოგიების განვითარებამ ელექტროტექნიკური მასალების, როგორც თვისებების გაუმჯობესება ასევე მათი რაოდენობის ზრდა გამოიწვია. კოსმოსის ათვისების დაწყებამ კი ფუნქციონალურად ახალი ელექტრული ხელსაწყოების შექმნა მოითხოვა, რაც თვისობრივად ახალი მასალების გარეშე შეუძლებელი იყო.

ელექტროტექნიკური მრეწველობა ტექნიკის ერთ-ერთ სწრაფად განვითარებად და მრავალფეროვან დარგს წარმოადგენს, რომელის ბაზაზეც აღმოცენდა თანამედროვე მაღალი და ზემოდალი ძაბვის ელექტროენერგეტიკული მოწყობილობები, რადიოელექტრონიკა, კავშირგაბმულობა, კომპიუტერული და სატელევიზიო ტექნიკა. ის გადაამწყვეტ როლს ასრულებს ადამიანის ყოველმხრივ საქმიანობაში. უკანასკნელი 100 წლის განმავლობაში ელექტროტექნიკურმა მრეწველობამ არნახული წინსვლა განიცადა. ეს პროგრესი ძირითადად ახალი მასალების შექმნით და მათი თვისებების შესწავლით იყო განპირობებული. ზოგჯერ ტექნიკური მოთხოვნებიდან გამომდინარე სპეციალურად იქმნებოდა გარკვეული თვისებების მქონე მასალებიც.

გასული საუკუნის 60-იანი წლებიდან თვისობრივად ახლი მასალების (ნახევარად გამტარების) მიღებამ და მათი თვისებების ყოველმხრივ შესწავლამ დასაბამი მისცა თანამედროვე მიკროელექტრონიკის განვითარებას, რომელმაც ადამიანის ცხოვრების ყველა სფეროში შეაღწია და ტექნიკური პროგრესის ერთერთ მამოძრავებელ ფაქტორს წარმოადგენს.

აქტიური დიელექტრიკების და მაღალ ომიანი ნახევარად გამტარების ფართო გამოყენებამ მცირე დენებზე ფუნქციონირებადი თვისობრივად ახალი ხელსაწყოების და ნანოელექტრონიკის განვითარებას ჩაუყარა საფუძველი.

ელექტროტექნიკურ მასალათმცოდნეობაში დაგროვილი ინფორმაციის სახელმძღვანელო სახით ჩამოყალიბება გასული საუკუნის 20-იან წლებში დაიწყო.

რომლის ერთერთი პირველი ნიმუშია ა. ნიკურაძის მიერ ბერლინში 1934 წელს გამოცემული "თხევადი დი-ელექტრიკები", რომელიც მკირე ხნის განმავლობაში იმ დროისათვის განვითარებულ თითქმის ყველა ქვეყანაში გამოიცა.

აღნიშნული სახელმძღვანელოს რუსულ ენაზე გამოცემასთან ერთად (1936წ) რუსეთში პირველი სრულყოფილი სახელმძღვანელო პროფესორ ი. კორიციკის ავტორობით დაიბეჭდა.

გასული საუკუნის 50-იანი წლების ბოლოს ავტორების ნ. ბოგოროდიცკის, ვ. პასინკოვის და ბ. ტარევის მიერ შეიქმნა უნიკალური სახელმძღვანელო ელექტროტექნიკური მასალების კურსში, რომელიც ნახევარი საუკუნის განმავლობაში შეიდგერ გამოიცა რუსეთში და მრავალ ენაზე ითარგმნა, მისმა საერთო ტირაჟმა ორ მილიონს გადააჭარბა.

წინამდებარე ნაშრომი წარმოადგენს ქართულ ენაზე ელექტროტექნიკური მასალების კურსის სრულყოფილი სახელმძღვანელოს შექმნის პირველ ცდას და რა თქმა უნდა დაზღვეული არ არის გარკვეული უზუსტობებისგან, რასაც ავტორები შენიშვნის სახით მადლიერების გრძნობით მიიღებენ.

სახელმძღვანელოს I, II, III, IV, VI, VII და IX თავები დაწერილია ასოცირებულ პროფესორ რამინ ჩიხლაძის მიერ, ხოლო V თავი და § 7.3 დაწერა ასისტენტ პროფესორმა კუკური ნაცვლიშვილმა.

ავტორები მადლობას უხდიან რეცენზენტებს საქმიანი შენიშვნებისათვის, რასაც ითვალისწინებენ სახელმძღვანელოში.

სახელმძღვანელოს გაფორმებაში გაწეული დახმარებისათვის მადლობას გამოხატავენ შპს "ტრანზიბერ-სერვისის" დირექტორის ივ. საჩაღელის მიმართ.

უნივერსალური ფიზიკური მუდმივები

1. პლანკის მუდმივა

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ ჯ.წმ} =$$

$$= 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ ელექტრონვოლტი.წამი (ეე.წმ);}$$

2. ბოლცმანის მუდმივა

$$K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/კ} = 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ ეე.კ};$$

3. ელექტრონის მასა

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ კგ} = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ გ};$$

4. ელექტრონის მუხტი (ელემენტარული მუხტი)

$$q \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კლ};$$

5. ვაკუუმის ელექტრული მუდმივა

$$\epsilon_0 \approx 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ ფ/მ} = 8,86 \cdot 10^{-14} \text{ ფ/სმ};$$

6. აბსოლიტური მაგნიტური განვლადობა

$$\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ ჰენრი/მ} = 1,257 \cdot 10^{-8} \text{ ჰენრი/სმ};$$

7. სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში

$$C \approx 3 \cdot 10^8 \text{ მ/წმ} = 3 \cdot 10^{10} \text{ სმ/წმ};$$

8. ავოგადროს რიცხვი (მოლეკულების რიცხვი 1 მოლ აირში)

$$N = 6,0225 \cdot 10^{23};$$

9. 1 მოლი აირის მოცულობა (სტმ და 0°C)

$$V_m = 22412 \text{ მ}^3$$

10. 1სმ³ აირში მოლეკულების რიცხვი (სტმ და 0°C)

$$n = 2,7 \cdot 10^{19}$$

11. ელექტრონის დიამეტრი

$$D_e = 3,74 \cdot 10^{-24} \text{ სმ} = 3,74 \cdot 10^{-26} \text{ მ}$$

12. წყალბადის მოლეკულის დიამეტრი

$$D_{H_2} = 2,34 \cdot 10^{-8} \text{ სმ} = 2,34 \cdot 10^{-8} \text{ მ} = 2,34 \text{ \AA}^0$$

13. აზოტის მოლეკულის დიამეტრი

$$D_{N_2} = 3,146 \cdot 10^{-8} \text{ სმ} = 3,146 \cdot 10^{-10} \text{ მ} = 3,146 \text{ \AA}^0$$

14. ანგსტრეში (\AA^0)

$$1 \text{ \AA}^0 = 10^{-10} \text{ მ} = 10^{-8} \text{ სმ};$$

შესავალი

ელექტროტექნიკური ეწოდება იმ ნივთიერებებს, რომლებიც ელექტრული ან მაგნიტური ველების ზემოქმედებისას გარკვეულ თვისებებს ამჟღავნებენ და გადაამუშავების შემდეგ ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამოიყენებიან. ისინი შეიძლება იყვნენ აირად, თხევად ან მყარ მდგომარეობაში. რეალურად ელექტროტექნიკურ მასალებზე არამარტო ელექტრომაგნიტური ველი, არამედ სხვა ფაქტორებიც მოქმედებს, როგორცაა ტემპერატურა, ტენზომცველბა, რადიაცია, ვიბრაცია, მექანიკური დაძაბულობა და სხვა. ამის გამო აღნიშნული მასალების გამოყენებისას გათვალისწინებული უნდა იყოს არამარტო ელექტრული არამედ არაელექტრული თვისებებიც, ზოგჯერ ამ უკანასკნელს განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება.

ელექტროტექნიკური მასალები ოთხ ძირითად სახედ იყოფიან - ელექტროგამტარი ანუ გამტარი მასალები, დიელექტირები, ნახევრად გამტარი და მაგნიტური მასალები. გარკვეულ პირობებში ეს მასალები შეიძლება იყვნენ ზეგამტარულ ან პლაზმურ მდგომარეობაში.

ელექტროტექნიკური მასალების გამოყენების სფეროს განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ მათი აგებულება, სტრუქტურა, ქიმიური, ფიზიკური და ელექტრული თვისებები, აგრეთვე ამ თვისებების ცვლილების კანონზომიერებები გარეშე ფაქტორების ხანგრძლივი ზემოქმედებისას.

ნივთიერებათა აგებულება

§ 1.1 ატომის აგებულება

ქიმიური ელემენტის უმცირეს ნაწილაკს, რომელიც ამ ელემენტის ყველას თვისების მატარებელია ატომი (ბერძნულად *atomos* – განუყოფელი) ეწოდება. დიდი ხნის განმავლობაში ატომი ნამდვილად განუყოფელი იყო, მაგრამ გამოკვლევებით დადგინდა, რომ ნეიტრალურ ატომში ელექტრონების რიცხვი ატომის ბირთვში შემავალი პროტონების რიცხვის ტოლია. ატომის ბირთვში თავმოყრილია ნეიტრონები და დადებითი მუხტის მქონე პროტონები, რომელთა ჯამური მუხტი აკომპენსირებს ატომგულის ირგვლივ გარკვეულ ორბიტაზე მოძრავი ელექტრონების ჯამურ მუხტს. ამ შემთხვევაში ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია. თუ ატომი გასცემს ელექტრონს მაშინ პროტონების დადებითი მუხტი დაკომპენსირებული არ იქნება ელექტრონების მუხტის მიერ, ატომს ჭარბი დადებითი მუხტი გაუჩნდება ე.ი. მივიღებთ დადებითი მუხტის მქონე იონს (ბერძ. *ἰόν*-მიმავალი). ანალოგიურად თუ ატომი შეიძენს ელექტრონს მაშინ უარყოფითი იონი წარმოიქმნება. პროტონის მასა 1836-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას ე.ი. ატომის მთელი მასა ატომგულშია თავმოყრილი.

ატომგულის ირგვლივ ელექტრონები რთული კონფიგურაციის მქონე ორბიტებზე მოძრაობენ, ატომის ზომები სივრცეში ცვლადია, მაგრამ მიახლოებით თვლიან, რომ სფეროს სახისაა, რომლის დიამეტრი 10^{-8} სმ-ის რიგისაა.

ელექტრონი (e) ელემენტარული მუხტის მქონე მდგრადი ნაწილაკია, რომლის მუხტი წინანსწარ შეთანხმებით (1891წ) უარყოფითად ჩათვალეს, მისი სიდიდე $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ კულონია, ხოლო მასა დამოკიდებულია მოძრაობის სიჩქარეზე და ეგრეთწოდებული “მოსვენე-

ბითი" მასის სიდიდე $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ კგ. ელექტრონის გეომეტრიული ზომების განსაზღვრა გაძნელებულია და თვლიან რომ სფეროს ფორმა აქვს, რომლის რადიუსი $r = 2,8 \cdot 10^{-15}$ მ-ია.

პროტონი (p) (ბერძ. *protos* - პირველი) წარმოადგენს დადებითი მუხტის მქონე ელემენტარულ ნაწილაკს, რომლის სიდიდე ელექტრონის მუხტის სიდიდეს უტოლდება ე.ი. $e_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ კ, ხოლო მასა $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ კგ $\approx 1863m_e$. ატომში პროტონების რიცხვი მენდელეევის პერიოდულ სისტემაში ნივთიერების ნომერს ემთხვევა.

ნეიტრონი (n) (ლათ. *neuter* - არცერთი) ელექტრულად ნეიტრალური ელემენტალური ნაწილაკია, რომლის მასა მცირედით განსხვავდება პროტონის მასის სიდიდესგან $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ კგ.

პროტონს და ნეიტრონს მსგავსი გეომეტრიული ზომები და მაგნიტური პარამეტრები გააჩნიათ და გარკვეული პირობებში ნეიტრონი შეიძლება პროტონად გარდაიქმნას ან პირიქით. პროტონი ნეიტრონთან ურთიერთკავშირში ყველა ქიმიური ელემენტის ატომს წარმოქმნის. ამ ურთიერთკავშირის დარღვევა კი ატომის დაშლის მიზეზია.

ატომში ელექტრონების, პროტონების და ნეიტრონების რაოდენობა ატომის თვისებას განაპირობებს. ატომებს შორის ურთიერთქმედებას მხოლოდ ელექტრონები ახდენენ. ამ ურთიერთქმედებით მოლეკულა წარმოიქმნება ან ნივთიერება ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან მეორეში გადადის.

ატომებს შორის ურთიერთქმედებას რომლის შედეგად რამოდენიმე ატომი მოლეკულას წარმოქმნის (ლათ. *moles* - მასა) **ქიმიურ კავშირებს** უწოდებენ. ქიმიური კავშირი მთლიანად განსაზღვრავს მოლეკულის თვისებებს, ამიტომ მიზანშეწონილია განვიხილოთ ამ კავშირის წარმოქმნის პირობები და მიზეზები.

§ 1.2 ქიმიური კავშირები

მდგრადი მოლეკულის არსებობა ნივთიერების ატომებს შორის სხვადასხვა სახის კავშირებითაა განპირობებული, რომელიც თავისმხრივ მყარი, თხევადი და აირადი მდგომარეობის არსებობის საფუძველია. ქიმიურ კავშირში მონაწილე ატომის გარე სავალენტო შრეზე რვა ელექტრონის არსებობა ენერგეტიკულად მეტად ხელსაყრელია. ასეთი შრის წარმოსაქმნელად კავშირში მონაწილე ნეიტრალური ატომი ან გასცემს ან მიიერთებს გარკვეული რაოდენობის ელექტრონებს.

იონური კავშირი ნივთიერებათა პერიოდული სისტემის პირველი და მეშვიდე ჯგუფის ელემენტების (ტიტანიურ მეტალები და ჰალოგენები) ატომებს შორის წარმოიქმნება. პერიოდული სისტემის პირველი ჯგუფის ელემენტის ატომს გარე სავალენტო შრეზე ერთი ელექტრონი გააჩნია და მისთვის რვა ელექტრონიანი შრის წარმოსაქმნელად ენერგეტიკულად უფრო ხელსაყრელია გასცეს ერთი ელექტრონი ვიდრე მიიერთოს შვიდი. ხოლო მეშვიდე ჯგუფის ელემენტისათვის ხელსაყრელია მიიერთოს ერთი ვიდრე გასცეს შვიდი ელექტრონი.

იონური კავშირის წარმოქმნა $NaCl$ -ის მოლეკულის მაგალითზე განვიხილოთ. ვთქვათ სივრცეში არსებობს Na და Cl -ის ატომები, რომელთა შორის მანძილი გაცილებით მეტია ვიდრე მათი გეომეტრიული ზომები. მაშინ ატომებს შორის ელექტრონის გადასვლის ალბათობა პრაქტიკულად ნულის ტოლია, როდესაც აღნიშნული მანძილი ატომის ზომების რიგისაა, მაშინ ადგილი აქვს ნატრიუმის ატომის გარე სავალენტო შრეზე მყოფი ელექტრონის ქლორის ატომზე გადასვლას, რის შედეგად ვიღებთ დადებითი მუხტის მქონე ნატრიუმის და უარყოფითი მუხტის მქონე ქლორის იონებს. კულონის კანონის თანახმად ამ იონებს შორის თავს იჩენს მიზიდვის ძალა F_a , რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$F_3 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2}, \quad (1-1)$$

სადაც q - იონების მუხტია, r - ამ იონებს შორის მანძილია, ϵ_0 - მუდმივი სიდიდეა, ხოლო ϵ_r კი ფარდობითი დიელექტრიკული შედწვევაა.

აღნიშნული ძალა იონების ერთმანეთთან დაახლოებას ცდილობს, მაგრამ როდესაც იონებს შორის მანძილი იმდენად შემცირდება, რომ ადგილი აქვს იონების ელექტრული ღრუბელების ურთიერთშეხებას, მაშინ ღრუბეებს შორის თავს იჩენეს განზიდვის ძალა (F_3), რომლის ბუნება ნაკლებად შესწავლილია და იონთშორის მანძილს (r) შემდეგი ფორმულით უკავშირდება

$$F_3 = \frac{B}{r^n}, \quad (1-2)$$

სადაც B და n მუდმივი სიდიდეებია.

ეს ძალები საწინააღმდეგო მიმართულებით მოქმედებენ, კერძოდ F_3 ცდილობს იონების ერთმანეთთან დაახლოებას, ხოლო F_3 -ის კი დაშორებას. როდესაც $r = r_0$ მაშინ $F_3 = -F_3$ და ამ ტოლობით მდგრადი მოლუკულაა შენარჩუნებული.

იონური კავშირით ასევე წარმოქმნილია მეტალთა ჟანგეულები და რთული შენაერთებიც. იონური კავშირის წარმოქმნაში ატომის გარე სავალენტო შრეზე მყოფი ყველა ელექტრონი მონაწილეობს, ამიტომ ნივთიერებაში თავისუფალი ელექტრონები არ არის ე.ი. იონური კავშირით მიღებული ნივთიერებები დიელექტრიკებს წარმოადგენენ (ცუდად ატარებენ ელექტრულ დენს).

კოვალენტური კავშირი (ლათ. *co* - ერთად და *valens* - ვალენტობა) ძირითადად წარმოიქმნება ერთი სახის ან მსგავსი თვისებების მქონე ატომებს შორის. კავშირი ხორციელდება მეზობელი ატომების სავალენტო ელექტრონების ორბიტების გაერთიანებით (შერწყმით), იმდაგვარად, რომ ელექტრონები ერთდროულად მოლუ-

კულაში შემავალ ყველა ატომს ეკუთვნის (ნახ 1.1). ე.ი. განზოგადებული არიან.



ნახ. 1.1. კოვალენტური კავშირი:
 ა - იზოლირებული ატომები; ბ - მოლეკულა.

როდესაც მოლეკულა ერთი სახის ატომებისგან შედგება, მაშინ განზოგადებული ელექტრონები თანაბრად ეკუთვნიან ყველა ატომს და დადებითი და უარყოფითი მუხტების გეომეტრიული ცენტრები ერთმანეთს ემთხვევიან. ასეთი სახის კოვალენტური კავშირის მქონე მოლეკულას მუხტების გამოხატული პოლუსი არ აქვს და მას არაპოლარულს ანუ ნეიტრალურს უწოდებენ. როდესაც კოვალენტური კავშირის წარმოქმნაში სხვადასხვა სახის ატომები მონაწილეობენ, მაშინ ელექტრონთა ორბიტა ერთერთი ატომის მხარესაა წანაცვლებული, ამიტომ დადებითი და უარყოფითი მუხტების გეომეტრიული ცენტრები ერთმანეთს არ ემთხვევა ე.ი. გვაქვს მუხტების გამოხატული პოლუსი ანუ მოლეკულას დიპოლურს უწოდებენ. ასეთი მოლეკულა ელექტრული დიპოლური მომენტით ($\bar{\mu}$) ხასიათდება

$$\bar{\mu} = q \cdot \bar{l} , \quad (1-3)$$

სადაც q - მუხტების სიდიდეა, ხოლო \bar{l} მუხტების გეომეტრიულ ცენტრებს შორის მანძილია. გარკვეულწილად μ ნივთიერების ელექტრულ თვისებებს უკავშირდება.

კოვალენტური კავშირი რთული ბუნებისაა, ის შეიძლება წარმოიქმნას, როგორც ატომებს ასევე მოლეკულებს შორის, გეხვდება ორგანული და არაორგანული წარმოშობის ნივთიერებებში. ამ კავშირით წარმოქმნილი ნივთიერებები ძნელად დნობადებია, მყიფე ან მაღალი

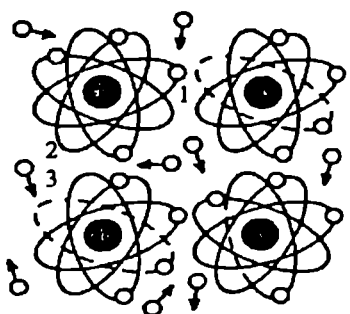
მექანიკური თვისებებით ხასიათდებიან. კავშირში მონაწილე ატომების ბუნებიდან გამომდინარე კოვალენტური კავშირით წარმოქმნილია ნივთიერებებმა, როგორც გამტარული ასევე ნახევრად გამტარული და დიელექტრიკული თვისებები შეიძლება გამოავლინონ.

მოლეკულური ანუ **ვან-დერ-ვალსური** კავშირი ცალკეულ მოლეკულებს შორის მყარდება. მათში არსებული მუხტების ინდუციური, ორიენტაციული და დისპერსიული ურთიერთქმედების საშუალებით, რის გამოც მოლეკულები ელექტროსტატიკური მიზიდულობის ძალით ერთმანეთს უკავშირდებიან. მოლეკულური კავშირი სუსტ კავშირად ითვლება, მაგრამ შედარებით ძლიერია დიპოლური რადიკალის მქონე მოლეკულებში. ამ სახის კავშირის განსაკუთრებულ სახეს წყალბადური კავშირი მიეკუთვნება, როდესაც წყალბადის ატომი დაკავშირებულია ძლიერ ელექტროუარყოფით ატომთან, (ჟანგბადი, ფთორი, ქლორი და სხვა) მაშინ წყალბადის ელექტრონის ორბიტა წანაცვლებულია ამ ატომისკენ და ამით სუსტი დიპოლი წარმოიქმნება, რომელიც ელექტროსტატიკური მიზიდულობის ძალით მსგავს დიპოლს უკავშირდება. წყალბადური კავშირი სითხეებში მოლეკულათა გაერთიანებებს წარმოქმნის (წყალი, მჟავები, სპირტები და სხვა)

რის გამოც იზრდება სიმკვრივე, სიბლანტე, დუღილის ტემპერატურა და სხვა.

წყალბადური კავშირი სუსტ კავშირს წარმოადგენს, მაგრამ დიდ როლს ასრულებს ორგანულ ნივთიერებებში და ცოცხალ ორგანიზმებში.

ლითონური კავშირი თავს იჩენს ლითონის ატომებს შორის. მათში გარე სავალენტო შრეზე მყოფი



ნახ. 12. ლითონური კავშირი
 1 - სავალენტო ელექტრონები;
 2 - ატომები;
 3 - თავისუფალი ელექტრონები

ელექტრონები სუსტად ბმული არიან ატომებთან, მაგრამ კავშირის დასამყარებლად არ არსებობს ატომი რომელიც ამ ელექტრონებს მიიერთებს, ამიტომ ზემოთ განხილული კავშირების წარმოქმნა შეუძლებელი ხდება. მყარ ან თხევად მდგომარეობაში ლითონის ატომები იმდენად ახლოს არიან განლაგებული, რომ სავალენტო ელექტრონი ადვილად ტოვებს ატომს და სითბური ენერგიის ხარჯზე თავისუფლად ქაოსურად მოძრაობენ (ნახ 1.2.) ასეთ ელექტრონებს განზოგადებულს ანუ ზოგადს უწოდებენ. ისინი ერთდროულად ეკუთვნიან ყველა ატომს და კონკრეტულად არცერთს, ხოლო დადებითი მუხტის მქონე ატომები (დადებითი იონები) კრისტალის კვანძებში იმყოფებიან.

ატომებს შორის მიზიდვის და განზიდვის ძალების წონასწორობა განზოგადებული ელექტრონების იონებთან ურთიერთქმედებითაა განპირობებული და მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული.

თუ ლითონის გარე სავალენტო შრეზე ერთი ელექტრონია მაშინ თავისუფალი ელექტრონების რიცხვი მოცულობის ერთეულში ატომების რიცხვს უტოლდება (N). გარე სავალენტო შრეზე ორი ელექტრონის შემთხვევაში თავისუფალი ელექტრონები ატომების რიცხვზე ორჯერ მეტია. თავისუფალი ელექტრონების ასეთი დიდი რაოდენობა და მათი სწრაფი რეაგირება გარეშე ენერგეტიკულ ზემოქმედებაზე ლითონების მაღალ სითბო და ელექტრო გამტარობას განაპირობებს.

ლითონური კავშირი ძლიერ კავშირს წარმადგენს. უმეტეს ლითონებს დიდი მექანიკური სიმტკიცე და დნობის მაღალი ტემპერატურა ახასიათებთ.

ყველაზე უნივერსალურ კავშირად ვან-დერ-ვალსური კავშირია მიჩნეული, ის თავს იჩენს თითქმის ყველა შემთხვევაში, მაგრამ მცირე ენერგიით (10^4 ჯოული/მოლ-ზე) ხასიათდება, ამის გამო ვან-დერ-ვალსური კავშირით წარმოქმნილი სტრუქტურები არამ-

დგრადები არიან, ადვილად აორთქლებადი არიან და დნობის ტემპერატურის მცირე სიდიდე ახასიათებთ.

იონური კავშირი გაცილებით ძლიერ (10^6 ჯოული/მოლ-ზე) ტიპურ ქიმიურ კავშირს წარმოადგენს და ფართოდაა გავრცელებული არაორგანული წარმოშობის ნივთიერებებში. ასეთივე ენერგიით ხასიათდება კოვალენტური კავშირი. ის ორგანული წარმოშობის ნივთიერებებშია გავრცელებული, მაგრამ გვხვდება არაორგანულ შენაერთებშიც.

მეტალური კავშირის ენერგია თვით ატომების ბუნებითა განპირობებული და დიდ დიაპაზონებში ($10^4 - 10^6$ ჯოული/მოლ) იცვლება და საკმარისია მტკიცე კავშირის წარმოსაქმნელად. აღსანიშნავია რომ ნებისმიერ მყარ შენაერთებში ერთდროულად რამოდენიმე სახის კავშირი არსებობს, მაგრამ ერთერთი მათგანი უფრო ძლიერია და ის განსაზღვრავს კავშირის სახეს.

§ 1.3 ნივთიერებათა აგრეგატული მდგომარეობა

ბუნებაში ნივთიერებები ძირითადად სამ აგრეგატულ მდგომარეობაში იმყოფებიან, ესენია: აირადი, თხევადი და მყარი მდგომარეობა, მაგრამ გასული საუკუნის მეორე ნახევრიდან აქტიურად დაიწყო მეოთხე აგრეგატული მდგომარეობის - პლაზმის შესწავლა.

ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობა ძირითადად ტემპერატურით და წნევითაა განპირობებული, ისინი მოლეკულათა სისტემის საშუალო კინეტიკურ ენერგიას (\bar{W}_k) განსაზღვრავენ, ხოლო მოლეკულათა სისტემის ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციური ენერგია (\bar{W}_p) ნაკლებად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე და წნევაზე.

თუ ნივთიერებაში მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია (\overline{W}_j) გაცილებით მეტია ვიდრე მოლეკულების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია (\overline{W}_3), მაშინ მოლეკულების ერთმანეთთან ურთიერთქმედების ძალები დაძლეულია, მოლეკულებს შორის მანძილი გაცილებით მეტია ვიდრე მათი ზომები და ისინი ინტენსიურ სითბურ ქაოსურ მოძრაობას ასრულებენ ე.ი. აირად მდგომარეობაში იმყოფებიან.

აირი მთლიანად ავსებს იმ ჭურჭლის მოცულობას, რომელშიც მოთავსებულია და მისი მდგომარეობა აირების კანონებით ხასიათდება. ნებისმიერი ნივთიერება შეიძლება იმყოფებოდეს აირად მდგომარეობაში თუ მისი წნევა და ტემპერატურა ისეთია რომ სრულდება პირობა

$$\overline{W}_1 \gg \overline{W}_3 \text{ ანუ } \frac{\overline{W}_1}{\overline{W}_3} \ll 1 \quad (1-4)$$

თხევადი მდგომარეობის შემთხვევაში $\overline{W}_j \approx \overline{W}_3$. სითხეს საკუთარი გეორმეტრიული ფორმა არ გააჩნია, იკავებს ჭურჭლის მოცულობას იმ დონემდე სადამდეც ჩასხმულია და ახასიათებს დენადობა.

როდესაც $\overline{W}_j \ll \overline{W}_3$, მაშინ მოლეკულები ერთმანეთთან ძლიერ კავშირში იმყოფებიან, ნივთიერებას გამოხატული გეომეტრიული ფორმა გააჩნია და მას მყარ მდგომარეობას უწოდებენ.

მყარ სხეულებში ატომები წონასწორული მდგომარეობის გასწვრივ სითბური რხევით მოძრაობას ასრულებენ. მათი რხევის ამპლიტუდა მიახლოებით ატომის რადიუსის თანაზომადია, სითხეებში მოლეკულების ქაოსური გადაადგილების მანძილი კი მოლეკულის ზომიანე შედარებით დიდია, ხოლო აირებისთვის გაცილებით მეტია.

ნივთიერების ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა შესაძლებელია წნევისა და ტემპერატურის ცვლილების საშუალებით. კერძოდ თუ ნატრიუმის

ნიმუშს გავათბობთ ე.ი. მისი \bar{W}_j -ის სიდიდე გაიზრდება, დაიწყებს გადნობას და თხევად მდგომარეობაში გადავა ($t_{\text{ფ}} = 98^\circ\text{C}$). ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით ატომების კინეტიკური ენერგია იმდენად მატულობს, რომ ატომები გამდნარ მასას მოწყდებიან, აორთქლდებიან ($t = 883^\circ\text{C}$), ე.ი. აირად მდგომარეობაში გადადიან. ტემპერატურის შემცირება კი აღნიშნულ პროცესს უკუმიმართულებით წარმართავს.

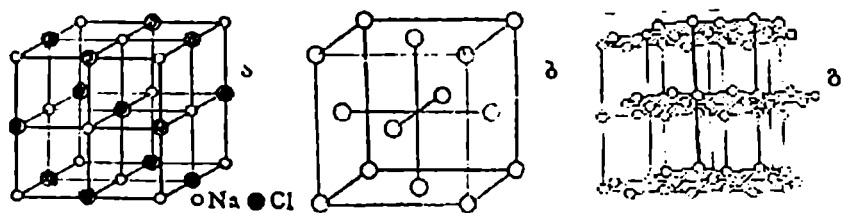
ნებისმიერი ნივთიერების ტემპერატურის გაზრდით ის მყარიდან თხევად, ხოლო შემდეგ აირად მდგომარეობაში გადავა, თუ ტემპერატურას კიდევ გაზრდით მაშინ ატომის გარე სავალენტო შრეზე მყოფი ელექტრონები იმდენად დიდ ენერგიას იძენენ, რომ ისინი ატომს ტოვებენ და ელექტრონებისა და იონების გარკვეულ სისტემას ვიღებთ სადაც დადებითი მუხტის მქონე ნაწილაკები და ელექტრონები, თბურ ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან. ასეთ მდგომარეობას პლაზმას უწოდებენ. პლაზმური მდგომარეობის ტემპერატურა 10000°C -ის აღემატება.

თბური ქაოსური მოძრაობის გამო აირად და თხევად მდგომარეობაში მოლეკულებს შორის მანძილი და მეზობელი მოლეკულების რიცხვი მუდმივად იცვლება, ხოლო მყარ მდგომარეობაში ატომები ერთმანეთის მიმართ მკაცრად განსაზღვრული მანძილით არიან დაშორებული და მოსაზღვრე ატომების რიცხვიც უცვლელია ე.ი. ადგილი აქვს ატომთა პერიოდულ კანონზომიერ განლაგებას სივრცეში, რომელსაც კრისტალური უწოდეს.

კრისტალის იმ უმცირეს თვისობრივად მახასიათებელ ნაწილს, რომლის სიმეტრიული გადაადგილებით მთელი კრისტალი შეგვიძლია დავახასიათოთ კრისტალის ელემენტარული უჯრედი ეწოდება, მის ფორმას ატომთაშორის ურთიერთქმედების ძალები განსაზღვრავს, მაგალითად NaCl იონური კრისტალისათვის (ნახ.1.3ა) ელემენტარული უჯრედს კუბის ფორმა აქვს. ნატრიუმის

და ქლორის იონებს შორის მანძილს ელემენტარული უჯრედის მესერის პარამეტრს უწოდებენ და ის მუდმივი სიდიდეა.

ზოგიერთ ელემენტარულ უჯრედში ატომები არამარტო წიბოებზე არამედ წახნაგის ცენტრებშიც შეიძლება განლაგდეს მაგალითად სპილენძის შემთხვევაში (ნახ.13.ბ) და მას წახნაგცენტრირებულს უწოდებენ. შესაძლებელია ატომების გარკვეულ სიბრტყეში განლაგება, მაგალითად გრაფიტის შემთხვევაში (1.3.გ). ელემენტალურ უჯრედებს უფრო რთული ფორმა და აგებულებაც გააჩნიათ.



ნახ. 13. კრისტალის ელემენტარული უჯრედის ნიმუშები

ნებისმიერი კრისტალური ნივთიერების გათბობისას ატომთაშორის კავშირი ერთ განსაზღვრულ ტემპერატურაზე ირღვევა ე.ი. კრისტალურ სხეულებს დნობის მუდმივი ტემპერატურა ახასიათებთ, რომლის სიდიდე ატომთაშორის ურთიერთქმედების ძალებითაა განპირობებული.

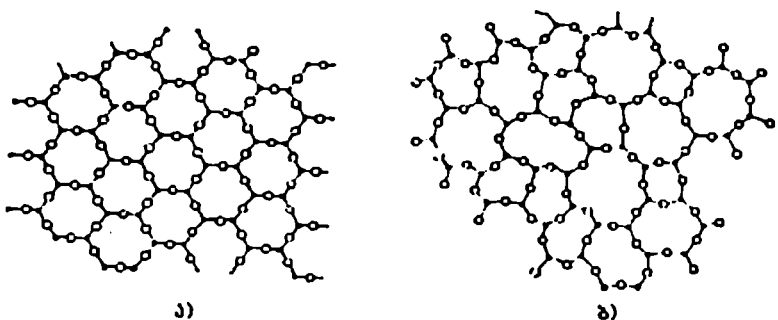
მყარი სხეულების უმეტესობას უცვლელი სახის კრისტალური სტრუქტურა გააჩნია, რომელიც ტემპერატურისა და წნევის ცვლილებით არ იცვლება, მაგრამ ზოგიერთ მათგანს (გრაფიტი, კალა და სხვა) ორი ან რამოდენიმე კრისტალური სტრუქტურა ახასიათებს, ამ მოვლენას პოლიმორფიზმს უწოდებენ. პოლიმორფული გარდაქმნა ანუ ერთი სტრუქტურიდან მეორეზე გადასვლა ტემპერატურის ან წნევის შეცვლით ხდება.

ელემენტარულ უჯრედში და შესაბამისად კრისტალში ატომები სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებული მანძილით არიან დაშორებული, ამიტომ ამ მიმართულებით ფიზიკური და ელექტრული თვისებებიც განსხვავებული ექნებათ. ამ მოვლენას თვისებების ანიზოტროპიას უწოდებენ.

თუ ნიმუში ერთი კრისტალისგან შედგება, მას მონოკრისტალურს უწოდებენ, ხოლო მრავალკრისტალურ ნიმუშს კი პოლიკრისტალურს. ტექნიკაში გამოყენებული, კრისტალური ნივთიერებების უმეტესობა პოლიკრისტალურია, რომელთა კრისტალის ზომები 0,001მმ-დან 0,1მმ-დე იცვლება.

როდესაც მყარ სხეულში შეუძლებელია ელემენტარული უჯრედის გამოყოფა, ან გამოყოფილი ელემენტარული უჯრედით კრისტალის დასახასიათებლად მხოლოდ რამოდენიმე სიმეტრიული გადაადგილება შეგვიძლია მოვახდინოთ, მაშინ მყარ სხეულს ამორფულს უწოდებენ.

ამორფულ სხეულებში ატომებს შორის მანძილი მუზობელ უჯრედში სხვადასხვაა განსხვავებით კრისტალური სხეულებისაგან.



ნახ. 1.4. კრისტალური (ა) და ამორფული (ბ) მინის სტრუქტურა სიბრტყეზე

კრისტალური	სხეული	გარკვეულ	პირობებში
ამორფულ	მდგომარეობაში	აღვილად	შეიძლება

გადავიდეს. მაგალითად თუ გამდნარ მინას მცირე სიჩქარით გავაცივებთ, მაშინ მოწესრიგებულ კრისტალურ სტრუქტურას მივიღებთ (ნახ.1.4.ა), ხოლო სწრაფი გაცივებისას ქაოსურად მოძრავი ატომები არამოწესრიგებულ, შემთხვევით მდგომარეობაში თითქოს “გაიყინნენ” და ამორფული სახე მიიღეს (ნახ.1.4.ბ).

ამორფულ სხეულებში გარკვეული სტრუქტურული მიმართულების გამოყოფა შეუძლებელია, ამიტომ მისი თვისებები ყველა მიმართულებით თანაბარია, ანუ იზოტროპულია. რადგან ამორფული სხეულების უჯრედებში ატომებს შორის მანძილი სხვადასხვაა, ამის გამო გათბობისას ატომთშორის კავშირი სახვადასხვა ტემპერატურაზე დაირღვევა ე.ი. თანდათან დარბილდება, ამიტომ ამორფულ სხეულებს განსხვავებით კრისტალური სხეულებისა დარბილების და არა დნობის ტემპერატურა გააჩნიათ. მიუხედავად ამისა ამორფული სხეულები ტექნიკაში ფართოდ გამოიყენებიან.

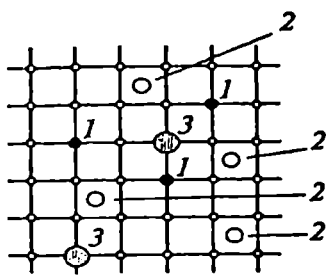
§ 1.4 მინარევები და დეფექტები

მინარევი ეწოდება ნივთიერებაში უცხო ტიპის ატომების ან მოლეკულების არსებობას. მინარევების როლში აგრეთვე სტეკიომეტრიული (ბერძ. *steicheion* - საწყისი, მოლეკულაში ნივთიერებათა თანაფარდობას აღნიშნავს) წონასწორობის დარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ჭარბი ატომები გვევლინება, რომლებიც ქიმიურ კავშირში არ მონაწილეობენ.

მინარევების უმეტესობა ნივთიერების ყველა თვისებებზე გავლენას ახდენს, მაგრამ არსებობს ისეთი მინარევები, რომლებიც ნივთიერების თვისებებზე არავითარ გავლენას არ ახდენს. ასეთ მინარევებს ნეიტრალურს უწოდებენ და ისინი პრაქტიკულად არ განიხილებიან.

აირად და თხევად ნივთიერებებში მინარევეები ნუბისმიერ აგრეგატულ მდგომარეობაში იმყოფებიან, ხოლო მყარ ნივთიერებებში ძირითადად მყარ და აირად მდგომარეობაში არიან.

მყარ ნივთიერებებში ატომების კანონ'სომიერი განლაგების ნუბისმიერ დარღვევას კრისტალური სტრუქტურის *დეფექტები* ანუ არასრულყოფილება ეწოდება. ბუნებაში არ არსებობს კრისტალური სტრუქტურა, რომელიც დეფექტებს არ შეიცავდეს. ტექნიკაში გამოყენებული ყველა მყარი ნივთიერებები დიდი რაოდენობის დეფექტებს შეიცავს, რომლებიც საგრძნობ გააღენას ახდენენ მის ყველა თვისებებ'ზე, განსაკუთრებით კი ელექტრულ მახასითებლებ'ზე.



ნახ. 15. წერტილოვანი დეფექტების სახეები

გეომეტრიული ზომებისა და განლაგების მიხედვით დეფექტები შეიძლება იყოს წერტილოვანი, ხაზოვანი, ზედაპირული და სივრცითი. წერტილოვან დეფექტებს (ნახ. 15.) კრისტალური სტრუქტურის წერტილოვანი არასრულყოფილებები მიეკუთვნებიან, როგორიცაა ვაკანსი (1) ანუ კრისტალის კვანძში ატომის მიერ დაუკავებელი თავისუფალი ადგილი. *წერტილოვან დეფექტს* წარმოქმნის კრისტალის კვანძთაშორის სივრცეში (2) და კვანძებში (3) განლაგებული მინერალური ატომები. პირველს ჩანერგვის ხოლო მეორეს ჩანაცვლების დეფექტს უწოდებენ.

ხაზოვან დეფექტებს კრისტალური სტრუქტურის ისეთი არასრულყოფილებები მიეკუთვნება, რომელთა ერთერთი განზომილება გაცილებით აღემატება დანარჩენს, ასეთებია: ბზარები, დისლოკაციები, კრისტალთაშორის საზღვრები და სხვა. *სივრცითი დეფექტის* შემთხვევაში არასრულყოფილების სამივე განზომილება თითქმის თანაბარია. ნუბისმიერ არასრულყოფილებას,

რომელიც სხეულის ზედაპირზე გამოდის ზედაპირულ დეფექტს წარმოადგენს.

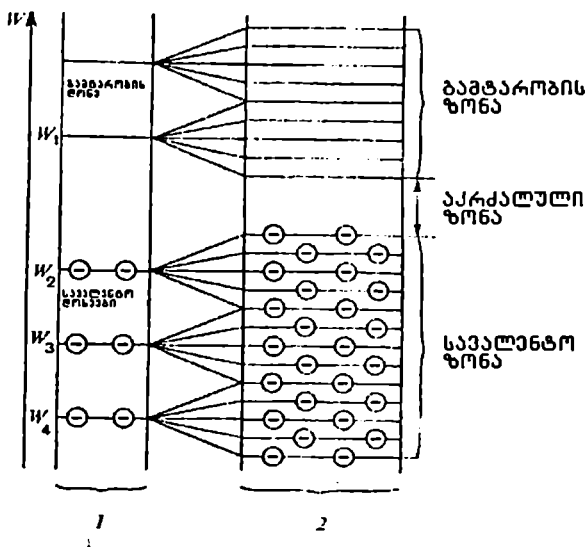
თუ დეფექტის დანახვა შეუიარაღებელი თვალით შეიძლება მაშინ მას *მაკროდეფექტს*, ხოლო სპეციალური ხელსაწყოებით (მიკროსკოპით) დანახულს – *მიკროდეფექტს* უწოდებენ. გარეშე ზემოქმედებით დეფექტების რაოდენობა იცვლება და ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ.

ტექნიკურ მასალებში დეფექტების და მინარევების რაოდენობა იმდენად დიდია, რომ ისინი ფაქტიურად მასალის თვისებებს განაპირობებენ, ზოგიერთ შემთხვევაში კი გადაფარავენ. მაგალითად ტექნიკური სისუფთავის ნახევარად გამტარებში, სადაც მინარევების რაოდენობა 0,001%-ია ნახევრად გამტარული ეფექტი პრაქტიკულად არ ჩანს, მაგრამ საკმარისია მინარევების რაოდენობა 10^{-5} %-ზე ნაკლები გახდეს, რომ მასალაში სულ სხვა თვისებები გამოვლინდება.

§ 1.5 ზონური თეორიის ელემენტები

ატომში ელექტრონები გარკვეულ ორბიტაზე ბრუნვით მოძრაობას ასრულებენ. პაულის პრინციპის თანახმად ერთ ორბიტაზე ერთი ან ორი ელექტრონის ყოფნა შეიძლება. თუ ორი ელექტრონია მაშინ მათი სპინები (ბრუნვის მიმართულება) საწინააღმდეგოდ უნდა იყოს მიმართული. ორბიტას და ორბიტაზე მყოფ ყველა ელექტრონს გარკვეული სიდიდის ენერგია შეესაბამება, რომელსაც ენერგეტიკულ *დონეს* უწოდებენ, მისი სიდიდე ორბიტის კვანტური მახასიათებლით არის განსაზღვრული. ორ ორბიტას შორის ელექტრონის არსებობა შეუძლებელია და ყველა ორბიტას მკაცრად განსაზღვრული სიდიდის ენერგია შეესაბამება ე.ი. იზოლირებულ ატომში თითოეული ორბიტა, მიუხედავად იმისა

იმყოფება თუ არა მასზე ელექტრონი გარკვეულ ენერგეტიკულ დონეს (W) წარმოადგენს. ეს მოსაზრება იზოლირებული ატომის გამოსხივების სპექტრის შესწავლით დადასტურდა.



ნახ. 1.6. იზოლირებული ატომის (1) და მყარი სხეულის (2) ენერგეტიკული დიაგრამები.

ატომგულის მიზიდვის ძალის მოქმედებით ელექტრონები ცდილობენ, რაც შეიძლება ახლოს მივიდნენ ატომგულთან, რასაც მინიმალური ენერგია შეესაბამება. ასეთი დონეები შეესებულება ვალენტურ კავშირში მონაწილე ელექტრონებით (ნახ. 1.6-1) (W_2, W_3) და ამ დონეს სავალენტო დონეს უწოდებენ. მაღალი ენერგიის მქონე დონეები (W_1) თავისუფალია.

გარეშე ენერგეტიკული ზემოქმედებით ელექტორნს შეუძლია მიიღოს ΔW სიდიდის დამატებითი ენერგია, რომელიც ამ ორი ენერგეტიკული დონეების შესაბამისი ენერგიის სხვაობის ტოლია ($\Delta W = W_1 - W_2$), მაშინ მისი

ენერგია გაიზრდება და W_1 ენერგეტიკულ დონის შესაბამისი გახდება. ეს ენერგია იმდენად დიდია, რომ მის მფლობელ ელექტრონს ატომის ადვილად დატოვება შეუძლია, მას "თავისუფალ" ელექტრონს უწოდებენ. ასეთი ელექტრონი მცირე ენერგეტიკული ზემოქმედებით მონაწილეობას იღებს ელექტროგამტარებლობაში, ამის გამო ამ დონის შესაბამის ელექტრონს გამტარებლობის ელექტრონს, ხოლო დონეს - გამტარობის დონეს უწოდებენ.

მყარი მდგომარეობის წარმოქმნისას იზოლირებული ატომების ერთმანეთთან მიახლოებით თითოეული დონე ქვედონებად გაიხლიჩება და ენერგეტიკული დონეების სისტემას - ენერგეტიკულ ზონას წარმოქმნის (ნახ. 1.6.-2).

თითოეულ ნივთიერებაში იმდენი ენერგეტიკული ზონაა რამდენი დონეცაა ნივთიერების იზოლირებულ ატომში, მაგრამ ჩვენთვის შიგა დონეები (W_3, W_4) მნიშვნელოვანი არ არის, ამიტომ სავალენტო კავშირში და ელექტროგამტარობაში მონაწილე ელექტრონების დონეებს ვიხილავთ, რომლებიც შესაბამისად *სავალენტო* და *გამტარობის* ზონებს წამოქმნიან.

მყარ მდგომარეობაში ატომთა ურთიერთქმედება გაცილებით მეტია ვიდრე აირადში. ამ ურთიერთქმედების გამო ΔW -ს სიდიდე მცირდება, მას აკრძალულ ზონას უწოდებენ და მისი სიდიდე ნივთიერების ელექტრულ თვისებებს განაპირობებს.

ზოგადად თითოეული ზონის სიგანე 1 ელექტრონ-ვოლტს (მე - ის ენერგია რომელსაც ელექტრონი შეიძენს 1მ მანძილის გავლისას 1ე პოტენციალთა სხვაობის მქონე ველში) არ აღემატება და თითოეულ ზონაში იმდენი ქვედონეა, რამდენი ატომიცაა მოცემულ ნიმუშში. ვიცით რომ 1სმ³ ნივთიერება მიახლოებით 10^{24} ატომს შეიცავს ე.ი. ერთი ქვედონე მეორისაგან 10^{-24} ევ ტოლი ენერგითა გამოყოფილი. ეს ენერგია იმდენად მცირეა, რომ ელექტრონს ენერგიის თერმოფლუქტუაციის ხარჯზე ადვილად შეუძლია

ერთი ქვედონიდან მეორეზე გადავიდეს, მაგრამ სავალენტო ზონიდან გასვლა არ შეუძლია და მას ბმულ ელექტრონს უწოდებენ, ის ელექტრულად ბმულია ატომთან. გამტარობის ზონის შესაბამის ელექტრონს კი ადვილად შეუძლია გამტარობის ზონაში ქვედონებს შორის გადასვლის მოხდენა, ამიტომ ეს ელექტრონი ნიმუშში თავისუფლად გადაადგილდება ე.ი. "თავისუფალია". იმისათვის, რომ სავალენტო ელექტრონი თავისუფალი გახდეს მან დამატებითი ენერგია (ΔW) გარეშე შემოქმედებით უნდა მიიღოს.

§ 1.6 ელექტროტექნიკური მასალების კლასიფიკაცია

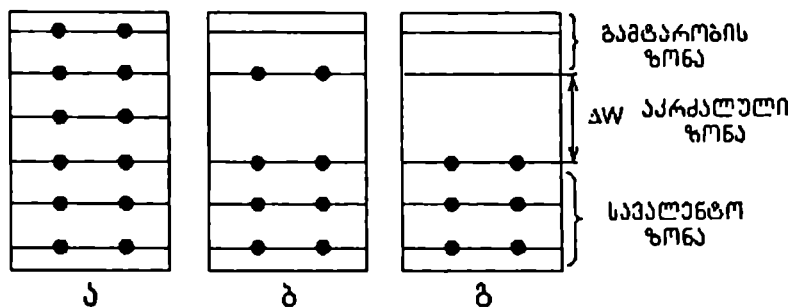
როგორც აღვნიშნეთ ელექტროტექნიკურ მასალებზე, როგორც ელექტრული ასევე მაგნიტური ველი მოქმედებს, ამიტომ მიზანშეწონილია ელექტროტექნიკური მასალების კლასიფიკაცია ამ ველებში გამოვლენილი თვისებების მიხედვით მოვახდინოთ.

ელექტრული ველის მოქმედებით ნივთიერებაში გარკვეული სიდიდის ელექტრული დენი გაივლის, რომლის სიდიდე ნივთიერების წინააღმდეგობით კერძოდ კი კუთრი წინააღობის (ρ) სიდიდითაა განპირობებული. აღსანიშნავია, რომ კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე ნივთიერების ძირითადი ელექტრული მახასიათებელი პარამეტრია და მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული.

ელექტროგამტარ ანუ გამტარ მასალებს კუთრი წინააღმდეგობის ძალიან მცირე სიდიდე გაჩნიათ, მისი მნიშვნელობა ოთახის ტემპერატურაზე 10^{-8} ომი.მ-დან 10^{-5} ომი.მ-მდე იცვლება და ტემპერატურის გაზრდით იზრდება. ელექტროგამტარ მასალებს ლითონები და მათი შენადნობები მიეკუთვნებიან.

ნახევრად გამტარი მასალების კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე გარეშე ენერგეტიკული ზემოქმედებით ძლიერ იცვლება. მისი სიდიდე 10^{-5} ომი.მ-დან 10^8 ომი.მ-მდეა და ტემპერატურის გაზრდით სწრაფად მცირდება. დიელექტრიკები ანუ ელექტროსაიზოლაციო მასალები კუთრი წინააღობის დიდი მნიშვნელობით ხასიათდებიან. ასეთი მასალებისათვის ρ -ს სიდიდე 10^8 ომი.მ-დან 10^{16} ომი.მ-მდე იცვლება. ისინი ელექტრულ დენს ცუდად ატარებენ. მათი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე ტემპერატურის გაზრდით მცირდება, მაგრამ უფრო ნაკლებად ვიდრე ნახევრად გამტარ მასლებში.

ელექტრული ველი ნივთიერების ელექტრონზე გარკვეულ ზემოქმედებას ახდენს, რის შედეგად მათი ენერგია იცვლება, ამიტომ მიზანშეწონილია ელექტროტექნიკური მასალების კლასიფიკაცია ზონური თეორიის თვალსაზრისითაც, კერძოდ აკრძალული ზონის სიდიდის მიხედვით მოვახდინოთ.



ნახ. 1.7. ენერგეტიკული ზონები გამტარში (ა), ნახევრად გამტარში (ბ) და დიელექტრიკში (გ).

გამოსხივების სპექტრის შესწავლით დადგინდა, რომ გამტარ მასალებში აკრძალული ზონის სიდიდე ნორმალურ პირობებში ნულის ტოლია (ნახ. 1.7.-ა) ($\Delta W = 0$). ეს იმას ნიშნავს, რომ ყველა სავალენტო ელექტრონს შეუძლია მონაწილეობა მიიღოს ელექტროგამტარობაში, სავალენტო და გამტარობის ზონას შორის

კი ენერგეტიკული ბარიერი არ არსებობს და გამტარობის 'სონაში ყველა ენერგეტიკული დონე ელექტრონებითაა დაკავებული.

ნახევრად გამტარ მასალებში (ნახ. 1.7-ბ) სავალენტო და გამტარობის ზონას შორის ენერგეტიკული ბარიერის სიდიდე 3 ევ-ს არ აღემატება ($\Delta W < 3$ ევ) და ძლიერ ცვალებადია გარემო ზემოქმედებით. ნორმალურ ტემპერატურაზე გამტარებლობის ზონის ყველა დონე ელექტრონებით დაკავებული არ არის. ე.ი. ნახევრად გამტარებში ელექტროგამტარებლობაში მონაწილეობის მიღება გაცილებით ნაკლები რაოდენობის ელექტრონს შეუძლია ვიდრე გამტარ მასალებში.

დიელექტრიკებში აკრძალული ზონის სიდიდე 3 ევ-ს აღემატება ($\Delta W > 3$ ევ), ნორმალურ ტემპერატურაზე დიელექტრიკის გამტარებლობის ზონის (ნახ. 1.7-გ) ენერგეტიკული დონეები თითქმის თავისუფალია. დიელექტრიკის სავალენტო ზონის ელექტრონმა გამტარობის 'სონაში, რომ გადავიდეს შედარებით მეტი ენერგია უნდა მიიღოს ვიდრე ნახევრად გამტარის შემთხვევაში. ე.ი. დიელექტრიკის ელექტრული პარამეტრები უფრო ნაკლებადაა დამოკიდებული გარეშე ზემოქმედებაზე ვიდრე ნახევრად გამტარის.

მაგნიტური თვისებების მიხედვით ნივთიერებები სუსტ და ძლიერ მაგნიტურ მასალებად იყოფიან. სუსტ მაგნიტურ მასალებს დიამაგნიტები და პარამაგნიტები მიეკუთვნებიან. მათი მაგნიტური შეღწევადობა დაახლოებით ერთის ტოლია ($\mu \approx 1$) და არაა დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური ველის დაძაბულობაზე. ამიტომ ისინი, როგორც მაგნიტური მასალები იშვიათად გამოიყენებიან.

ძლიერ მაგნიტურ მასალებს ის მასალები მიეკუთვნებიან, რომელთა მაგნიტური შეღწევადობა გაცილებით მეტია ერთზე ($\mu \gg 1$) და გარეშე მაგნიტური ველის დაძაბულობაზეა დამოკიდებული, ასეთებს *ფერომაგნიტები* ეწოდებათ. მათ რკინა, ნიკელი, კობალტი, მათი მყნადნობები და სხვა მასალები მიეკუთვნებიან.

ელექტრო გამტარი მასალები

§ 2.1 ლითონთა ელექტროგამტარობის მოვლენა

ლითონები და მათი შენადნობები თხევად ან მყარ მდგომარეობაში ელექტრული დენის საუკეთესო გამტარებს წარმოადგენენ. მათში დენის გავლა თავისუფალი ელექტრონების არსებობითაა განპირობებული, ამიტომ მათ ელექტრონული გამტარობის მქონე პირველი გვარის გამტარ მასალებს უწოდებენ. გამტარ მასალებს აგრეთვე მიეკუთვნებიან ზოგიერთი არამეტალურ წარმოშობის მასალებიც.

ელექტროლიტებს ანუ მეორე გვარის გამტარ მასალებს მჟავები, ტუტეები, მარილთა წყალხსნარები და გამდნარი იონური შენაერთები წარმოადგენენ. მათში დენის გავლა დადებითი და უარყოფითი იონთა მოძრაობითაა განპირობებული, ისინი ელექტროდზე გამოიყოფიან, ამის გამო ელექტროლიტთა შემადგენლობა და კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე იცვლება. ეს კი მათ პრაქტიკულ გამოყენებას ართულებს.

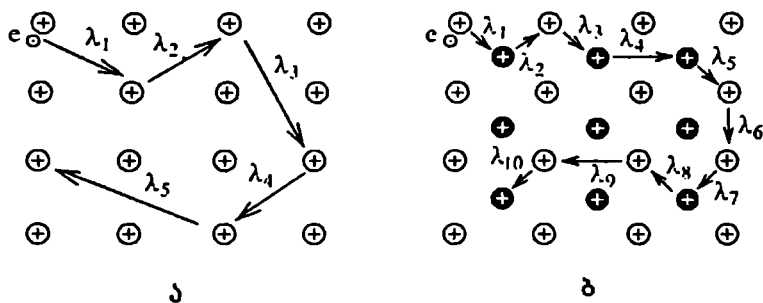
პრაქტიკაში უფრო ხშირად გამტარ მასალებად ლითონებს და მათი შენადნობებს იყენებენ. ნორმალურ პირობებში ($t=20^{\circ}C$) მათი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე 10^{-8} ომი.მ-დან 10^{-5} ომი.მ-დე იცვლება. სუფთა ლითონების კუთრი წინააღმდეგობა უფრო ნაკლებია, ვიდრე შენადნობების.

სუფთა ლითონები ელექტროენერჯის და სიგნალების გადასაცემად გამოიყენებიან. მათ მაღალი გამტარობის მასალებს უწოდებენ, ხოლო შენადნობებს რომლებსაც კუთრი წინააღმდეგობის შედარებით დიდი მნიშვნელობა აქვთ, *დიდი წინააღმდეგობის* მქონე გამტარი მასალები ეწოდებათ. ისინი გამახურებელი ელემენტების, რეზისტორების, რეოსტატების და სხვა ნაკეთობების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

კნობილია, რომ ლითონებში ელექტრული დენი თავისუფალი ელექტრონების მოწესრიგებული მოძრაობითაა განპირობებული. როდესაც ლითონის ნიმუშზე გარეშე ელექტრული ველი არ მოქმედებს ე.ი. $E = 0$, მაშინ თავისუფალი ელექტრონები თბურ-ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან. ისინი თავიანთი მოძრაობის გზაზე კრისტალის კვანძებში მყოფ იონებს და კრისტალის დეფექტებს ეჯახებიან. დაჯახებებს შორის მანძილს ელექტრონის თავისუფალ განარბენს უწოდებენ და λ აღნიშნავენ. რადგან მეტალის სტრუქტურაში დეფექტები არათანაბრადაა განაწილებული (2.1-ა), ამის გამო სხვადასხვა მიმართულებით λ სხვადასხვა სიდიდის იქნება, ამიტომ შემოაქვთ λ -ს საშუალო მნიშვნელობის (კნება $\bar{\lambda}$). აქედან გამომდინარე

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{n} \quad (2-1)$$

$\bar{\lambda}$ ელექტრონის მდგომარეობის მახასიათებელი სიდიდეა და ატომთა შორის მანძილს მცირედით აღემატება ($\bar{\lambda} \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ მ} = 5\text{Å}$).



ნახ. 2.1. ელექტრონის თავისუფალი განარბენი (λ) სუფთა ლითონებში (ა) და შენადნობებში (ბ).

ელექტრონის ზომები გაცილებით ნაკლებია იონთა ზომებზე და მათ შორის მანძილზე, ამიტომ თუ ლითონში დეფექტები არ არის, მაშინ ელექტრონის კვანძებთან და-

ჯახების ალბათობა და შესაბამისად $\bar{\lambda}$ -ის სიდიდე კვანძებს შორის მანძილით იქნება განპირობებული, როდესაც ლითონში სხვადასხვა სახის მინარევები და დეფექტებია მაშინ მათ მიერ კვანძებს შორის სივრცის დაკავების გამო კვანძებს შორის მანძილი მცირდება ეს კი $\bar{\lambda}$ -ის შემცირებას იწვევს (ნახ. 2.1-ბ).

ლითონში ელექტრონები თბურ ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან, მათი მოძრაობის საშუალო თბურ სიჩქარეს ($\bar{V}_{თბ}$) არამარტო ტემპერატურა განსაზღვრავს, არამედ ელექტრონების დიდი კონცენტრაცია და მათი ურთიერთქმედება კრისტალის კვანძებში მყოფ იონებთან. გარკვეულ ტემპერატურულ ინტერვალში $V_{თბ}$ -ის სიდიდე სუსტად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე და სხვადასხვა ლითონებისათვის თითქმის მუდმივია $V_{თბ} \approx 10^5$ მ/წმ.

თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაცია 1სმ^3 მოცულობაზე 10^{24} -ს ტოლია და დიდი სიმკვრივის გამო ისინი ერთმანეთის მოძრაობის ტრაექტორიაზე საგრძნობ გავლენას ახდენენ.

თუ ნიმუშზე გარე ელექტრული ველი მოქმედებს, ე.ი. $E \neq 0$, მაშინ ველის მოქმედებით ელექტრონები აჩქარდებიან. მათი სიჩქარე უმნიშვნელოდ იცვლება, მაგრამ სიჩქარის ნაზრდი ორიენტირებულია ველის გასწვრივ ე.ი. ელექტრონების ქაოსურ მოძრაობის ფონზე თავს იჩენს მიმართული მოწესრიგებული მოძრაობა, რომელსაც ელექტრულ დენს უწოდებენ. ელექტრონები ველში მიღებული დამატებით ენერგიას დაჯახების მომენტში კვანძებს გადასცემენ. ამითაა განპირობებული გამტარის გათბობა ელექტრული დენის გავლისას.

გამტარში გამავალი დენის სიმკვრივე (i) გარეშე ველის დაძაბულობასთან (E) შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული

$$i = \gamma E, \quad (2-2)$$

სადაც γ -ს მასალის კუთრ ელექტროგამტარობას უწოდებენ. პრაქტიკაში გამოიყენება γ -ს შებრუნებული სიდიდე, რომელსაც კუთრ ელექტროწინაღობა, ან კუთრი წინაღობა ეწოდება (ρ). მისი სიდიდე ნიმუშის სიგრძესთან (l), განიკვეთის ფართობთან (S) და ნიმუშის წინაღობასთან (R) შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (2-3)$$

კუთრი წინაღობის განზომილება ომი.მ-ია, მაგრამ პრაქტიკაში ხშირად არასისტემური ერთეული - ომი. $\frac{\text{მმ}^2}{\text{მ}}$ გამოიყენება, რადგან მავთულის განიკვეთის ფართობი მმ^2 -შია მოცემული, ხოლო სიგრძე მ-ში, ამიტომ

$$1 \text{ ომი.მ} = 10^6 \text{ მიკრომი.მ} = 10^6 \text{ ომი.} \frac{\text{მმ}^2}{\text{მ}}$$

ლითონთა ელექტრონული თეორიის თანახმად კუთრი წინაღობა (ρ) დამოკიდებულია ლითონში ელექტრონის ეფექტურ მასაზე (m^*), ელექტრონის მუხტის სიდიდეზე (q), ელექტრონის სითბური მოძრაობის საშუალო სიჩქარეზე ($\bar{V}_{\text{მა}}$), ელექტრონის კონცენტრაციაზე (n) და თავისფალი განარბენის საშუალო სიგრძეზე ($\bar{\lambda}$). ეს დამოკიდებულება შემდეგი ფორმულით გამოისახება

$$\rho = \frac{2m^*V}{q^2 n \bar{\lambda}} \quad (2-4)$$

ლითონებში და მათ შენადნობებში m^* -ის, n -ის, q -ს და $\bar{V}_{\text{მა}}$ -ის სიდიდეთა მნიშვნელობები ძლიერ არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, მაგრამ სხვადასხვა გამტარებში ρ -ს სიდიდეები საკმაოდ განსხვავებულია, რაც $\bar{\lambda}$ -ს სიდიდის სხვადასხვაობითაა გამოწვეული. კერძოდ, სუფთა ლითონებში, სადაც სტრუქტურა დამახინჯებული არ არის, კვანძებს შორის მანძილი შედარებით

დიდია, ვიდრე შენადნობებში, ამიტომ $\bar{\lambda}$ -ს სიდიდე უფრო მეტი იქნება. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ თანახმად (2-4) ფორმულისა სუფთა ლითონების კუთრი წინაღობის სიდიდე გაცილებით ნაკლებია ვიდრე შენადნობებისა.

როგორც ავღნიშნეთ $\bar{\lambda}$ სიდიდეს ძირითადად ორი ფაქტორი განსაზღვრავს. პირველი და მნიშვნელოვანი ელექტრონის ტრაექტორიის შეცვლა კვანძებთან ურთიერთქმედებისას, რადგან ეს ურთიერთქმედება ტემპერატურაზეა დამოკიდებული, ამიტომ კუთრი წინაღობის შესაბამისი მდგენელიც ρ_T დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ხოლო მეორე – ელექტრონის ურთიერთქმედება სტრუქტურულ დეფექტებთან, ტემპერატურაზე არ არის დამოკიდებული და ტემპერატურის ცვლილებისას ამ მოვლენის მიერ გამოწვეული $\rho_{\text{ნაწი}}$ -ს სიდიდე ფაქტიურად არ იცვლება. ზოგადად შეგვიძლია დაეწეროთ

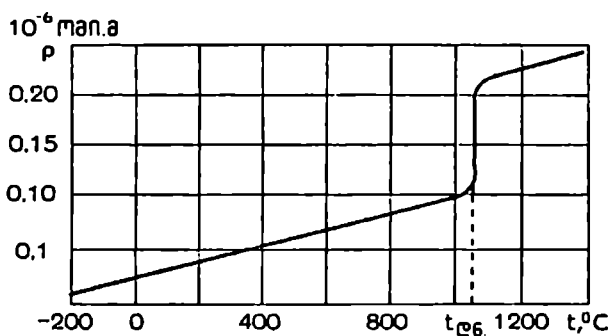
$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ნაწი}} \quad (2-5)$$

ამასთანავე $\rho_T > \rho_{\text{ნაწი}}$, ამიტომ გამტარი მასალებისათვის ρ -ს სიდიდე ტემპერატურაზეა დამოკიდებული.

როდესაც ნივთიერებები შენადნობს წარმოქმნიან მაშინ გასათვალისწინებელია ცალკეული ნივთიერებების კრისტალური სტრუქტურა, ატომების განლაგება შენადნობში და სხვა. ზოგადად ρ -ს სიდიდე შენადნობში პროცენტული შემადგენლობაზეა დამოკიდებული, მაგრამ მოსალოდნელია განსხვავებაც, კერძოდ თუ ქიმიური შენაერთი წარმოიქმნება, მაშინ ρ -ს სიდიდე ნახტომისებურად იცვლება.

§ 2.2 გამტარის მასალის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და მექანიკურ დაძაბულობაზე

გამტარის მასალის ტემპერატურის გაზრდით დენის მატარებელის კონცენტრაცია და სითბური მოძრაობის სინქარე პრაქტიკულად არ იცვლება, მაგრამ ტემპერატურის მატებით კრისტალური მესურის კვანძების რხევის ამპლიტუდა იზრდება. ამის გამო ელექტრონის კვანძებთან და მინარევებთან დაჯახების ალბათობაც მატულობს, ეს კი $\bar{\lambda}$ -ს შემცირებას იწვევს და საბოლოოდ თანახმად (2-4) ფორმულისა ρ -ს სიდიდეც მცირდება.



ნახ. 2.2. ელექტროტექნიკური სპილენძის ρ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

სუფთა ლითონებში კვანძებს შორის სივრცე უფრო დიდია ვიდრე შენადნობებში, ამიტომ სუფთა ლითონებში ტემპერატურის გაზრდით ელექტრონის კვანძებთან დაჯახების ალბათობა მეტად გაიზრდება ვიდრე შენადნობებში ე.ი. ტემპერატურის გაზრდით სუფთა ლითონებში $\bar{\lambda}$ უფრო მნიშვნელოვნად შემცირდება, ვიდრე შენადნობებში. ეს იმას ნიშნავს რომ ტემპერატურის გაზრდით სუფთა ლითონების წინააღმდეგობა მეტად იცვლება

ვიდრე შენადნობებში. ეს ცვლილება ფორმულა (2-5)-ში ρ_T მდგენელის ცვლილებითაა გამოწვეული.

რადგან სითბური რხევის ამპლიტუდის ცვლილება ტემპერატურის მიხედვით თითქმის სწორხაზოვანია, ამიტომ ρ_T და რა თქმა უნდა ρ -ც ტემპერატურის მიხედვით სწორხაზოვნად იცვლება, მაგრამ სწორხაზოვნება ირღვევა თუ ადგილი აქვს სტრუქტურულ ცვლილებას ან მასალის გადნობას. ამის საილუსტრაციოდ ნახ. ბ 2.2.-ზე მოყვანილია ელექტროტექნიკური სპილენძის ρ -ს სიდიდის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე სადაც ჩანს, რომ დნობის ტემპერატურამდე სპილენძის კუთრი წინააღმდეგობა თითქმის სწორხაზოვნად იცვლება და $\rho = f(l)$ დამოკიდებულების გრაფიკს გარკვეული კოეფიციენტი ახასიათებს. სპილენძის გადნობისას ($t_{\text{ღ}} \approx 1060^\circ\text{C}$) კუთრი წინააღმდეგობა ნახტომისებურად იზრდება, რაც მოცულობის ზრდით და ატომების ქაოსური მოძრაობის დაწყებით არის განპირობებული.

ტემპერატურის შემცირებით ფორმულა (2-5)-ის ρ_T მდგენელიც მცირდება, ხოლო ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე ზოგიერთ მასალაში ρ -ს მკვეთრად შემცირებას ანუ ზეგამტარობის მოვლენას აქვს ადგილი.

ზეგამტარობის ტემპერატურიდან დნობის ტემპერატურამდე გამტარი მასალის კუთრი წინააღმდეგობა ტემპერატურის მიხედვით თითქმის სწორხაზოვნად იცვლება, ამ ცვლილების დასახასიათებლად შემოღებულია კუთრი წინააღმდეგობის საშუალო ტემპერატურული კოეფიციენტი $\bar{\alpha}_\rho$, რომელსაც ზოგჯერ $\rho_{0,1}$ აღნიშნავენ და შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$\bar{\alpha}_\rho = \rho_{0,1} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \left[\frac{1}{\text{გრად}} \right], \quad (2-6)$$

სადაც ρ -კუთრი წინაღობის სიდიდეა საწყის ტემპერატურაზე, ხოლო ρ_0 - კუთრი წინაღობის ცვლილება ტემპერატურის θ -ით (კვლილებისას).

$\rho_{\theta, \rho}$ გკინევენებს, თუ რამდენით იცვლება ერთი ომი წინაღობის მქონე ნიმუშის წინაღობა ტემპერატურის ერთი გრადუსით (კვლილებისას).

სუფთა ლითონებისათვის, $\rho_{\theta, \rho} \approx 0,0037$ (1/გრად), ხოლო შენადნობებისათვის, თანახმად ზემოთ თქმულისა გაკვილებით ნაკლებია $\rho_{\theta, \rho} \approx (10^{-4} \div 10^{-6})$ (1/გრად).

პრაქტიკაში $\rho_{\theta, \rho}$ -ს საპონენლად საჭირო არ არის ρ -ს განსაზღვრა, არამედ (2-3) ფორმულის გათვალისწინებით:

$$\bar{\alpha}_\rho = \rho_{\theta, \rho} = \frac{1}{R} \cdot \frac{R_t - R_0}{t - t_0}, \quad (2-7)$$

სადაც R_t და R_0 ნიმუშის წინააღმდეგობებია t და t_0 ტემპერატურებზე.

ფორმულა (2-6) და (2-7)-დან გამომდინარე გამტარის კუთრი წინააღმდეგობა ρ_t ნებისმიერ ტემპერატურაზე (t) შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \bar{\alpha}_\rho (t - t_0)] \quad (2-8)$$

სადაც ρ_0 კუთრი წინააღმდეგობის მნიშვნელობა საწყის ტემპერატურაზე (t_0).

ანალოგიურად წინააღმდეგობისათვის

$$R_t = R_0 [1 + \bar{\alpha}_\rho (t - t_0)] \quad (2-8a)$$

ექსპლუატაციისას გამტარ მასალებზე გარკვეული სიდიდის მექანიკური დაძაბულობა მოქმედებს, როგორც გამჭიმავი ასევე კუმშვითი, რის შედეგადაც ρ -ს სიდიდე იცვლება, როდესაც გარეშე ზემოქმედება გამტარ მასალებში დრეკად დეფორმაციას იწვევს, მაშინ ρ -ს ცვლილება ძირითადად კვანძების რხევის ამპლიტუდის

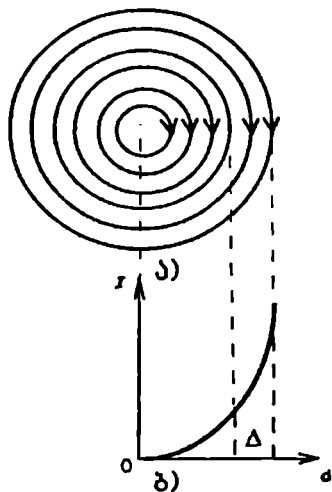
ცვლილებით არის განპირობებული. კერძოდ გამჭიმავი დრეკადი დეფორმაციისას კვანძებს შორის სივრცე იზრდება, შესაბამისად იზრდება მათი რხევის ამპლიტუდა ეს კი $\bar{\lambda}$ -ს შეამცირებას და თანახმად ფორმულა (2-4)-ისა ρ -ს სიდიდე იზრდება. მკუმშავი დრეკადი დეფორმაციისას კი ატომთშორის სივრცის შემცირების გამო, მცირდება მათი რხევის ამპლიტუდა, იზრდება $\bar{\lambda}$ და ρ -ს სიდიდეც მცირდება. თანახმად ზემოთ თქმულისა შეგვიძლია დავწეროთ

$$\rho = \rho_0(\pm N\sigma), \quad (2-9)$$

სადაც ρ_0 გამტარის კუთრის წინააღმდეგობაა მექანიკურ ზემოქმედებამდე (σ), ხოლო ρ კუთრი წინააღმდეგობის მნიშვნელობა ზემოქმედების შემდეგ. N მოცემული გამტარი მასალის მაქსიათებელი კოეფიციენტი. ნიშანი პლიუსი გამოყენება გამჭიმავი, ხოლო მინუსი შემკუმშავი დრეკადი დეფორმაციისას.

§ 2.3 ზედაპირული და სიახლოვის ეფექტები გამტარში

ელექტროგამტარობის მოვლენის შესწავლისას გამტარებში კუთრი წინააღმდეგობა და შესაბამისად წინააღმდეგობის სიდიდე მუდმივი დენის საშუალებით ისაზღვრება. ასეთ წინააღმდეგობას ომურ წინააღმდეგობას უწოდებენ და R_0 -ით ან აღნიშნავენ. პრაქტიკაში გამტარი მასალები სხვადასხვა სიხშირის ელექტრული სიგნალების გადასაცემად გამოიყენება, ამ შემთხვევაში გამტარის წინააღმდეგობას ცვლადი დენის მიმართ R_L აღნიშნავენ. მისი სიდიდე თითქმის ყოველთვის აღემატება R_0 -ის მნიშვნელობას. ამის მიზეზი ზედაპირული და სიახლოვის ეფექტებია.



ნახ. 2.3. მაგნიტური ნაკადი (ა) და დენის სიმკვრივე გამტარის განიკვეთში (ბ)

გამტარში გა-
მაეალი ცვლადი დენი
გამტარის მოცულობაში
და გარეთ ცვლად მაგნი-
ტურ ნაკადს წარმოქმნის
(ნახ. 2.3.-ა), რომელიც
გამტარში თვითინდუ-
ქციის ელექტრო მამოძ-
რავებულ ძალას აღძრავს.
თანახმად ლენცის კა-
ნონისა ეს ძალა
აღმპერელი დენის მი-
მართულებას ეწი-
ნააღმდეგება. მაგნიტური
ძალწირების სიმკვრივე
მაქსიმალურია გამტარის
ცენტრში და მინიმალუ-
რია მის ზედაპირზე ე.ი.
თვითინდუქციის

ელექტრომამოძრავებელი ძალა მაქსიმალურია გამტარის
ცენტრში და მინიმალურია ზედაპირზე, შესაბამისად გამ-
ტარებლობის დენის სიდიდე ნაკლებია გამტარის შიგა
ფენებში ვიდრე ზედაპირთან (2.3.-ბ) ამ მოვლენას ზედ-
აპირულ ეფექტს ანუ სკინეფექტს უწოდებენ.

ზედაპირული ეფექტი გამტარის იმ განიკვეთის
ფართს ამცირებს, რომელშიც ცვლადი დენი გაედინება,
ამის გამო იზრდება გამტარის აქტიური წინააღმდეგობის
(R_+) სიდიდე. ამ მოვლენის დასახასიათებლად ზედ-
პირული ეფექტის კოეფიციენტი K_R შემოყავთ, რომელიც
გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ ზრდის წინააღმდეგობას ზედ-
აპირული ეფექტი მოცემულ სიხშირეზე

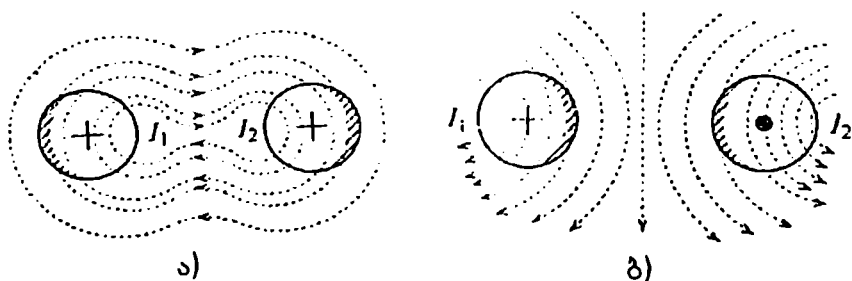
$$K_R = \frac{R_+}{R_0} \quad (2-9)$$

ზედაპირული ეფექტის მნიშვნელოვანი პარამეტრია გამტარის ის სისქე (Δ), რომელზედაც ზედაპირიდან ცენტრისაკენ დენის სიმკვრივე e -ჯერ მცირდება. ის რა თქმა უნდა დამოკიდებულია გამტარის მაგნიტურ შეღწევადობაზე (μ), გამტარებლობაზე (γ) და სიხშირეზე (f) ეს დამოკიდებულება შემდეგი ფორმულით გამოისახება

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} \quad (2-10)$$

სადაც $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰ/მ-მაგნიტური მუდმივაა.

დაბალ სიხშირეზე ($f = 40 \div 100$ ჰც) ზედაპირული ეფექტი სუსტადაა გამოსახული, მაგრამ გარკვეულწილად გასათვალისწინებელია, ხოლო მუდმივი დენის შემთხვევაში ($f = 0$) ზედაპირულ ეფექტს ადგილი არ აქვს.



ნახ. 2.4. სიახლოვის ეფექტი გამტარებში. ერთი მიმართულების (ა) და საწინააღმდეგოდ მიმართული (ბ) დენების შემთხვევაში.

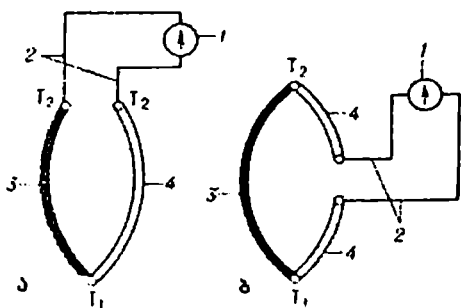
გამტარში ცვლადი დენის გავლისას წინააღმდეგობის სიდიდეზე (R_c) გარკვეულ გავლენას *სიახლოვის ეფექტი* ახდენს. კერძოდ თუ ერთმანეთთან ახლოს განლაგებულ ორ გამტარში ერთი მიმართულების ცვლადი დენი მიედინება, მაშინ გამტარების ყველაზე მეტად დაშორებულ ნაწილებს ნაკლები მაგნიტური ველი

განსჯოლავს. შესაბამისად ამ ადგილებში მეტი სიმკვრივის დენი გაივლის ვიდრე ახლოს განლაგებულ ადგილებში (ნახ. 2.4.-ა დაშტრიხული უბნები).

თუ დენის მიმართულება მეზობელ გამტარებში სხვადასხვაა (ნახ. 2.4.-ბ დაშტრიხული უბნები) მაშინ სიახლოვის ეფექტი მეზობლად განლაგებულ უბნებში გამოვლინდება. სიახლოვის ეფექტიც სიხშირეზეა დამოკიდებული და დაბალ სიხშირეზე ნაკლებად გამოვლინდება.

§ 2.4 თერმოელექტრომამოძრავებელი ძალა და თერმო წყვილები

ორი სხვადასხვა ლითონის კონტაქტისას მათ შორის კონტაქტური პოტენციალთა სხვაობა აღიძვრება, რომელიც ამ ლითონიდან ელექტრონის გამოსვლის ენერგიებს შორის სხვაობით და მათში თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაციებს შორის განსხვავებით არის განპირობებული, რაც მეტია ეს განსხვავებები მით მეტია კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობა და მისი სიდიდე რამოდენიმე ათეულ მილივოლტს არ აღემატება. მიუხედავად ამ სიმცირისა გამზომ



ნახ. 2.5. თერმოწყვილის გამზომ ხელსაწყოთან შეერთების სქემა.

და ზუსტ ხელსაწყოებში მას გარკვეული ცდომილებები შეაქვს, ამიტომ ცდილობენ ისეთი მასალები შეარჩიონ რომლებსაც სპილენძთან (სქემის მონტაჟისას ძირითადად სპილენძს იყენებენ) მკირე სიდიდის კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობა ახასიათებს.

ელექტრონების კონცენტრაციებს შორის განსხვავებით არის განპირობებული, რაც მეტია ეს განსხვავებები მით მეტია კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობა და მისი სიდიდე რამოდენიმე ათეულ მილივოლტს არ აღემატება. მიუხედავად ამ სიმცირისა გამზომ

თუ ელექტრული წრედი შეკრულია და კონტაქტში მყოფი ლითონების ორივე ბოლო ერთდამიმავე ტემპერატურაზე იმყოფება, მაშინ ჯამური პოტენციალი ნულის ტოლია. როდესაც კონტაქტში მყოფ ლითონების ბოლოებს სხვადასხვა ტემპერატურა აქვთ, მაშინ მათ შორის დამატებით თერმოელექტრომამოძრავებელი ძალა აღიძვრება, რომლის სიდიდე ბოლოებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის პროპორციულია (ზეებიკის ეფექტი). აღძრული ელექტრომამოძრავებელი ძალის (U_T) სიდიდე ტემპერატურათა სხვაობასთან პროპორციულობის კოეფიციენტით (C_T) არის დაკავშირებული, რომელიც მოცემულ გამტართა წვილისათვის მუდმივი სიდიდეა და გვჩვენებს თუ რა სიდიდის თერმოელექტრომამოძრავებელი ძალა აღიძვრება ორი გამტარის კონტაქტებზე როდესაც ბოლოებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა $1^\circ C$ -ის ტოლია. ე.ი.

$$U_T = C_T(T_1 - T_2) \quad (2-11)$$

ყველა მეტალთა წყვილისათვის (2-11) დამოკიდებულება სწორხაზოვანი არ არის, მაგრამ პრაქტიკული მიზნებისათვის ისეთ მეტალთა წყვილს ირჩევენ რომლების მახასიათებელი მრუდი სწორხაზოვანია.

თუ დავუშვებთ, რომ $T_2 = 0^\circ C$ ე.ი. გამტართა მეორე ბოლო დნობად ყინულში იმყოფება ან $T_2 = const$ ე.ი. არ იცვლება, მაშინ

$$U_T = \alpha_T \cdot T_1 \quad (2-12)$$

ეს საშუალებას გვაძლევს, რომ თუ ცნობილია α_T -ს სიდიდე, მაშინ U_T -ს გაზომვით განვსაზღვროთ T_1 ანუ იმ გარემოს ტემპერატურა სადაც გამტართა მეორე ბოლო იმყოფება. ასეთ მეთოდს არაელექტრული პარამეტრის ელექტრული გაზომვის მეთოდს უწოდებენ.

ორ იზოლირებულ გამტარს რომელთა ერთი ბოლო შედუღების ან რჩილვის საშუალებით ერთმანეთთან შეერთებულია, ხოლო მეორე ბოლოზე გამზომი ხელ-

საწყოს უერთებენ და ტემპერატურის გამზომად გამოიყენება *თერმოწყვილი ეწოდება* (ნახ. 2.5).

გამზომი ხელსაწყოს (1) სკალა (კელსიუსის გრადუსებშია დაგრადუირებული და ტემპერატურას უკონტროლებს. ის სპეციალური გამტარი მავთულით (2) თერმოწყვილის ბოლოებს უერთდება ან თერმოწყვილის ერთერთი ელემენტი გაწყვეტილი (ბ) და მის ბოლოებს უკავშირდება. ასეთი სქემა კარგად ერწყმის თანამედროვე ელექტრონულ ხელსაწყოებს და ფართოდ გამოიყენება.

თერმოწყვილებს მუშა ტემპერატურის სხვადასხვა დიაპაზონი გააჩნია, მაგალითად ოქრო-სპილენძის ან ოქრო-ქრომელის თერმოწყვილი -270°C დან $+15^{\circ}\text{C}$ -მდე ზომავს ტემპერატურას და ძირითადად დაბალტემპერატურულ სისტემებში გამოიყენება. საშუალო ტემპერატურულ ინტერვალში *სპილენძ-კონსტანტის* და *ქრომელ-კობელის* თერმოწყვილებს იყენებენ. პირველის მუშა ტემპერატურა -200°C დან $+500^{\circ}\text{C}$ -მდეა, ხოლო მეორესი კი -70°C დან $+600^{\circ}\text{C}$ -მდე. მაღალი ტემპერატურის გასაზომად *ქრომელ-ალუმენის* (-50°C დან $+1100^{\circ}\text{C}$ -მდე) და *პლატინა-პლატინაროდის* შენადნობის (-20°C დან $+1600^{\circ}\text{C}$ -მდე) თერმოწყვილი გამოიყენება.

სემოთაღნიშნული თერმოწყვილები ატმოსფერულ პირობებში ხანგრძლივად მუშაობენ, მაგრამ *ვოლფრამ-რენიუმის* თერმოწყვილი, რომლის მუშა დიაპაზონი $+20^{\circ}\text{C}$ დან $+2500^{\circ}\text{C}$ -მდეა მხოლოდ ვაკუმის ან ინერტული გარემოს პირობებში გამოიყენება.

§ 2.5 მაღალი გამტარობის გამტარი მასალები

მაღალი ელექტროგამტარობის მქონე მასალებს სუფთა ლითონები მიეკუთვნება, რომელთა კუთრი წინაღობის სიდიდე ნორმალურ პირობებში 10^{-8} ომი.მ-დან

10^{-7} ომი.მ-მდე იცვლება (ცხრ. 2-1). მათ სპილენძი, ალუმინი, რკინა, ვერცხლი, ოქრო და სხვა.

ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამტარებად პირველ სამს იყენებენ. ისინი ელექტროგადაამცემი ხაზების, კაბელების, დენგამტარი ძარღვების, ელექტროგაყვანილობის, სამონტაჟო და შესაერთებელი მავთულების, ტრანსფორმატორების, ელექტრული მანქანებისა და აპარატების გრაფილების და სხვა ელექტროტექნიკური ნაკეთობების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

მაღალი გამტარობის ყველა მასალა დიდი სისუფთავით გამოირჩევა, ან შეიცავს ისეთ მინარეებს, რომლებიც გავლენას არ ახდენენ მის კუთრ წინაღობაზე. ასეთ გამტარ მასალებს ელექტროტექნიკურს უწოდებენ.

ა) სპილენძი

სპილენძი მიუხედავად სიძვირისა (ძვირია ალუმინზე და რკინაზე) ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში ფართოდ გამოიყენება, რადგან სხვა გამტარ მასალებთან შედარებით მთელი რიგი უპირატესობები გააჩნია.

1. ყველა მეტალზე ნაკლები კუთრი წინააღმდეგობის (გარდა ვერცხლისა) მნიშვნელობა (ცხრ. 2-1);
2. მაღალი მექანიკური თვისებები;
3. კოროზიის მიმართ ატმოსფერულ პირობებში შედარებით მეტი მდგრადობა;
4. მექანიკურად კარგი დასამუშავებელია, რაც მცირე კვეთის მქონე მავთულის დამზადების საშუალებას იძლევა;
5. ადვილად რჩილვის და შედუღების უნარი;

ტექნიკური სპილენძი სპილენძის სულფიდური ნაერთების გადამუშავებით მიიღება, რის შემდეგ ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამოსაყენებელი სპილენძი ელექტროლიტურ გაწმენდას განიცდის. ამ სახით მიღებულ სპილენძს კათოდურს უწოდებენ. ის მცირე რაოდენობით მინარეებს შეიცავს და მისი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე ნორმალურ პირობებში $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-6}$ ომი.მ-ის ტოლია.

ლითონთა ზოგიერთი ელექტრული მახასიათებლები
ცხრ. 2-1

მეტალები	დნობის ტემპ- პერატურა $^{\circ}\text{C}$	კუთრი წინაღ- ობა ρ 20°C - ზე 10^{-6} ომი-მ	α_{ρ} $10^{-4} \frac{1}{\text{გრ}}$
ვერცხლი	961	0,016	40
სპილენძი	1083	0,017	43
ოქრო	1063	0,024	38
ალუმინი	657	0,028	42
ბერილიუმი	1284	0,040	60
მაგნიუმი	651	0,045	42
ნატრიუმი	98	0,046	50
ვოლფრამი	3380	0,055	46
მolibდენი	260	0,057	46
ცინკი	420	0,059	-
კობალტი	1492	0,063	60
კალიუმი	64	0,069	58
ნიკელი	1455	0,073	65
კადმიუმი	321	0,076	42
ინდიუმი	156	0,090	47
რკინა	1535	0,098	60
პლატინა	1773	0,105	-
პალადიუმი	1554	0,110	-
კალა	232	0,120	44
ტანტალი	2850	0,135	38
ნიობიუმი	2410	0,140	30
თორიუმი	1850	0,180	23
ქრომი	1851	0,210	-
ცეზიუმი	700	0,210	48
ტყვია	327	0,210	37
ტიტანი	1725	0,480	33
ვერცხლის წყალი	-39	0,958	9

სუფთა სპილენძის კუთრი წინაღობის სიდიდე 20°C ტემპერატურაზე ($\rho = 0,017241 \cdot 10^{-6}$ ომი.მ) და მისი შესაბამისი გამტარებლობა ($\gamma = 58$ მიკროსიმენსი/მ), წინააღმდეგობის და გამტარობის სტანდარტულ ერთეულადაა მიღებული და ასეთ სპილენძს სტანდარტულ სპილენძს უწოდებენ.

სადენების დასამზადებლად გამოყენებული სპილენძის მარკებია $M1$ და $M0$. $M1$ მარკის სპილენძი 99,9% სპილენძს და 0,1% მინარევებს შეიცავს. ამ მარკის სპილენძში ჟანგბადის რაოდენობა 0,08%-ზე ნაკლებია, რადგან ჟანგბადი სპილენძთან დიდი წინაღობის მქონე შენაერთს CuO -ს წარმოქმნის, რომელიც კუთრ წინააღმდეგობას ადიდებს.

საუკეთესო მექანიკური და ელექტრული თვისებებით $M0$ მარკის სპილენძი გამოირჩევა, რომელშიც მინარევების რაოდენობა 0,05%-ზე, ხოლო ჟანგბადის კი-0,02%-ზე ნაკლებია. ასეთი სპილენძისაგან სხვადასხვა დიამეტრის მავთულები მზადდება, რომელთა ზედაპირი საიზოლაციო მინანქრის ფენით არის დაფარული. ისინი ელექტრული მანქანების და აპარატების გრაგნილების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

ცივად ადიდვით მიღებულ სპილენძს სალ სპილენძს უწოდებენ. ის მაღალი მექანიკური თვისებებით გამოირჩევა. ამის გამო ელექტრო საკონტაქტო ხაზების (ელმავლის, ტრამვაის, ტროლეიბუსის), მძლავრი ელექტრული ძრავების და სხვათა ნაკეთობათა დასამზადებლად გამოიყენება.

თუ სპილენძს ჟანგბადის გარეშე $200-400^{\circ}\text{C}$ -ზე გავახურებით და შემდეგ გავაცივებით, მივიღებთ ე.წ. რბილ სპილენძს, რომელიც დაბალი მექანიკური თვისებებით და დიდი პლასტიკურობით ხასიათდება. ასეთი სპილენძი ძირითადად კაბელების, სამონტაჟო მავთულების და სხვა ნაკეთობათა დასამზადებლად გამოიყენება.

მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების მიზნით სპილენძის კალასთან, კადმიუმთან, ბერილიუმთან, ქრომთან და სხვა ლითონებთან შეადნობენ. შენადნობების კუთრი წინააღობა შედარებით მეტია და მათ ბრინჯაოს უწოდებენ. ბრინჯაოები მაღალი მექანიკური თვისებებით და კარგი ელექტროგამტარობით ხასიათდებიან. ისინი დიდი მექანიკური დაძაბულობის მქონე ელექტროგამტარი დეტალების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

პლასტიკურობის და კორუზიისადმი მედეგობის გაზრდის მიზნით სპილენძს ცინკთან შეადნობენ (30-40%). მიღებულ შენადნობს თითბერს უწოდებენ. მისი ელექტრული თვისებები თითქმის იგივეა რაც სპილენძის, ღირებულება კი შედარებით ნაკლები.

ბ) ალუმინი

ალუმინი ყველაზე ფართოდ გაერცელებული ელექტროგამტარი მასალაა. ის 3,5-ჯერ მსუბუქია ვიდრე სპილენძი. მისი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე ნორმალურ პირობებში $\rho = 0,028 \cdot 10^{-6}$ ომი.მ-ის ტოლია (ცხრ. 3-1). რაც სპილენძის კუთრ წინააღმდეგობის სიდიდეს 1,63-ჯერ აღემატება. ამის გამო სპილენძის გამტარის ალუმინის გამტარით შეცვლისას, თუ სიგრძე და წინააღმდეგობის სიდიდე უცვლელია. აუცვლებელია განიკვეთის ფართობის 2,65-ჯერ გაზრდა.

ალუმინის კუთრი სითბოტევადობა და დნობის სითბო გაცილებით მეტია ვიდრე სპილენძის, ამიტომ მიუხედავად დნობის ნაკლები ტემპერატურისა 1 გრ ალუმინის გადნობას უფრო მეტი ენერგია სჭირდება ვიდრე სპილენძის,

ალუმინი ნაკლებად დეფიციტურია და მისი მიღების ტექნოლოგია შედარებით მარტივია, მაგრამ ალუმინის მავთულის იზოლაციით დაფარვა გაცილებით რთულია ვიდრე სპილენძისა და უმტესწილად პოლიმერული მასალით ფარავენ.

ჰაერზე ალუმინის ხედაპირი აქტიურად იჟანგება და ალუმინის ჟანგის (Al_2O_3) თხელი ფენით იფარება,

რომელიც შემდგომში დაუანგვის პროცესს უშლის ხელს, მაგრამ ელექტრული კონტაქტის შექმნისას გარდამავალ წინააღმდეგობას წარმოშობს.

სპილენძთან შედარებით ალუმინი მექანიკურად ნაკლებად მტკიცეა და კალის საშუალებით არ ირნილება.

მინარეები ალუმინის ელექტრულ თვისებებზე დიდი გავლენას ახდენენ, ამიტომ ელექტროტექნიკურ მწრეწველობაში გამოყენებულ ალუმინს დიდი სისუფთავე მოეთხოვება. მას ელექტროტექნიკურ ალუმინს უწოდებენ და ტექნიკური ალუმინის ელექტროლიტური გაწმენდით მიიღება. ასეთი ალუმინის მარკებია: A999, რომელშიც მინარეების რაოდენობა 0,001%-ს არ აღემატება და A995, მინარეების მაქსიმალური რაოდენობით 0,01%. ამ მარკის ალუმინი მიკროსქემების და კონდენსატორის ელექტროდების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

შედარებით ნაკლები სისუფთავის მქონე ალუმინის მარკებია A97 და A95, რომლებიც 0,03%-ზე ნაკლები რაოდენობის მინარეებს შეიცავენ და კონდენსატორების კორპუსების, ელექტრომაგნიტური ეკრანების, რადიოსიხშირული კაბელების, კონსტრუქციული ელემენტების და სხვათა დასამზადებლად გამოიყენებიან.

მაღალი ელექტროგამტარობა და მექანიკური თვისებები მოეთხოვება ელექტროგადამცემი ხაზების და ძალოვანი კაბელების დასამზადებლად გამოყენებულ ალუმინს, რაც სპეციალური თერმო და მექანიკური დამუშავებით მიიღწევა. ამ სახის ალუმინის მარკებია A75K, A8K, A8KY, მათში მინიმუმამდეა შემცირებული იმ მინარეების რაოდენობა, რომლებშიც საგრძნობ გავლენას ალუმინის კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდეზე ახდენენ (ტიტანი, ვოლფრამი, ქრომი, მარგანეცი). ალუმინი აგრეთვე ბიმეტალური გამტარი მავთულების დასამზადებლად გამოიყენება.

გ) რკინა

რკინა ყოველთვის შეიცავს ნახშირბადს. როდესაც ნახშირბადის შემცველობა რკინაში 0,05%-ზე ნაკლებია,

მაშინ მას ტექნიკურ რკინას უწოდებენ, ხოლო თუ ნახშირბადის რაოდენობა 0,05%-დან 1,35%-მდე იკვლება, მაშინ ფოლადი მიიღება. განსხვავებით სპილენძისა და ალუმინისგან ელექტროტექნიკური მრეწველობაში გამოყენებული რკინა მინარეების დიდი შემცველობით ხასიათდება.

რკინა წარმოადგენს ყველაზე იაფ და მაღალი მექანიკური თვისებების მქონე მასალას, მაგრამ სუფთა რკინას შედარებით დიდი კუთრი წინააღმდეგობა ($\rho = 0,097 \cdot 10^{-6}$ ომი.მ) გააჩნია ვიდრე ალუმინს (ცხრ. 3-1), ხოლო ფოლადის კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე კიდევ უფრო მეტია.

ცვლადი დენის შემთხვევაში რკინაში საგრძნობია ზედაპირისა და სიახლოვის ეფექტები, ამის გამო რკინის წინააღმდეგობა ცვლად დენზე მეტია ვიდრე მუდმივზე. ამასთანავე ცვლად დენზე რკინის მაგნიტური თვისებების გამო თავს იჩენს დანაკარგები ჰისტერეზისზე (იხილეთ მაგნიტური მასალები). ამიტომ გამტარ მასალად რკინის გამოყენება შეზღუდულია, მაგრამ ზოგიერთ შემთხვევაში ტექნიკურადაც და ეკონომიურადაც გამართლებულია. ამ შემთხვევაში მცირე ნახშირბადიან (0,1-0,15%) ფოლადს იყენებენ, რომლის ზედაპირი ატმოსფეროზე აქტიურად იქანება. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად რკინის მავთულებს ცინკის თხელი ფენით ფარავენ.

რკინა ძირითადად გამოიყენება მცირე სიმძლავრეების გადასაცემად, ფოლად ალუმინიანი გამტარების, ბიმეტალური მასალების, ელექტროტექნიკური და ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების კორპუსების დასამზადებლად. აგრეთვე როგორც გამტარ მასალად რკინას იყენებენ რკინიგზის, ტრამვაის და მეტროს ხაზებში, სადაც რკინის რელსი მეორე ელექტროდს წარმოადგენს. რკინა შეუცვლელია დიდი წინააღმდეგობის მქონე გამტარი მასალების (ნიქრომი) დასამზადებლად.

§ 2.6 სხვადასხვა დანიშნულების გამტარი მასალები

მასალის პრაქტიკაში გამოყენებას მისი რომელიმე თვისება განსაზღვრავს, მაგალითად ძნელად დნობადობა, მდგრადობა ატმოსფერულ ან აგრესიულ გარემოში და სხვა. ამიტომ მათი კლასიფიკაციაც ამ თვისებების მიხედვით ხდება.

ა) *ძნელად დნობად* გამტარ მასალებს ის ლითონები მიეკუთვნებიან, რომელთა დნობის ტემპერატურა 1700°C -ს აღემატება (ცხრ. 2-1). როგორც წესი ისინი ატმოსფეროს გარემოში დაბალ ტემპერატურაზე მდგრადები არიან, მაგრამ მაღალ ტემპერატურაზე ჟანგეულებს წარმოქმნიან, ამის გამო ისინი ინერტულ გარემოში (ა'სოტი, არგონი, ვაკუმი) გამოიყენებიან.

ვოლფრამს (W) მეტალებს შორის ყველაზე დიდი დნობის ტემპერატურა გააჩნია ($t_{\text{დნ}}=3388^{\circ}\text{C}$). ძნელად დასამუშავებელია. ძირითადად გამოიყენება ელექტროსხივურ ხელსაწყოებში და რენტგენის მილაკების კათოდების და ვარვარების ნათურების დასამზადებლად. დიდ დენებზე მომუშავე კონტაქტების ზედაპირების დასაფარავად და მაღალტემპერატურული კომპოზიციური გამტარი მასალების მისაღებად.

მოლიბდენი (Mo) – თვისებებით ვოლფრამს უახლოვდება, მაგრამ ორჯერ მსუბუქია, ადვილად მუშავდება და ძნელად დნობად მასალებს შორის ყველაზე მცირე კუთრი წინააღმდეგობა აქვს. ის ელექტრო ვაკუუმურ ხელსაწყოებში კონსტრუქციული და სითბოგადამტანი დეტალების დასამზადებლად, მაღალსიხშირული და დიდი სიმძლავრის კონტაქტების ზედაპირების დასაფარავად გამოიყენება.

ძნელად დნობად ლითონებს აგრეთვე, რენიუმი (Re), ტანტალი (Ta), ტიტანი (Ti), ნიობიუმი (Nb), ცირკონიუმი (Zr) და ჰაფნიუმი (Hf) მიეკუთვნება.

ბ) ძვირფასი ლითონების გამოყენება ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში მაღალი ღირებულების გამო შესლულდულია, მაგრამ განსაკუთრებული თვისებების გამო ისინი ზოგჯერ შეუცვლელი არიან. ამ თვისებებიდან მნიშვნელოვანია, მდგრადობა აგრესიული გარემოს და ელექტრული რკალის შემოქმედებაზე. ამ სახის მასალებისგან აღსანიშნავია:

ვერცხლი (Ag) – გააჩნია ყველაზე მცირე სიდიდის კუთრი წინააღმდეგობა $\rho=0,016$ მკომ.მ (ცხრ. 2-1), პლასტიკურია, ადვილად მუშავდება, მაგრამ სხვა ძვირფას ლითონებთან შედარებით ქიმიურად ნაკლებად მდგრადია. გამოიყენება სუსტ დენებზე მომუშავე საკონტაქტო ზედაპირების დასაფარავად, გამზომი ხელსაწყოების, კონდენსატორების, ტალღგამტარების, მისარჩილი მასალების და სხვათა დასამზადებლად.

ოქრო Au – მდგრადია აგრესიული გარემოს მიმართ, პლასტიკურია, მისი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე აღუმიწისა და სპილენძის კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდეებს შორის არის მოთავსებული ($\rho=0,024 \cdot 10^{-6}$ ომი.მ). გამოიყენება ზუსტი და ინფორმაციული კონტაქტების დასამზადებლად, ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების ელექტროდების ზედაპირების დასაფარავად და სხვა.

ოქროს თხელი ფენა (0,01 მკმ-ს სისქის) კარგად ატარებს ხილული სინათლის სხივს. ამ თვისების გამო ის ფართოდ გამოიყენება ფოტოელექტრული ხელსაწყოების და ელექტროვაკუმური მილაკების შუქგამტარი ელექტროდების დასამზადებლად.

ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში აგრეთვე პლატინა (Pt) და პალადიუმი (Pd) გამოიყენება.

გ) **დაბალტემპერატურულ ან კრიოგამტარ** მასალებს ის მასალები მიეკუთვნება, რომელთა წინაღობა დაბალ ტემპერატურაზე (მინუს 170-210°C ე.ი. 50-100K) რამოდენიმე რიგით ნაკლებია მათ წინააღმდეგობაზე ნორმალურ პირობებში. აქ საუბარი არ არის ზეგამტარობის

მოვლენაზე არამედ თანახმად ფორმულა (2-5)-ს ტემპერატურის შემცირებით მცირდება ρ_r , ხოლო $\rho_{\text{ნაწილი}}$ კი უცვლელია და ტემპერატურის შემცირებით კუთრი წინააღმდეგობა საგრძნობლად მცირდება (100-1000-ჯერ).

ზეგამტარობისგან განსხვავებით კრიოგამტარ მასალებს გარკვეული უპირატესობა გააჩნია, რომელთაგან აღსანიშნავია: წინააღმდეგობის მდორედ გაზრდა ტემპერატურის მატებისას. შედარებით მაღალი მუშა ტემპერატურა 50-100K რაც თხევადი აზოტის ან წყალბადის ტემპერატურას შეესაბამება.

ტემპერატურის შემცირებით ყველა გამტარ მასალაში კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე მცირდება, მაგრამ ეს მოვლენა უფრო კარგად ალუმინში, სპილენძში, ვერცხლში, ოქროში, ნატრიუმში და ბერილიუმში გამოვლინდება. უკანასკნელ ორში კრიოგამტარობის ეფექტი ძლიერ გამოხატულია თხევადი წყალბადის ტემპერატურაზე (17K).

კრიოგენური გამატარი მასალები საშუალებას იძლევა ძალიან მცირე განიკვეთის ფართობის (1მმ²) მქონე სადენში მცირე დანაკარგებით დიდი სიდიდის დენი გავატაროთ და შევქმნათ დიდი სიმძლავრის ელექტრული მანქანები, ტრანსფორმატორები ძალოვანი კაბელები, ზემძლავრი მაგნიტური ველის წყაროები და სხვა.

დ) *საკონტაქტო მასალები*. ელექტროტექნიკურ მოწყობილებებში ძირითადად ორი სახის მოძრავი კონტაქტი გავრცელებული – მცოცავი და წყვეტადი. ისინი სხვადასხვა პირობებში განსხვავებულ ფუნქციონალურ დანიშნულებას ასრულებენ, მაგრამ ყველა მათგანი გარკვეულწილად მექნიკურ, ქიმიურ და ელექტრულ ცვეთას განიცდის.

მექანიკური ცვეთა საკონტაქტო ზედაპირების მოძრაობის ან ერთმანეთზე დარტყმისას მასალის გადაფხეკვასთან და დეფორმაციასთანაა დაკავშირებული.

საკონტაქტო მასალის გარემოსთან ქიმიური რეაქციის შედეგად კონტაქტის ზედაპირზე ჟანგის ან

სულფიდის თხელი ფენა წარმოიქმნება, რომელიც კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობას ზრდის. ეს პროცესი ინტესიურად ტემპერატურის გაზრდით მიმდინარეობს. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად კონტაქტებს ინერტულ გარემოში ათავსებენ.

წრედის გაწყვეტისას წარმოქმნილი ელექტრული რკალის მოქმედებით მასალის აორთქლების შედეგად საკონტაქტო ხედაპირზე ღრმულები ჩნდება და გარდამავალი წინააღმდეგობა იზრდება. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად კონტაქტების ხედაპირს ვერცხლის შენადნობით ფარავენ, ხოლო ძალიან დიდ დენებზე მომუშავე ($I=5000$ ა) კონტაქტებს ძნელად დნობადი ლითონების შენადნობებით ფარავენ, როგორებიცაა ვორფრამი-მოლიბდენი, ვოლფრამი-სპილენძი-ვერცხლი, და სხვა.

მცოცავი კონტაქტები უზრუნველყოფენ დენის გადასვლას უძრავი ნაწილიდან მოძრავ ნაწილზე. ისინი გეხვდებიან ძაბვისა და დენის რეგულატორებში, ავტოტრანსფორმატორებში, ელექტრულ მანქანებში და სხვა. მათ დასამზადებლად სპილენძის შენადნობები, ვერცხლითან, გრაფიტთან და ბრინჯაოები გამოიყენება.

§ 2.7 არამეტალური გამტარი მასალები

ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამტარებად სოფჯერ არალითონური მასალებიც გამოიყენება. მაგალითად: გრაფიტი და გრაფიტშემცველი მასალები, ჟანგეულები, კომპოზიციური მასალები, ელექტროგამტარი წებო და სხვა. ისინი სპეციალური დანიშნულებით გამოიყენებიან. მათი კუთრი წინაღობა $10^{-6} \div 10^{-5}$ ომი.მ-ია და ძლიერ დამოკიდებულია, როგორც ქიმიურ შემადგენლობაზე, ასევე გარეშე ფაქტორებზე.

გრაფიტი ნახშირბადის ერთერთი მოდიფიკაციაა. ხასიათდება დნობის მაღალი ტემპერატურით (3650°C), მდგრადია აგრესიული გარემოს მიმართ, აქვს კარგი ელექტროგამტარობა. მიიღება ნახშირწყალბადის უჟანგბადო გარემოში დაშლით. გამოიყენება ელექტრული ძრავების მუსების, დენის ქიმიური წყაროების ელექტროდების, მიკროფონების, მძლავრი პროექტორების, რეზისტორების და სხვა დეტალების დასამზადებლად. გრაფიტისაგან ამზადებენ სხვადასხვა სახის გრაფიტშემცველ დეტალებს და კომპოზიციურ მასალებს. გრაფიტის მური ფართოდ გამოიყენება ელექტროგამტარი საღებავებისა და ველის გამათანაბრებელი დამფარავების დასამზადებლად.

კონტაქტოლი - ელექტროგამტარ კომპოზიციურ წებოს წარმოადგენს. მის შემადგენლობაში შემავალი ეპოქსიდური ფისები, შემწებავის როლს ასრულებს, ხოლო დენგამტარს კი გრაფიტის ვერცხლის ან ნიკელის წვრილმარცვლოვანი ფხენილი წარმოადგენს.

კონტაქტოლი იმ დეტალების ელექტრულად შესაერთებლად გამოიყენება, რომელთა შედუღება ან რჩილვა სხვადასხვა მიზეზით შეუძლებელია.

ჟანგეულები - თითქმის ყველა მეტალის ჟანგი კარგი დიელექტრიკია, მაგრამ თუ შემადგენლობაში ჟანგბადის ნაკლებობას აქვს ადგილი, მაშინ ზოგიერთი მათგანი მაღალი გამტარობით ხასიათდება. ასეთებია კალის ორჟანგი (SnO_2), ინდიუმის ორჟანგი (In_2O_3), ტყვიის ჟანგი (Pb_2O_3) და სხვა. ისინი ძირითადად თხელფენიანი რეზისტორების დასამზადებლად და ელექტროვაკუმიური ხელსაწყოების შიდა ზედაპირების დასაფარავდ, გამოიყენებიან, რათა თავიდან აიცილონ სტატიკური მუხტის დაგროვება და სხვა.

კალისა და ინდიუმის ჟანგეულები ელექტროოპტიკური ხელსაწყოების დასამზადებლად გამოიყენებიან, რადგან მათ თხელ ფენას, როგორც კარგი ელექტროგამ-

ტარობა გააჩნია, ასევე კარგად ატარებს სინათლის სხივს ხილულ და ინფრაწითელ სპექტრში.

§ 2.8 დიდი წინააღმდეგობის გამტარი მასალები

დიდი კუთრი წინააღმდეგობის მქონე გამტარ მასალებს ძირითადად ლითონთა შენადნობები ან მათი მყარი ხსნარები მიეკუთვნებიან. მათი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე 10^{-7} ომი.მ-დან 10^{-5} ომი.მ-მდე იცვლება. ხასიათდებიან კუთრი წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტის ძალიან მცირე სიდიდით და მცირე თერმო ელექტრომომძრევებელი ძალის მნიშვნელობით. ისინი ძირითადად გამახურებელი ელემენტების, რეოსტატების, წინააღმდეგობის, თერმოწყვილებისა და სხვათა დასამზადებლად გამოიყენებიან. ამ სახის მასალებიდან აღსანიშნავია:

ა) მანგანინი - წარმოადგენს სპილენძის 85%, მაგნიუმის 12% და ნიკელის 3% შენადნობს, მისი კუთრი წინააღმდეგობა $(0,42 \div 0,48)10^{-6}$ ომი.მ-ია, ხოლო $\rho_{0,1} = (6 \div 50)10^{-6}$ V/გრად. ძირითადად გამოიყენება ეტალონური პრეციზიული და მაღალი ძაბვის რეზისტორების დასამზადებლად.

ელექტრული პარამეტრების სტაბილურობის მიზნით, მანგანინს 10-12 საათით ვაკუუმში, 600°C -ზე დამუშავებას უტარებენ, რის შემდეგ ელექტრული პარამეტრები ხანგრძლივი დროის განმავლობაში არ იცვლება. ატმოსფერულ გარემოში 60°C -ზე მეტ ტემპერატურაზე მისი ზედაპირი ინტენსიურად იჟანგება, ამიტომ მანგანინის მავთულს მინანქარით ფარავენ ან ინერტულ გარემოში იყენებენ. ამ პირობებში მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა 200°C -ს არ აღემატება.

ბ) კონსტანტანი - წარმოადგენს სპილენძის (Cu) - 58,5%, ნიკელის (Ni) - 40% და მაგნიუმის (Mn) - 1,5 % მყარ ხსნარს. მისი კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე მსგავსად მანგანინის კუთრი წინააღმდეგობისა და-

მოკიდებულია თერმოდამუშავების რეჟიმზე და მცირე დიაპაზონში იცვლება $\rho = (0,48-0,52)10^{-6}$ ომი.მ. კონსტანტანის კუთრი წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი სხვა გამტარი მასალებისგან განსხვავებით უარყოფითი მნიშვნელობისაა $\rho_{ტ.} = -(15 \div 25)10^{-6}$ 1/გრად. ე.ი. ტემპერატურის გაზრდით მისი წინააღმდეგობა მცირდება. ეს მოვლენა მანგანიტან ერთად თერმოსტაბილური, პრეციზიული წინააღმდეგობების დასამზადებლად გამოიყენება.

ატმოსფერულ გარემოში კონსტანტანის ხანგრძლივად მუშაობის ტემპერატურა 500°C -ია, მაგრამ 900°C -მდე გაცხელებისას მისი ზედაპირი ელექტროსაიზოლაციო თვისების მქონე ჟანგეულის თხელი ფენით იფარება, რაც საშუალებას იძლევა ხვიათაშორისი იზოლაციის გარეშე კონსტანტანი რეზისტორების, რეოსტატების და გამასურებელი ელემენტების დასამზადებლად გამოვიყენოთ. მიუხედავად სიძვირისა კონსტანტანი პოტენციომეტრების, შუნტების და რკალჩამქრობი რეზისტორების დასამზადებლად გამოიყენება.

კონსტანტანის სპილენძთან კონტაქტი თერმოელექტრომამოძრავებელ ძალას წარმოშობს. ამის გამო შეუძლებელია კონსტანტანიანი რეზისტორის გამზომ ხელსაწყოებში გამოყენება. მაგრამ ეს მოვლენა სპილენძ-კონსტანტინის და რკინა-კონსტანტანის თერმოწყვილების დასამზადებლად სასარგებლო.

გ) *გამახურებელი ელემენტების* დასამზადებლად გამოყენებულ შენადნობებს შემდეგი თვისებები მოეთხოვება: კუთრი წინააღმდეგობის შედარებით დიდი მნიშვნელობა, ატმოსფეროს პირობებში მაღალ ტემპერატურაზე ($t > 1000^{\circ}\text{C}$), ხანგრძლივად მუშაობა, ტექნოლოგიურობა და მცირე მექანიკური დაძაბულობა. ყოველივე ამ მოთხოვნებს ნიკელისა და ქრომის (Ni-Cr) მყარი ხსნარები და ნიკელ-ქრომ-რკინის (Ni-Cr-Fe) შენადნობები აკმაყოფილებს, მათ ნიქრომებსაც უწოდებენ (კხრ. 2-2).

ნიქრომებს ღირებულების შემცირების და მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების მიზნით რკინას უმატებენ, მაგრამ რკინა მუშა ტემპერატურას ამცირებს. თუ რკინის შემცველობა რამოდენიმე პროცენტს აღემატება, მაშინ შენადნობს *ფერონიქრომს* უწოდებენ. ნიკელის შედარებით იაფი ალუმინით შეცვლისას მუშა ტემპერატურა და ელექტრული თვისებები თითქმის არ იცვლება, მიღებული მყარი ხსნარი კი *ფექრალების* სახითაა ცნობილი.

ჰაერზე ნიქრომების გაცხელებისას ზედაპირზე ჟანგულის თხელი ფენა წარმოიქმნება, რომელიც ჟანგაბადის მოცულობაში შედწევას და შემდგომ დაჟანგვას ეწინააღმდეგება. ამასთანავე ხვიებს შორის კარგ ელექტრულ იზოლიაციას ქმნის, მაგრამ რკინის შემცველობის გაზრდით ჟანგულის ფენის მთლიანობა ირღვევა და ჟანგაბადი მოცულობაშიც აღწევს, მიმდინარეობს აქტიური დაჟანგვა, რის გამოც მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა მცირდება.

გამახურებელი ელემენტების იმ მაქსიმალურ ტემპერატურას, რომელზედაც ატმოსფერულ პირობებში ის ხანგრძლივად ინარჩუნებს საექსპლუატაციო თვისებებს გამახურებელი ელემენტის *მაქსიმალურ მუშა* ტემპერატურას უწოდებენ.

ნიქრომების თვისებები

ცხრ. 2-2.

მარკა	შემაღბინლობა %-ში							კუთრი წი- ნააღმ ეობა 10 ⁶ ოში.გ	მასი- მალური მუშა ტემპერა ტურა °C
	Cr	Ni	Mn	Al	C	Si	Fe		
X15I160	15-18	55-61	1,5	-	-	-	19-28	1,1-1,2	1000
X20I180	20-23	75-78	1,5	-	-	-	0-3	1,0-1,1	1000
X13I04	12-15	-	0,7	3,5-5,5	0,2	1,2	70-80	1,26	750
IX17I05	16-19	-	0,7	4-6	0,2	1,0	65-80	1,3	850
0X25I05	23-27	-	0,7	4,5-6,5	0,06	-	65-70	1,4	1400

ნიქრომებისგან დამზადებული გამახურებელი ელემენტის მუშაობის ხანგრძლივობა რამოდენიმეჯერ შეიძლება გაიზარდოს თუ მის ზედაპირზე ჟანგბადის მოხვედრას შეეზღუდავთ. ამისათვის გამახურებელ ელემენტებს მეტალის სპეციალურ მიღში ათავსებენ, რომლის შიგა ზედაპირი კარგი სითბოგამტარობის მქონე ელექტროსაიზოლაციო მასალით არის დაფარული. ასეთ ნაკეთობებს *მილისებურ გამახურებელ ელემენტებს* უწოდებენ.

ნიქრომები ძირითადად მავთულიანი რეზისტორების, პოტენციომეტრების, ცვლადი წინააღმდეგობების, სხვადასხვა სახის და სიმძლავრის გამახურებელი ელემენტების, შუნტების, დენის შემზღუდავების და სხვა ნაკეთობების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

§ 2.9 პლაზმა

ტემპერატურის გაზრდით ატომების და ელექტრონების კინეტიკური ენერგია იზრდება, როდესაც ნივთიერებაში ელექტრონების საშუალო კინეტიკური ენერგია ატომის იონიზაციის ენერგიას აღემატება. $W_j > W_{ion}$ მაშინ ელექტრონები მასიურად ტოვებენ ატომს ე.ი. ადგილი აქვს ატომების ინტენსიურ იონიზაციას. ნივთიერების ასეთ მდგომარეობას *პლაზმას* უწოდებენ. (ბერძ. Plasma – ფორმირებული, გამოძერწილი).

ამგავარად პლაზმა ნაწილობრივ ან მთლიანად იონიზირებულ აირს წარმოადგენს, რომელშიც ელექტრონების და იონების რაოდენობა თანაბარია ე.ი. პლაზმა ელექტრულად ნეიტრალურია. ნაწილაკებს შორის იმდენად ძლიერია ურთიერთქმედება (კულონის ძალები), რომ ნაწილაკის გამოყოფით ნეიტრალურობის დარღვევა პრაქტიკულად შეუძლებელია. სამყაროში პლაზმის სახით გაცილებით მეტი ნივთიერებაა ვიდრე ჩვეულებრივ მდგო-

მარეობაში, ამიტომ პლაზმას ზოგჯერ ნივთიერების მქოთხე აგრეგატულ მდგომარეობასაც უწოდებენ.

პლაზმა სამყაროში ნივთიერების ყველაზე გავრცელებული მდგომარეობაა. დედამიწის მაგნიტო და იონოსფეროში ნივთიერებები პლაზმურ მდგომარეობაში იმყოფებიან. სამყაროში ვარსკვლავებს შორის სივრცე გაიშვიათებული პლაზმით არის შევსებული. პლაზმის ინტენსიური წარმოქმნა მზეზე და სამყაროს თითქმის ყველა ვარსკვლავზე მიმდინარეობს. ბუნებაში პლაზმა ატმოსფეროში ელექტრული განმუხტვისას წარმოიქმნება

პლაზმას პრაქტიკული მნიშვნელობაც აქვს, კერძოდ პლაზმა გამოიყენება ელექტრორკალურ, აირგანმუხტვად, პლაზმურ-იონურ, აირის ლაზერებში, თერმომისიურ და სხვა ხელსაწყოებში. მაღატემპერატურული პლაზმის საშუალებით შესაძლებელია მართვადი თერმობირთვული რეაქციის განხორციელება, რაც ენერჯის კოლოსალურ წყაროს წარმოადგენს.

პლაზმის ნაწილაკების ურთიერთქმედება კულონის მიზიდვის და ერთსახელა მუხტების განზიდვის ძალებითაა განპირობებული. პლაზმა მაღალი ელექტროგამტარობით გამოირჩევა, რადგან ელ. ველის მოქმედებით თითქმის ყველა დამუხტული ნაწილაკი ველის გასწვრივ მოძრაობს.

პლაზმაზე ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის მოქმედებით ელექტრონები და იონები ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით სპირალურ ორბიტაზე მოძრაობენ. ამისგამო პლაზმიდან მაგნიტური ველი გამოიდევენება ე.ი. პლაზმა მაგნიტურ ველში დიამაგნიტურ თვისებებს ავლენს. არაერთგვაროვან მაგნიტურ ველში კი პლაზმას ნაწილაკები ძლიერი ველიდან სუსტი ველი-საკენ გაიდვენებიან.

პლაზმის იონიზაციის ხარისხი და შესაბამისად თვისებებიც ძლიერ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე, ამიტომ მიზანშეწონილია პლაზმის ტემპერატურის მიხედვით დაყოფა, კერძოდ თუ პლაზმაში ნაწილაკების საშუ-

ალო ტემპერატურა 50000K-ზე ნაკლებია მაშინ პლაზმას დაბალ ტემპერატურულს უწოდებენ, ხოლო მაღალტემპერატურული პლაზმის ტემპერატურა 50000 K-ს აღემატება.

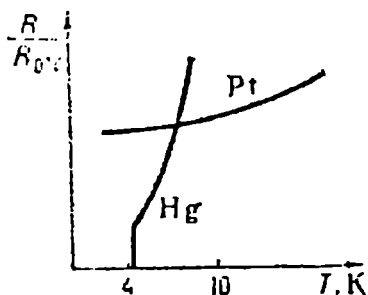
გარკვეულწილად ლითონებიც პლაზმად შეგვიძლია განვიხილოთ, მაგრამ იმ განსხვავებით, რომ თუ პლაზმაში ელექტრონები და იონები ერთდროულად ქაოსურ მოძრაობას ასრულებენ, ლითონებში მხოლოდ ელექტრონები არიან თბურ ქაოსურ მოძრაობაში, ხოლო იონები კი კრისტალის კვანძებში იმყოფებიან. ამ მდგომარეობას მყარ სხეულში არსებულ პლაზმას უწოდებენ.

პლაზმის სიმკვრივე (n) ანუ იონიზირებული ნაწილაკების რიცხვი 1სმ^3 მოცულობაში დიდ დიაპაზონში იცვლება: მაგალითად ვარსკვლავთ შორის პლაზმის შემთხვევაში $n \sim 10^{-6}$, მზის ქარში (მზის აქტიურობა) $n \sim 10$, ხოლო მყარი სხეულების პლაზმაში $n \sim 10^{22}$. ვარსკვლავების ცენტრში n -ის სიდიდე სავარაუდოდ გაცილებით მეტია.

§ 2.10 ზეგამტარობა

კრიოგენური გამტარი მასალების შესწავლისას ავლნიშნეთ, რომ ფორმულა (2-5)-ში შემავალი ρ_T სიდიდე ტემპერატურის შემცირებით მცირდება, ხოლო $\rho_{\text{ნაწი.}}$ რომელიც ელექტრონის სტრუქტურულ დეფექტებთან ურთიერთქმედებითაა განპირობებული თითქმის უცვლელი იყო, მაგრამ ტემპერატურის შემდგომი შემცირებით კელვინის ნულთან მიახლოებისას ელექტრონის სტრუქტურულ დეფექტებთან ურთიერთქმედება სუსტდება, რის შედეგადაც $\rho_{\text{ნაწი.}}$ სწრაფად იკლებს, ამის გამო წინააღმდეგობა ნახტომისებურად მცირდება (ნახ. 2.6.) ე.ი. გამტარობა უსასრულოდ დიდია, ამ მოვლენას *ზეგამტარ-*

ობის მოვლენას, ხოლო ნივთიერებას *ზეგამტარს* უწოდებენ. ზეგამტარობა ნივთიერების მდგომარეობაა რომელიც ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე გამოვლინდება. ის პირველად 1911წელს ნიდერლანდელმა ფიზიკოსმა ხ.კამერლინგ-ონენსმა დაბალ ტემპერატურაზე ვერცხლისწყლის ელექტრული თვისებების შესწავლისას აღმოაჩინა.



ნახ. 2.6. პლატინის და ვერცხლისწყლის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ზეგამტარობის მოვლენა აღმოჩენილია, როგორც სუფთა ლითონებში ასევე ქიმიურ შენაერთებში და შენადნობებში. ისინი ნორმალურ პირობებში შეიძლება იყვნენ, როგორც დენის კარგი გამტარები, ასევე დიელექტრიკები ან ნახევრად გამტარები.

ზეგამტარული მასალების საერთო რაოდენობა დღეისათვის ათასამდეა, რომელთა უმეტესობა შენადნობები ან ნაერთებია, ხოლო სუფთა ელემენტების რიცხვი 29-ს აღწევს (ცხრ. 2-3).

იმ ტემპერატურას რომელზედაც ნივთიერებაში თავს ზეგამტარობის მოვლენა იჩენს *ზეგამტარობის კრიტიკულ ტემპერატურას* (T_c) უწოდებენ. თუ ნივთიერების ტემპერატურა (T) ნაკლებია კრიტიკულ ტემპერატურაზე ($T < T_c$), მაშინ ნივთიერება ზეგამტარულ მდგომარეობაში იმყოფება, მაგრამ ტემპერატურის გაზრდით

($T > T_c$) ნივთიერება ზეგამტარული მდგომარეობიდან ჩვეულებრივ მდგომარეობაში გადადის და პირიქით.

ზოგიერთი ნივთიერების ზეგამტარობის ტემპერატურა

(ცხრ. 2-3)

ნივთიერების დასახელება	ზეგამტარობის ტემპერატურა	
	°C	K
ალუმინი Al	-271,8	1,2
ვერცხლისწყალი Hg	-268,8	4,2
ტყვია Pb	-265,8	7,2
კალა Sn	-269,3	3,7
ნიობიუმი Nb	263,6	9,4
ვანადიუმის გალიდი GaV	-259	14
ნიობიუმის დარიშხანატი NsAs	-255	18
$La_{2-x}S_{2x}CuO_4$	-196	77
$YBa_2Cu_3O_7$	-173	100

თუ ზეგამტარულ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერების რგოლში რაიმე საშუალებით ელექტრულ დენს ავლძრავთ, მაშინ ეს დენი ზეგამტარში ხანგრძლივი დროის განმავლობაში უცვლელად იტრიალებს, მისი სიდიდე ძალიან მცირედით შემცირდება, რადგან $R \sim 0$. რამოდენიმე წლის შემდეგ დენის სიდიდის შემცირებით შეგვიძლია ზეგამტარის R და შესაბამისად ზეგამტარულ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერების კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდე განვსაზღვროთ. აღმოჩნდა, რომ $\rho = 10^{-18}$ ომი.მ-ის ტოლია, რაც 10^{10} -ჯერ ნაკლებია საუკეთესო გამტარის წინააღმდეგობის სიდიდეზე ნორმალურ პირობებში.

ზეგამტარ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერებები დიამაგნიტურ თვისებებს ავლენენ ე.ი. ზეგამტარებიდან მაგნიტური ველი გამოიდევენება, მაგრამ გარკვეული სიდიდის გადაჭარბების შემდეგ მაგნიტური ველის მო-

ქმედებას ზეგამტარი ჩვეულებრივი გამტარობის მდგომარეობაში გადაჰყავს ე.ი. ძლიერი მაგნიტური ველი ზეგამტარულ მდგომარეობას არღვევს.

ზეგამტარის მაგნიტურ თვისებებთან მჭიდროდ დაკავშირებულია დენის გავლის მექანიზმი, კერძოდ დენი ზეგამტარის ზედაპირთან მყოფ თხელ ფენაში გაედინება, დენის გადამატანის როლში კი ისეთი ნაწილაკი გვევლინება, რომლის მუხტი ელექტრონის გაორმაგებული მუხტის ($2e$) ტოლია და სპინი არ გააჩნია. ასეთი ნაწილაკი შეიძლება იყოს მხოლოდ საწინააღმდეგო სპინების მქონე ელექტრონთა წყვილი. ელექტრონთა ამ წყვილს *კუპერის წყვილებს* უწოდებენ. ისინი ელექტრონებისა და კრისტალური მესერის ურთიერთქმედების შედეგად დაბალ ტემპერატურაზე წარმოიქმნებიან და თითქოს “ზედენად” მდგომარეობაში მესერთან დაჯახების გარეშე მოძრობენ, ამის გამო წინააღმდეგობა ნულის ტოლია.

ზეგამტარები გამოიყენებიან მცირე მასისა და მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტის მქონე მძლავრი ელექტრული მანქანების, ტრანსფორმატორების, დიდი სიმძლავრეების კაბელების, ენერჯის დამგროვების, ძლიერი მაგნიტური ღინზების, მძლავრი ინდუქციური კოჭების, მახსოვრების ელემენტების და სხვათა დასამზადებლად. ზეგამტარებისაგან დამზადებული ელექტრომაგნიტური ხვიები საშუალებას გვაძლევს შეექმნათ ზემადალი დაძაბულობის მაგნიტური ველი.

ზეგამტარების შესწავლა და გამოყენება თანამედროვე ტექნიკის აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს.

ზეგამტარების გამოყენებას სირთულეებიც გააჩნია, კერძოდ ზეგამტარობის მისაღწევად საჭიროა მასალის ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე (-269°C ანუ 4K) თხევადი ჰელიუმის საშუალებით გაცივება. ეს კი ძვირად ღირებულია, მაგრამ 1986 წელს შესაძლებელი გახდა $\text{La}_{2-x}\text{S}_{2x}\text{CuO}_4$ -ს ზეგამტარულ მდგომარეობაში გადაყვანა თხევადი აზოტის ტემპერატურაზე (-196°C) მოგვიანებით კი

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -ში ზეგამტარობა უკვე -173°C -ზე აღმოაჩინეს. ასეთ მასალებს მაღალტემპერატურული ზეგამტარები უწოდეს, ისინი საშუალებას იძლევიან გაკვილებით ადვილად შეექმნათ ზეგამტარული ხელსაწყოები.

მაღალტემპერატურული ზეგამტარული მასალები, რომლებიც ლითონთა ჟანგეულებს წარმოადგენენ მარტივი - კერამიკული ტექნოლოგიით მიიღებიან.

დიელექტრიკები

§ 3.1 დიელექტრიკების კლასიფიკაცია და მახასიათებელი სიდიდეები

დიელექტრიკები ეწოდება მასალებს, რომელშიც გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით ადგილი აქვს პოლარიზაციის მოვლენას ან მათში ელექტროსტატიკური ველის არსებობას. დიელექტრიკები შეიძლება იყოს როგორც ორგანული, ისე არა ორგანული წარმოშობის და იმყოფებოდნენ აირად, თხევად ან მყარ მდგომარეობაში.

დიელექტრიკები კუთრი წინააღმდეგობის დიდი მნიშვნელობით ხასიათდებიან, ამიტომ მათ ელექტრული იზოლაციის შესაქმნელად იყენებენ. ე.ი. ელექტრულად განამხოლოებენ სხვადასხვა ელექტრული პოტენციალის მქონე დენგამტარებს. ასეთ დიელექტრიკებს პასიურს უწოდებენ. მათი თვისებების მართვა გარეშე ზემოქმედებით არ ხდება.

აქტიური ეწოდება იმ დიელექტრიკებს, რომელთა თვისებები გარეშე ზემოქმედებით შეიძლება შეეცვალოს. ეს ზემოქმედება დიელექტრიკების მიერ ფუნქციონალური დანიშნულების შესასრულებლად გამოიყენება. გარე ზემოქმედების როლში შეიძლება იყოს: სხვადასხვა სახის ელექტრული ან მაგნიტური ველი, ტემპერატურა, სინათლე, მექანიკური რხევები, მაიონიზირებელი გამოსხივება და სხვა.

სხვადასხვა პირობებში ერთი და იგივე დიელექტრიკული მასალა შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც აქტიურ, ასევე პასიურ დიელექტრიკად, ან კონდენსატორების დასამზადებლად, მაგალითად: ქარსი, ფთოროპლასტი, კერამიკა და სხვა.

დიელექტრიკებს ძირითადად ოთხი ელექტრული პარამეტრი ახასიათებს. ამ პარამეტრების სიდიდე

სტანდარტითაა განსაზღვრული და მასალის პასპორტშია მითითებული. იქვე მითითებულია ზოგიერთი მნიშვნელოვანი არაელექტრული პარამეტრიც.

დიელექტრიკების ძირითადი ელექტრული პარამეტრებია:

1. *ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა* - ϵ_r , რომელიც ნებისმიერი დიელექტრიკისათვის ერთს აღემატება და რამდენიმე ათეულ ათასამდეა ე.ი. $1 < \epsilon_r < 25000$

2. *დიელექტრიკის კუთრი წინაღობა* - ρ , რომლის სიდიდე 10^8 ომი.მ-დან 10^{16} ომი.მ-მდე იცვლება. თითქმის ყოველთვის სასურველია, რომ ეს სიდიდე რაც შეიძლება დიდი იყოს.

3. *დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხის ტანგენსი* - $\text{tg}\delta$, რომელიც დიელექტრიკში ელექტრული ენერჯიის ფანტვის უნარს ახასიათებს. მისი სიდიდე 10^{-1} -დან 10^{-5} -მდე იცვლება. სასურველია ეს პარამეტრი მცირე სიდიდის იყოს.

4. *დიელექტრიკის ელექტრული სიმტკიცე* - $E_{გაბ}$. ეს ელექტრული ველის ის დაძაბულობაა, რომელიც დიელექტრიკის ელექტრულ გარღვევას იწვევს და მისი მნიშვნელობა 2კვ/მმ-დან 500კვ/მმ-მდე იცვლება.

ექსპლუატაციისათვის აგრეთვე მნიშვნელოვანია დიელექტრიკის არაელექტრული თვისებებიც, რომლებიც ელექტრული პარამეტრებთან ერთად დიელექტრიკულ მასალას ახასიათებენ. ამიტომ რომ განვსაზღვროთ დიელექტრიკის გამოყენების სფერო და ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრების დამოკიდებულება გარეშე ფაქტორებზე, აუცილებელია განვიხილოთ ამ პარამეტრების განმსაზღვრელი ფიზიკური მოვლენები და მათი ურთიერთ კავშირი.

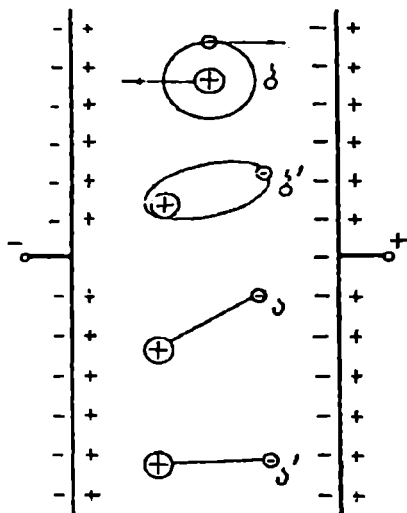
ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკში ერთდროულად ურთიერთ დაკავშირებული რამდენიმე ფიზიკური პროცესი მიმდინარეობს, როგორებიცაა დიელექტრიკის ელექტროგამტარობა და პოლარიზაცია, რომელთა დროში და სივრცეში განცალკევება შეუძლებელია.

ლია. ამ მოვლენებთან მჭიდრო კავშირშია დიელექტრიკული დანაკარგები, ხოლო ელექტრული ველის მაღალი დაძაბულობების შემთხვევაში კი დიელექტრიკის ელექტრული გარღვევა. ამ მოვლენების ურთიერთკავშირში განხილვა აღნიშნული კურსის მიზანს სცილდება და დიელექტრიკების ფიზიკას მიეკუთვნება. სიმარტივისათვის ეს პროცესები ცალ-ცალკე განვიხილოთ, მაგრამ აუცილებლობის შემთხვევაში გავითვალისწინოთ მათ შორის კავშირი.

§ 3.2 დიელექტრიკების პოლარიზაცია

დიელექტრიკის ერთ-ერთი ძირითადი თვისებაა მისი პოლარიზაცია გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით, რომელიც შემდეგში გამოიხატება: გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკში მუხტის მქონე ბმული ნაწილაკები სივრცეში მდგომარეობას იცვლიან, ამის გამო დიელექტრიკის მიკროსკოპული მოცულობა ინდუცირებულ ელექტრულ მუხტს იძენს. როდესაც დიელექტრიკზე გარეშე ელექტრული ველი არ მოქმედებს ე.ი. $E = 0$, მაშინ დიელექტრიკის მოცულობაში დიპოლები ქაოსურად არიან ორიენტირებულნი და თბურ რხევით მოძრაობას ასრულებენ. ამ შემთხვევაში მეზობელი დიპოლები ერთმანეთის მუხტს აკომპენსირებენ და ამის გამო დიელექტრიკის ზედაპირზე მუხტების დაგროვებას ადგილი არ აქვს ე.ი. $Q = 0$.

როდესაც ასეთ დიელექტრიკს ლითონის ელექტროდებს გავუკეთებთ ე.ი. შევექმნით კონდენსატორს და გარეშე ელექტრულ ველს მივაერთებთ, ($E \neq 0$) (ნახ. 3.1.), მაშინ ველის მოქმედებით დიელექტრიკში მყოფი დიპოლები (ა) ან ბმული მუხტები (ბ) ველის გასწვრივ ორიენტირდებიან ან იმგვარად გადაადგილდებიან რომ ველის მიმართულებით განლაგდნენ (ა', ბ').



ნახ. 3.1. დიპოლების (ა-ა') და
ბმული მუხტების (ბ-ბ')
პოლარიზაცია

მუხტების გადაადგილებას და დიპოლების ორიენტიაციას ელექტრული ველის ძალა იწვევს, რომლის სიდიდე ველის დაძაბულობის პროპორციულია. ე.ი. დიპოლზე ყოველთვის წყვილი ძალა მოქმედებს. ამ ძალამ უნდა შემოაბრუნოს დიპოლი თავისი გეომეტრიული ცენტრის გასწვრივ და დაძლიოს დიპოლთშორის ურთიერთქმედების ძალა, რაზეც ელექტრული ველის ენერჯიის ნაწილი იხარჯება. ეს ენერჯია დიელექტრიკში სითბოს სახით გამოიყოფა

ბმული მუხტების ან დიპოლთა ორიენტიაცია გარკვეული კანონზომიერებით ხდება, კერძოდ დადებითი მუხტი ან დიპოლის დადებითი პოლუსი გარეშე ველის წყაროს უარყოფით პოლუსთან მიერთებულ ელექტროდისაკენ ორიენტირდება, ხოლო უარყოფითი მუხტები კი პირიქით. ამის გამო დიელექტრიკის ზედაპირზე ელექტროდის მახლობელ ფენაში ადგილი აქვს მუტების

დაგროვებას, რომელებიც დენის წყაროდან მოსული საწინააღმდეგო პოლარობის, მაგრამ ტოლი სიდიდის მუხტებით კონპენსირდება. ამ პროცესის შედეგად დიელექტრიკის მუხტების ორი პილუსი გაუჩნდა.

გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკის ბმული ნაწილაკების დრეკად გადაადგილებას ან დიპოლების ორიენტაციას ველის გასწვრივ, დიელექტრიკის პოლარიზაციის მოვლენას უწოდებენ.

ბმული მუხტების გადაადგილება უფრო მცირეა, ვიდრე ატომთშორის მანძილი და ისინი პოლარიზაციისას ერთმანეთს შორის კავშირს არ კარგავენ, ხოლო დიპოლის მთლიანი შემობრუნება ველის გასწვრივ იშვიათად ხდება. მუხტების აღნიშნული გადაადგილება დიელექტრიკის ზომების უმნიშვნელო ცვლილებას იწვევს (პიესოუფექტი). ველის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ ბმული ნაწილაკები (ელექტრონები და იონები) მყისიერად, ხოლო დიპოლები კი (დიპოლთაშორის ურთიერთქმედების გამო) მდორედ უბრუნდებიან საწყის მდგომარეობას. ე.ი. პოლარიზაციის მოვლენა ქრება.

ელექტრული ველის მიმართულების შეცვლით კი ნაწილაკების გადაადგილების მიმართულება იცვლება.

დიპოლის ორიენტაციის ან ბმული ნაწილაკის გადაადგილების უნარს პოლარისებადობას უწოდებენ (α). იგი ნივთიერების აგებულებაზე და გარეშე ფაქტორებზეა დამოკიდებული. პოლარიზაციის მოვლენით კონდენსატორის შემონაფენებზე დაგროვილი მუხტების რაოდენობა (Q) მოდებული ძაბვის (U) და კონდენსატორის ტევადობასთან (C) შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული

$$Q = CU \quad (3-1)$$

Q ორი მდგენელისაგან შედგება: Q_0 - მუხტების ის რაოდენობაა, რომელიც მოცემული ზომების მქონე კონდენსატორზე დაგროვდებოდა, ელექტროდებს შორის დიელექტრიკის ნაცვლად ვაკუუმი რომ იყოს და $Q_{\text{დ}}$ -

მუხტების ის რაოდენობაა, რომელიც ელექტროდებს შორის მიხლოდ დიელექტრიკის არსებობითაა გამოწვეული.

$$Q = Q_0 + Q_{\text{გ}} \quad (3-2)$$

დიელექტრიკის მნიშვნელოვანი მახასიათებელია ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ_r) რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_{\text{გ}}}{Q_0} = 1 + \frac{Q_{\text{გ}}}{Q_0} \quad (3-3)$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ ნებისმიერი დიელექტრიკისათვის ϵ_r -ის სიდიდე ერთზე მეტია, ხოლო თუ ელექტროდებს შორის ვაკუუმია, მაშინ $\epsilon_r = 1$.

ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა ϵ_r გეიგენებს თუ რამდენჯერ მეტი მუხტის დაგროვება შეუძლია მოცემულ დიელექტრიკს ვაკუუმთან შედარებით.

ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ_r), მოლეკულების პოლარიზებადობის უნარი (α) და მოლეკულების რიცხვი მოცულობის ერთეულში (n) ერთმანეთთან კლაუსიუს-მოსოტის განტოლებით არიან დაკავშირებული:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{4\pi}{3} n\alpha \quad (3-4)$$

ϵ_r სიდიდე დამოკიდებული არაა ერთეულთა სისტემის არჩევაზე. იგი უგანზომილებო სიდიდეა, ხოლო აბსოლიტური დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ) კი შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3-5)$$

სადაც ϵ_0 მუდმივი სიდიდეა, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ფ/მ.

დიელექტრიკების პრაქტიკული გამოყენებისათვის მნიშვნელოვანია ϵ_r -ის სიდიდე, ხოლო კონდენსატორების ტევადობის საანგარიშოდ ϵ გამოიყენება და ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობა მაგალითისათვის შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$c = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}. \quad (3-6)$$

სადაც d დიელექტრიკის სისქეა, S კი ელექტროდის ფართობი სმ-ებში.

შემდგომში ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის მაგივრად სიმარტივისათვის დიელექტრიკულ შეღწევადობას გამოვიყენებთ.

ზედაპირზე დაგროვილი მუხტების სიდიდის (Q) ელექტრული ველის დაძაბულობასთან (E) დამოკიდებულების მიხედვით დიელექტიკები წრფივ და არაწრფივ დიელექტიკებად იყოფიან.

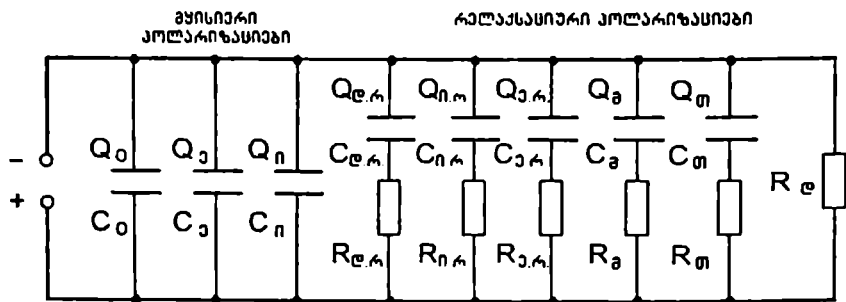
წრფივ დიელექტრიკებში ველის დაძაბულობის E გაზრდით Q -ც სწოხაზოვნად იზრდება. ასეთ დიელექტრიკებში Q და ε_r -ის სიდიდე დამოკიდებული არ არის გარეშე ველის დაძაბულობაზე, როგორც წესი ასეთი დიელექტრიკები საიზოლაციო სისტემების დასამზადებლად გამოიყენებიან. ზოგიერთი სახის დიელექტრიკებში კი E -ს გაზრდით Q -ს სიდიდე მნიშვნელოვნად იცვლება და ε_r ძლიერ არის დამოკიდებული E -ზე. ეს თვისება ძირითადად აქტიურ დიელექტრიკებს ახასიათებს.

§ 3-3 დიელექტრიკების პოლარიზაციის სახეები

როგორც აღვნიშნეთ დიელექტრიკის პოლარიზაციას ელექტრული ველის ენერჯიის გარკვეული ნაწილი ხმარდება, რაც დანაკარგების სახით დიელექტრიკში გამოიყოფა, მაგრამ არსებობს პოლარიზაციის ზოგიერთი სახე, რომლის დროსაც ენერჯიის დანაკარგებს ადგილი არ აქვს. ამიტომ მიზანშეწონილია პოლარიზაციის მექანიზმი დანაკარგებიან და უდანაკარგო პოლარიზაციად დავყოთ.

უდანაკარგოა პოლარიზაცია, რომელიც ელექტრული ველის მოქმედებით მიეწიერად ხდება და ადგილი არ აქვს ენერგიის დახარჯვას დიპოლთშორის ურთიერთქმედების დაძლევაზე, ე.ი. დიელექტრიკში ელექტრული ველის ენერგია სითბურ ენერგიად არ გარდაიქმნება. პოლარიზაციის ამ სახეს იონური და ელექტრონული პოლარიზაცია მიეკუთვნება.

პოლარიზაციას, რომლის მიმდინარეობას ენერგიის დანაკარგები ახლავს, დანაკარგებიან პოლარიზაციას უწოდებენ. ამ შემთხვევაში ელექტრული ენერგიის ნაწილი დიპოლთშორის ურთიერთქმედების დაძლევაზე იხარჯება და დიელექტრიკში სითბოს სახით გამოიყოფა. ასეთი პოლარიზაციის სახეებია: დიპოლურ-რელაქსაციური, მიგრაციული და სხვა.



ნახ. 3-2. დიელექტრიკის პოლარიზაციის ექვივალენტური სქემა

რთული აგებულების გამო დიელექტრიკებში ერთდროულად პოლარიზაციის რამოდენიმე მექანიზმი არსებობს, ამიტომ პოლარიზაციის ექვივალენტურ სქემაზე ისინი პარალელურად ჩართული ტევადობებით (C) არიან გამოხატული (ნახ. 3-2). ტევადობის სიდიდე იმდაგვარად არის შერჩეული, რომ მასზე დაგროვილი მუხტის რაოდენობა პოლარიზაციის მოცემული მექანიზმით ელექტროდებზე დაგროვილი მუხტის სიდიდის ტოლია, ხოლო ტევადობებთან მიმდევრობით ჩართულ წინააღმდე-

გობაში (R) გამოყოფილი ენერგია პოლარიზაციის მოცემული მექანიზმით დიელექტრიკში გამოყოფილი დანაკარგების ტოლია.

ექვივალენტური სქემის Q_0 და C_0 ელექტროდებს შორის ვაკუუმის შეესაბამება. ამ შემთხვევაში ენერგიის დანაკარგები ნულის ტოლია და შესაბამისად $R_0 = 0$.

ელექტრული ველის შემოქმედებაზე ყველაზე სწრაფად და ადვილად ელექტრონი ახდენს რეაგირებას. შედეგად, ადგილი აქვს ველის გასწვრივ ელექტრონის ორბიტის დრეკად წანაცვლებას, რაც მყისიერ დიპოლს წარმოქმნის და ენერგიის დანაკარგების გარეშე მიმდინარეობას. ამ მოვლენას ელექტრონულ პოლარიზაციას უწოდებენ.

ექვივალენტურ სქემაზე ელექტრონული პოლარიზაცია შესაბამისი C_p და Q_p იქნება გამოსახული, ხოლო $R_p = 0$. ამ სახის პოლარიზაციის დამყარების დრო 10^{-15} წამია, ხოლო ელექტრონის ორბიტის წანაცვლების მანძილი ძალიან მცირეა. შესაბამისად, მცირეა პოლარიზებადობა.

თანახმად (3-4) ფორმულისა, იმ ნივთიერებების დიელექტრიკული შეღწევადობის სიდიდე (ϵ_r), რომლებსაც მხოლოდ ელექტრონული პოლარიზაცია ახასიათებთ, ძალიან მცირეა და 2,5-ს არ აღემატება. ასეთებია ინერტული აირები, ტრანსფორმატორის ზეთი, პოლიეთილენი, პოლისტიროლი და სხვა ნეიტრალური დიელექტრიკები.

ყველა დიელექტრიკის ატომის აგებულებაში ელექტრონები შედის. ამიტომ ელექტრონულ პოლარიზაცია ნებისმიერ დიელექტრიკაშია და ის პოლარიზაციის უნივერსალური სახეა.

იონური პოლარიზაცია იონური აგებულების მქონე დიელექტრიკებს ახასიათებს, როგორცაა: ქარსი, კერამიკა, იონური კრისტალები და სხვა. ასეთ ნივთიერებებში გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით ადგილი აქვს კრისტალის კვანძებში მყოფი იონების დრეკად წანაცვლებას. ამ სახის პოლარიზაციის დამყარების დრო

10^{-13} წამის რიგისაა, ხოლო ϵ_r -ს სიდიდე 50-ს არ აღემატება.

ამ სახის პოლარიზაციაზე ელექტრული ველის ენერგია პრაქტიკულად არ იხარჯება და მისი მახასიათებელი სიდიდეებია Q_p და C_p , ხოლო $R_p = 0$.

დანაკარგებიანი პოლარიზაციის თითქმის ყველა მექანიზმი ელექტრული ველის მოქმედების დაწყებიდან თანდათან მყარდება, რადგან დიპოლთშორის ურთიერთქმედების ძალის დაძლევა გარკვეულ დროს მოითხოვს, ხოლო ველის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ თანდათან უბრუნდება საწყის მდგომარეობას ანუ რელაქსაციას განიცდის (უდანაკარგოსთან განსხვავებით), ამიტომ დანაკარგებიან პოლარიზაციას ზოგჯერ რელაქსაციურ-საც უწოდებენ.

დიპოლურ - რელაქსაციურ პოლარიზაციას, სიმარტივისთვის დიპოლურს, დიპოლური აგებულების დიელექტრიკებში აქვს ადგილი, გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით დიპოლები თანდათან ორიენტირდებიან ველის გასწვრივ. ორიენტაციისას დიპოლმა მეზობელ დიპოლთან ურთიერთქმედების ძალა უნდა დაძლიოს რაზეც ელექტრული ველის ენერგიის ნაწილი იხარჯება და ჩანაცვლების სქამაში $C_{დ.რ}$ და $Q_{დ.რ}$ - თან ერთად $R_{დ.რ}$ იარსებებს. დიპოლური პოლარიზაციის დამყარების დრო 10^{-8} წმ-დან 10^2 წმ-მდე იცვლება, ხოლო ϵ_r -ს სიდიდე 100-ს არ აღემატება.

დიპოლური პოლარიზაცია დიპოლურ აირებს და სითხეებს ახასიათებს, აგრეთვე გვხვდება ორგანული წარმოშობის დიპოლურ დიელექტრიკებში, როგორცაა ელექტროტექნიკური ქაღალდი, გეტინაქსი და სხვა. ასეთ ნივთიერებებში ველის გასწვრივ მთლიანი მოლეკულის ნაცვლად პოლარული რადიკალი ორიენტირდება.

იონურ - რელაქსაციურ პოლარიზაციას ადგილი აქვს იონური აგებულების იმ დიელექტრიკებში, რომლებსაც კრისტალურ მესერში იონების არამჭიდრო განლაგება გააჩნია. ელექტრული ველის

მოქმედებით სუსტად ბმული იონი თანდათანობით დაძლევეს იონთშორის ურთიერთქმედების ძალებს და ველის გასწვრივ გადაადგილდება, ხოლო ველის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ საწყის მდგომარეობას უბრუნდება. ექვივალენტურ სქემასზე იონურ რელაქსაციური პოლარიზაცია $Q_{ი.რ.}$, $C_{ი.რ.}$ და $R_{ი.რ.}$ არის წარმოდგენილი. იონურ-რელაქსაციური პოლარიზაციის მქონე ნივთიერებების ტიპური წარმომადგენელია ელექტრო ტექნიკური მინა, კერამიკა და სხვა.

განსხვავებით ელექტრონული პოლარიზაციისა ელექტრონულ - რელაქსაციური პოლარიზაცია ($Q_{ე.რ.}$, $C_{ე.რ.}$, $R_{ე.რ.}$) იმ დიელექტრიკებში არსებობს, რომლებსაც ელექტრონული გამტარობა ახასიათებს და სითბური და ელექტრული ველის მოქმედებით მათში ელექტრონების დამატებითი კონცენტრაცია წარმოიქმნება. ამ სახის პოლარიზაციას ადგილი აქვს ტიტანის, ნიობიუმის, ბისმუტის ჟანგულების შემცველ კერამიკულ დიელექტრიკებში. ისინი კერამიკული კონდენსატორების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

დაბალი სიხშირის ელექტრული ველის მოქმედებით არაერთგვაროვანი სტრუქტურის მქონე, მრავალკომპონენტიან ტექნიკურ დიელექტრიკებში მინარევები ელექტროგამტარობის დენის საშუალებით ამ კომპონენტების ფარგლებში გადაადგილდება, მაგრამ მეორე კომპონენტში ვერ ვრცელდება. ამის გამო კომპონენტების გამყოფ სახდვარზე თავს იყრის გამტარებლობის ნაწილაკებით წარმოქმნილი მუხტი ამ მოვლენას მიგრაციული პოლარიზაცია ეწოდება ($Q_{ა}$ და $C_{ა}$), და ენერჯის გარკვეულ დანაკარგები ახასიათებს ($R_{ა}$)

თავისთავად ანუ მყისიერ პოლარიზაციას ადგილი აქვს სუბნეკროდიელექტრიკებში, რომლებშიც ველის მოქმედებამდე წინასწარ პოლარიზებული უბნები - დომენები არსებობს.

ელექტრული ველის მოქმედებით დომენების პოლარიზაციის ვექტორის ორიენტაცია ველის გასწვრივ

ხდება (Q_n, C_n), რაზედაც გარკვეული სახის ენერგია იხარჯება (R_n). სეგნეტორდიელექტრიკები აქტიურ დიელექტრიკებს მიეკუთვნებიან და თავისთავადი პოლარიზაციის მიმდინარეობის მექანიზმს აქტიური დიელექტრიკების შესწავლისას განვიხილავთ.

რადგან დიელექტრიკის პოლარიზაცია მჭიდროდაა დაკავშირებული ელექტროგამტარობასთან, ამიტომ ლოგიკურია ექვივალენტური სქემის დიელექტრიკის წინააღმდეგობით დამთავრება R -დ, რომელშიც ისეთი სიმკლავრე გამოიყოფა, რაც დიელექტრიკში ელექტროგამტარობისას.

როგორც ვხედავთ ნივთიერების ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის (ϵ_r) სიდიდე პოლარიზაციის ცალკეული მექანიზმებით გამოწვეული ϵ_r - ის ჯამს წარმოადგენს.

განხილულიდან ჩანს რომ, დიელექტრიკის პოლარიზაციის პროცესი კავშირშია დიელექტრიკის სტრუქტურასთან, ტემპერატურასთან, გარეშე ელექტრული ველის სიხშირესთან და სხვა ფაქტორებთან. ამ ფაქტორების გავლენის დასადგენად ϵ_r - ის სიდიდეზე მოხერხებულია მათი მოქმედების მექანიზმი ცალკე-ცალკე განვიხილოთ.

§ 3-4 დიელექტრიკების პოლარიზაციის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

დიელექტრიკის პოლარიზაციის მოვლენა მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული, მაგრამ ϵ_r - ის სიდიდეზე მნიშვნელოვან გავლენას დიელექტრიკის ტემპერატურა ახდენს. ამის გამო ტემპერატურის მიხედვით ϵ_r - ის ცვლილების დასახასიათებლად შემოღებულია დიელექტრიკული შეღწევადობის ტემპერატურული კოეფი-

ციენტის - ტ.კ. ε_r , რომელიც გვიჩვენებს თუ რამდენით იცვლება ε_r - ის სიდიდე ტემპერატურის ერთი გრადუსის ცვლილებისას.

$$\text{ტ.კ. } \varepsilon_r = \alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \left[\frac{1}{\text{გრ}} \right]. \quad (3-7)$$

სადაც $\partial \varepsilon_r$ დიელექტრიკული შედწვეადობის ნაზრდია ტემპერატურის ∂t გაზრდისას. კონდენსატორის შემთხვევაში ეს ფორმულა შემდეგ სახეს იღებს

$$\text{ტ.კ. } \varepsilon_2 = \alpha_\varepsilon = a_\varepsilon = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{C_1 - C_0}{t - t_0} \left[\frac{1}{\text{გრ}} \right]. \quad (3-7)$$

C_0 და C_1 მოცემული დიელექტრიკისაგან დამზადებული კონდენსატორის ტევადობებია, საწყისი (t_0) და საბოლოო (t) ტემპერატურაზე.

ელექტრონული პოლარიზაციის შემთხვევაში მოლეკულების პოლარიზებადობა (α) ტემპერატურაზე დამოკიდებული არ არის, მაგრამ ტემპერატურის ცვლილება მოლეკულების რიცხვის (n) სწორხაზოვან ცვლილებას იწვევს. ამიტომ თანახმად (3-4) გამოსახულებისა ε_r -იც სწორხაზოვნად შეიცვლება.

ელექტრონული პოლარიზაციისას ტემპერატურის გაზრდით ε_r შემცირება ისეთივე კანონზომიერებით ხდება, როგორც მოლეკულების რიცხვის მოცულობის ერთეულში (n), ხოლო ეს უკანასკნელი განსაზღვრულია მოცულობის ცვლილებით, ამიტომ იმ ნივთიერებებში, რომლებშიც მხოლოდ ელექტრონული პოლარიზაცია გეხვედება ტ.კ. ε_r სიდიდით ემთხვევა ნივთიერების მოცულობის სითბო გაფართოების კოეფიციენტს ტ.კ. V -ს, მაგრამ საწინააღმდეგო ნიშნით ე.ი.

$$\text{ტ.კ. } \varepsilon_r = -\text{ტ.კ. } V \quad (3-9)$$

ნეიტრალური დიელექტრიკი ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას n და შესაბამისად ε_r ნახტომისებურად იცვლება.

თეორიული გათვლებით და ექსპერიმენტალური გამოკვლევებით დადგენილია, რომ იმ ნივთიერებებში, რომლებშიც მხოლოდ ელექტრონულ პოლარიზაციას აქვს ადგილი. ϵ_r - ის სიდიდე ნებისმიერ ტემპერატურაზე ამ ნივთიერებაში ელექტრო მაგნიტური ტალღის (სინათლის სხივის) გარდატეხის მაჩვენებლის (n_r) კვადრატს მიახლოებით უტოლდება.

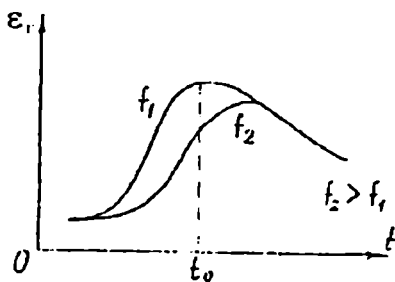
$$\epsilon_{r,i} \approx n_i^2 \quad (3-10)$$

n -ის სიდიდე არა ელექტრული მეთოდით ისაზღვრება და ასახავს მხოლოდ ელექტრონების რეაგირებას ელექტრომაგნიტური ტალღის შემოქმედებაზე (ელექტრული პოლარიზაციით), ხოლო ϵ_r - ის სიდიდე კი ელექტრული მეთოდით ისაზღვრება და მოიცავს, როგორც ელექტრონების ასევე სხვა სახის პოლარიზაციის მქონე მოლეკულების რეაგირებას ელექტრული ველის მოქმედებაზე, ამის გამო ϵ_r ყოველთვის მეტია ვიდრე n^2 . მათ შორის სხვაობა ნეიტრალური დიელექტრიკის სისუფთავის ხარისხის მაჩვენებელია და *ვერმანის კოეფიციენტს* უწოდებენ (D_v)

$$D_v = \epsilon_n - n_i^2 \quad (3-11)$$

იონური პოლარიზაციისას ტემპერატურის გაზრდით ϵ_r - ის სიდიდე იზრდება, რადგან იონთშორის ურთიერთქმედების ძალები მცირდება ე.ი. ტ.კ. ϵ_r - ის სიდიდე დადებითია.

პოლარულ დიელექტრიკებში ტემპერატურის გაზრდით n უმნიშვნელოდ იცვლება, მაგრამ ტემპერატურის ზრდის საწყის ეტაპზე დიპოლთშორის მომქმედი ძალა სუსტდება. ეს კი α -ს გაზრდას და შესაბამისად ϵ_r -ის მატებას იწვევს. ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით დიპოლის თბური ენერგია იმდენად იზრდება რომ გარეშე ველს უჭირს დიპოლის ორიენტაცია, ამის გამო α მცირდება, შესაბამისად მცირდება ϵ_r -იც. აქედან გამომდინარე დიპოლური დიელექტრიკებისათვის ϵ_r - ის ტემ-



ნახ. 3-3 დიპოლურ
დიელექტრიკებში ϵ_r -ის
დამოკიდებულება f -ზე

პერატურაზე დამოკიდებულების მრუდს რთული სახე აქვს და მაქსიმუმის წერტილი გააჩნია. (ნახ. 3-3)

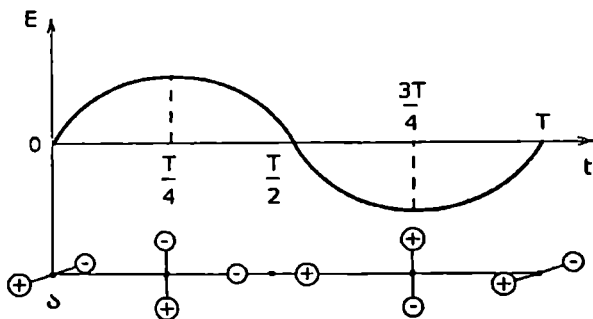
იონურ რელაქსაციური პოლარიზაციის პროცესს გარკვეულ წილად ტემპერატურა უწყობს ხელს. ამის გამო ტემპერატურის გაზრდით ϵ_r -იც იზრდება. ანალოგიურ

მოვლენას ვხედებით ელექტრონულ - რელაქსაციური პოლარიზაციისას.

მიგრაციული პოლარიზაციის შემთხვევაში, რომელსაც ადგილი აქვს ტექნიკურ მრავალ კომპონენტთან მასალებში, ϵ_r -ის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე რთული სახე აქვს და ძირითადად განპირობებულია ცალკეული კომპონენტების ϵ_r -ის და გამტარებლობის (γ) დამოკიდებულებით ტემპერატურაზე.

§ 3-5 პოლარიზაციის დამოკიდებულება ელექტრული ველის სიხშირეზე

ელექტროსაიზოლაციო სისტემებში გამოყენებული დიელექტრიკები სხვადასხვა სიხშირის გარეშე ელექტრული ველის ზემოქმედებას განიცდიან, ამის გამო მნიშვნელოვანია ϵ_r -ის დამოკიდებულების შესწავლა გარეშე ველის სიხშირეზე (f), სადაც გასათვალისწინებელია, რომ ნებისმიერი სახის პოლარიზაციის დამყარება გარკვეულ დროს (τ_0) მოითხოვს.



ნახ. 3-4. დიელექტრიკის პოლარიზაცია ცვლად ელექტრულ ველში

ეთქვათ დიპოლზე f სიხშირის სინუსოიდური ცვლადი ელექტრული ველი მოქმედებს (ნახ. 3-4). საწყის მდგომარეობაში ($t = 0$ მომენტში) დიპოლის ნებისმიერი მდგომარეობა უკავია (ა). ველის დაძაბულობის ზრდასთან ერთად დიპოლზე მოქმედი ძალის სიდიდე იზრდება და $t = \frac{T}{4}$ ის მაქსიმალურ (ამპლიტუდურ) მნიშვნელობას აღწევს. ე.ი. ამ მომენტში დიპოლი მაქსიმალურად ორიენტირებულია ველის გასწვრივ. ველის დაძაბულობის შემცირებით დიპოლს დიპოლთაშორის ურთიერთქმედების ძალები საწყის მდგომარეობაში აბრუნებენ და $t = \frac{T}{2}$ მომენტში ძალიან მცირე დროის განმავლობაში დიპოლზე გარდა დიპოლთაშორის ურთიერთქმედების ძალისა სხვა ძალა არ მოქმედებს.

მეორე ნახევარ პერიოდისას გარეშე ველის მიმართულება იცვლება შესაბამისად იცვლება დიპოლზე მოქმედი ძალის მიმართულება და $t = \frac{3}{4}T$ დიპოლი საწინააღმდეგო მხარეს მაქსიმალურად ორიენტირებულია.

ველის შემდგომი შემცირებით $t = T$ მომენტში დიპოლები ისეთივე მდგომარეობაში იმყოფებიან, როგორც $t = 0$ მომენტში ე.ი. გარეშე ელექტრული ველის სრული პერიოდის დასრულებისას დიპოლი პოლარიზაციის ერთ ციკლს ასრულებს.

ელექტრული ველის სიხშირის გაზრდით დიპოლის პოლარიზაციის სიხშირეც იზრდება, მაგრამ რაღაც კრიტიკულ f_0 - ზე მეტი სიხშირის შემთხვევაში დიპოლი ვერ ასწრებს თან აყვეს გარეშე ველის ცვლილებას და ϵ_r მცირდება. f_0 პოლარიზაციის დამყარების დროის სიდიდესთან (τ_0) შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0} \quad (3-12)$$

f_0 მნიშვნელოვანი პარამეტრია და დიელექტრიკის გამოყენების მაქსიმალურ სიხშირეს განსაზღვრავს.

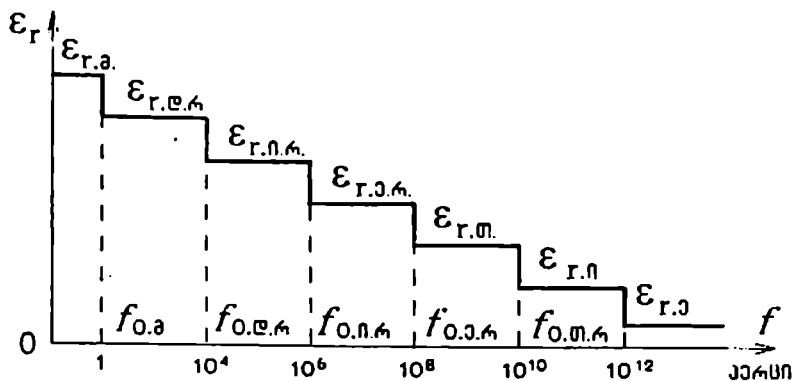
უმეტეს დიელექტრიკებში პოლარიზაციის რამოდენიმე მექანიზმი არსებობს, ამიტომ იარსებებს სხვადასხვა τ_0 და შესაბამისად f_0 - იც. ამის გამო ϵ_r - ის სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდს ზოგადად რთული სახე აქვს (ნახ. 3-5).

პოლარიზაციის სხვა მექანიზმებისაგან განსხვავებით მიგრაციული პოლარიზაციის დამყარება ($\epsilon_{r.g}$) დიდ დროს მოითხოვს შესაბამისი $f_{0.g}$ -ს სიდიდე 0,5 პერცს არ აღემატება და სამრეწველო სიხშირეზე არ გამოვლიდება.

ელექტრონულ რელაქსაციური და იონურ რელაქსაციურ პოლარიზაციის დამყარების დრო შედარებით მცირეა ($10^{-4} - 10^{-5}$ წმ). ამ სახის პოლარიზაციის შესაბამისი კრიტიკული სიხშირე $f_{0,r}$ რამოდენიმე ათეულ კილოპერცს შეადგენს.

დიპოლურ რელაქსაციური პოლარიზაციის დამყარების დრო დიდ დიაპაზონში იცვლება ($\tau = 1-10^8$ წმ),

შესაბამისად შეიცვლება $f_{იდრ}$ და ამ სახის დი-
ელექტრიკებისათვის გარეშე ელექტრული ველის მაქსი-
მალური მუშა სიხშირე 10^8 ჰერცს არ აღემატება.



ნახ. 3-5. ϵ_r -ის დამოკიდებულება სიხშირეზე

უდანაკარგო პოლარიზაციების (იონური და ელექტრონული) დამყარების დრო ძალიან მცირეა შესა-
ბამისად ფორმულა (3-12) თანახმად მათი მაქსიმალური
მუშა სიხშირე დიდ მნიშვნელობას აღწევს კერძოდ იონ-
ური პოლარიზაციისა ის 10^{13} ჰერცს აღემატება, ხოლო
ელექტრონული პოლარიზაციის - 10^{15} ჰერცის ტოლია.
ამის გამო ზემაღალ სიხშირეზე მომუშავე ელექტრული
იზოლაციის შესაქმნელად ის მასალები გამოიყენება,
რომლებსაც მხოლოდ ელექტრონული პოლარიზაცია ახ-
ასიათებთ (ნეიტრალური). ამ შემთხვევაში გამორიკხულია
დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება,
როგორც ტემპერატურაზე ასევე გარეშე ელექტრული
ველის სიხშირეზე.

§ 3-6 აირების პოლარიზაცია

აირში მოლეკულებს შორის დიდი მანძილის გამო მოცულობის ერთეულში მოლეკულების რიცხვი (n) გაცილებით ნაკლებია ვიდრე მყარ და თხევად დიელექტრიკებში, ამიტომ ფორმულა (3-4) - ში, $n\alpha$ შეგვიძლია მიახლოებით ნულის ტოლად ჩავთვალოდ ეი.

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{4\pi}{3} n\alpha \approx 0 \text{ აქედან} \quad (3-13)$$

$$\epsilon_r - 1 \approx 0 \text{ ე.ი. } \epsilon_r \approx 1 \quad (3-14)$$

ეს ნიშნავს, რომ ნორმალურ პირობებში აირების ფარდობითი დიელექტრიკული შედწევადობა (ϵ_r) მიახლოებით ერთის ტოლია და არ არის დამოკიდებული მოლეკულის აგებულებაზე.

მიუხედავად იმისა, რომ აირებში პოლარიზაციის ელექტრონული და დიპოლური მქანისებები გვხვდება დიპოლური პოლარიზაციით გამოწვეული ϵ_r იმდენად მცირეა, რომ ϵ_r - ის სიდიდეს ელექტრონული პოლარიზაცია განსაზღვრავს და დიდი სიზუსტით სრულდება (3-10) ფორმულის პირობა (ცხრილი 3-1).

აირების ϵ_r -ის მნიშვნელობები სხვადასხვა ტემპერატურაზე და წნევაზე

ცხრ. 3-1

№	აირი	n_r^2 1 ატმ. 20°C	$\epsilon_r, t = 20^\circ C$			ϵ_r 1 ატმ		
			1 ატმ	2 ატმ	4 ატმ	60°C	20°C	-60°C
1.	აერო	1,00057	1,00058	1,0108	1,0218	1,00052	1,00058	1,00081
2.	ნახშირორჟანი	1,001	1,00098	1,020	1,050	1,00071	1,00098	1,00125
3.	აზოტი	1,0006	1,0006	1,0109	1,055	-	-	-
4.	ჟელიუმი	1,000072	1,000072	-	-	-	-	-
5.	ვანგბადი	1,00054	1,00055	-	-	-	-	-

ცხრილ (3-1)-ში მოყვანილია აირების ϵ_r - ის მნიშვნელობები სხვადასხვა წნევაზე და ტემპერატურაზე. ამ ფაქტორების მოქმედება n -ს ცვლის, რის შედეგადაც

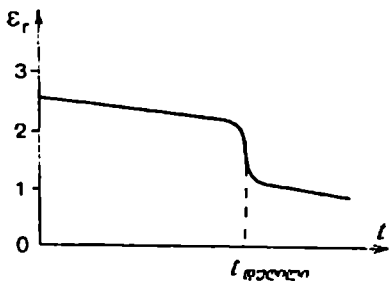
ϵ_r - ის სიდიდეც იცვლება. კერძოდ ტემპერატურის გაზრდით აირის ერთეულოვან მოცულობაში მოლეკულების რიცხვის (n) შემცირება აუცილებლად ϵ_r - ის შემცირებას იწვევს, ხოლო წნევის გადიდება, n -ის გაზრდით ϵ_r - ის სიდიდის სწორხაზოვან მატებაში გამოიხატება. ეს მოვლენა მაღალი ატმოსფერული წნევების გამსომი ხელსაწყოების შესაქმნელად გამოიყენება.

ჰაერისათვის ($t=20^{\circ}\text{C}$ და $P=1\text{ატმ.}$) წნევაზე ϵ_r - ის ტემპერატურული კოეფიციენტი $\alpha_r = -2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ - ის ტოლია, ხოლო ϵ_r - ის წნევაზე დამოკიდებულების კოეფიციენტი 0.00058ატმ^{-1} - ის ტოლია.

§ 3-7 თხევადი დიელექტრიკის პოლარიზაცია

თხევადი დიელექტრიკები შეიძლება იყოს როგორც ნეიტრალური ასევე პოლარული. მათში ადგილი აქვს ელექტრონულ ან დიპოლურ პოლარიზაციას.

თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკებში (ცხრ. 3-2)



ნახ. 3-6. თხევადი ნეიტრალური ϵ_r -ის დამოკიდებულება t -ზე

მხოლოდ ელექტრონული პოლარიზაცია გეხვდება და ϵ_r - ის მნიშვნელობა 2,5 - ს არ აღემატება და ტემპერატურის გაზრდით ϵ_r - ის სიდიდე დუდილის ტემპერატურამდე (ნახ. 3-6) სწორხაზოვნად იკლებს, ხოლო დუდილის ტემპერატურაზე ნახტომისებურად ერთამდე

მცირდება. რაც შეეხება სიხშირეს, ϵ_r -ზე მაღალ სიხშირებამდე პრაქტიკულად უცვლელია. როგორი სისუფ-

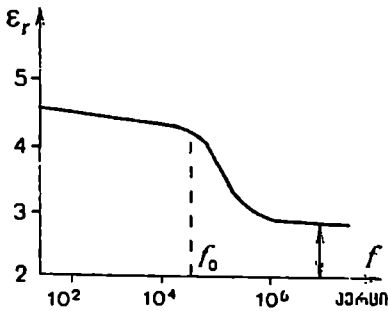
თავისავე არ უნდა იყოს თხევადი ნეიტრალური დი-
ელექტრიკი ის ყოველთვის გარკვეული რაოდენობის დი-
პოლური მოლეკულების მინარევებს შეიცავს. ეს კი
ვერმანის კოეფიციენტში აისახება და ექსპლუატაციისას
ამ კოეფიციენტის ზრდა თხევად დიელექტრიკებში მიმდინ-
არე დაძველების პროცესზე მიუთითებს.

პოლარულ სითხეებში ელექტრონულ პოლარი-
ზაციასთან ერთად დიპოლური პოლარიზაციასაც აქვს
ადგილი, რაც მეტია დიპოლების რიცხვი ან დიპოლური
მომენტის სიდიდე მით მეტია ϵ_r -ს მნიშვნელობა.

თხევადი ნეიტრალური დიელექტრიკების მახასიათებლები
ცხრ. 3-2.

№	სითხე	n^2	ϵ_r	μ_v	$\alpha_c \cdot 10^3 \cdot K^{-1}$
1.	სატრანსფორმატორ(ი) ზეთი	2,25	2,3	0,05	-0,57
2.	ბენზოლი	2,25	2,278	0,028	-0,93
3.	ტოლუოლი	2,25	2,294	0,044	-1,16

ძლიერ დიპოლური სითხეები, რომლებსაც დი-
ელექტრიკული შეღწევადობის დიდი მნიშვნელობა აქვთ
(წყალი $\epsilon_r = 81$, ეთილის
სპირტი $\epsilon_r = 33$) მაღალი
ელექტრო გამტარობის
გამო დიელექტრიკებად არ
გამოიყენებიან.



ნახ. 3-7. სოვოლის ϵ_r -ის
დამოკიდებულება სიხშირეზე

პოლარული
სითხეების ϵ_r -ის ტემ-
პერატურაზე დამოკიდე-
ბულების რთული სახე ნახ.
3-3-ის მაგალითზე იყო
განხილული.

პოლარულ
სითხეებში სიხშირის გაზ-
რდით ϵ_r -ის სიდიდე მცირდება. ამის საილუსტრაციოდ
განვიხილოთ ϵ_r -ის დამოკიდებულება სიხშირეზე

თხევადი პოლარული დიელექტრიკის - სოვოლის მაგალითზე (ნახ. 3-7).

თუ დიპოლები ასწრებენ ორიენტაციის შეცვლას გარეშე ველის (ველილებისას, მაშინ f - ის გაზრდით ϵ_r -ის სიდიდე უმნიშვნელოდ იკლებს, ხოლო როდესაც გარეშე ველის სიხშირე f_0 - კრიტიკულ სიხშირეს აღემატება, ϵ_r ნახტომისებურად მცირდება ϵ_{η} -მდე, რომელიც მხოლოდ ელექტრონული პოლარიზაციითაა განპირობებული.

თხევადი პოლარული დიელექტრიკებისათვის f_0 - ის მნიშვნელობას ძირითადად სითხის ტემპერატურა (T), დინამიური სიბლანტე (η) და მოლეკულების რადიუსი (r) განსაზღვრავს და სიბლანტის შემცირებით f_0 - იზრდება.

$$f_0 = \frac{RT}{8\pi^2 r^3 \eta} \quad (3-15)$$

პრაქტიკაში გამოყენებულ თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკებს სატრანსფორმატორო, საკაბელო და საკონდენსატორო ზეთები მიეკუთვნებიან, ხოლო პოლარულ დიელექტრიკულ სითხეებს, რომლებსაც ϵ_r -ის შედარებით დიდი მნიშვნელობა აქვთ ($3,5 \div 5$) სოვოლი, კასტორის ზეთი, სილიციუმორგანული და ფთორორგანული სითხეები წარმოადგენენ.

§ 3-8 მყარი დიელექტრიკების პოლარიზაცია

სტრუქტურული მრავალფეროვნების გამო მყარ დიელექტრიკებში პოლარიზაციის ყველა მექანიზმი არსებობს, ხოლო ϵ_r -ის მნიშვნელობა 1,5 დან რამოდენიმე ათეულ ათასამდე იცვლება და მრავალ ფაქტორებსა და მოკიდებული.

ორგანული და არაორგანული წარმოშობის მყარი ნეიტრალური დიელექტრიკებისათვის ყველა ის კანონ-ზომიერებები სრულდება, რაც ელექტრონულ პოლარიზაციას ახასიათებს. მათი მაგალითები აირების და სითხეების პოლარიზაციისას გვექონდა განხილული.

მყარი ნეიტრალური დიელექტრიკის ϵ_r -ის მნიშვნელობები 20°C -ზე

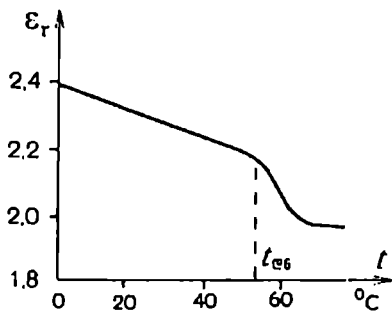
ცხრ. 3-3.

№	დასახელება	n^2	ϵ_r
1.	ალმასი	5,76	5,6-5,8
2.	გოგირდი	3,7	3,6-4,0
3.	პარაფინი	2,4	2,4-2,6
4.	პოლისტიროლი	2,06	1,9-2,2
5.	პოლიეთილენი	2,3	2,2-2,4
6.	ფთოროპლასტი	2,1	1,9-2,2

ცხრილი 3-3 - ის მონაცემებიდან ჩანს, რომ მყარი ნეიტრალური დიელექტრიკებისათვის ϵ_r -ის სიდიდე მიახლოებით n^2 - ის ტოლია და ϵ_r -ის ცვლილების დიაპაზონი მიღების ტექნოლოგიის თავისებურებით და მინარევების არსებობით არის განპირობებული. აღსანიშნავია, რომ არაორგანული წარმოშობის ნეიტრალური დი-

ელექტრიკების ϵ_r -ის სიდიდე უფრო მეტია ვიდრე ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკების.

მყარ ნეიტრალური დიელექტრიკებისათვის ϵ_r -ის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების კლასიკური მაგალითია პარაფინის ϵ_r -ის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე (ნახ. 3-8), საიდანაც ჩანს, რომ დნობის ტემპერატურამდე ϵ_r -ის



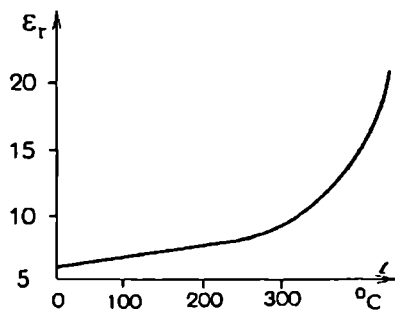
ნახ. 3-8. პარაფინის ϵ_r -ის დამოკიდებულება t -ზე

სიდიდე სწორხაზოვნად, უმნიშვნელოდ, ხოლო დნობის ტემპერატურაზე ($t = 54^{\circ}\text{C}$) კი ნახტომისებურად მცირდება.

იონური აგებულების მყარ დიელექტრიკებში, რომლებსაც იონების მჭიდრო განლაგება ახასიათებთ პოლარიზაციის ელექტრონული და იონური მექანიზმები გვხვდება, მაგრამ ϵ_r -ის სიდიდე დიდ დიაპაზონში იცვლება ($6 \div 150$) და ϵ_r -ის ტემპერატურულ კოეფიციენტს, როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი მნიშვნელობა აქვს, ხოლო იმ იონურ დიელექტრიკებში რომლებშიც იონები არამჭიდროდ არიან განლაგებული, ე.ი იონურ - რელაქსაციური პოლარიზაცია ახასიათებთ ϵ_r -ის შედარებით მცირე სიდიდისა ($4 \div 30$) და ტემპერატურის გაზრდით ϵ_r იმატებს

ნახაზ (3-9)-ზე ნაჩვენებია ელექტროტექნიკური ფაიფურის ϵ_r -ის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ თუ ტემპერატურა 200°C - აღემატება, მაშინ ϵ_r გაცილებით უფრო ძლიერ იზრდება ვიდრე $t < 200^{\circ}\text{C}$, რაც მაღალ ტემპერატურაზე დიპოლთშორის ურთიერთქმედების ძალების შესუსტებითაა გამოწვეული.

მყარ პოლარულ დიელექტრიკებში როგორებიცაა: ცელულოზა და მისი პროდუქტები, ელექტროტექნიკური ქაღალდი, პოლარული პოლიმერები და სხვა. ადგილი აქვს დიპოლურ პოლარიზაციას, რომლის დამყარება შედარებით მეტ დროს მოითხოვს ($1 \div 10^{-5}$ წმ) ვიდრე თხევად დიელექტრიკებში, ხოლო ϵ_r -ის ტემპერატურაზე და სიხ-

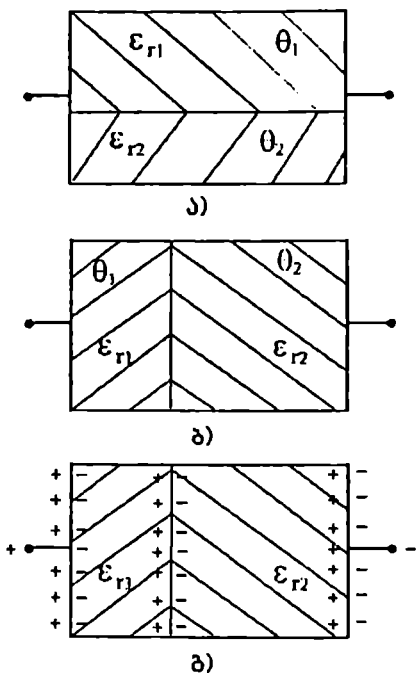


ნახ. 3-9.
ელექტროტექნიკური ფაიფურის ϵ_r -ის დამოკიდებულება t -ზე

შირეზე დამოკიდებულებას იგივე ხასიათი აქვს, როგორც თხევადი დიპოლური დიელექტრიკების შემთხვევაში.

§ 3-9 რთული აგებულების დიელექტრიკების პოლარიზაცია

აქამდე ჩვენ ვიხილავდით იმ ფიზიკურ მოვლენებს, რომლებიც მხოლოდ ერთგვაროვან დიელექტრიკებში მიმდინარეობდა, მაგრამ ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამოყენებული საიზოლაციო სისტემები, სხვადასხვა დიელექტრიკული მასალისაგან შედგება. მათ კომპოზიციურ ანუ რთული აგებულების დიელექტრიკებს უწოდებენ.



ნახ. 3-10. ორი დიელექტრიკის საიზოლაციო სისტემის პოლარიზაცია

ეთქვათ საიზოლაციო სისტემა ორი სხვადასხვა დიელექტრიკისგანაა შექმნილი. პირველი დიელექტრიკის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა $\epsilon_{r,1}$ -ით აღვნიშნოთ, ხოლო მეორესი კი $\epsilon_{r,2}$. საიზოლაციო სისტემაში მათი პროცენტული რაიოდენობა კი Θ_1 და Θ_2 -ით. რათქმა უნდა მათი ჯამი ასისტოლია $\Theta_1 + \Theta_2 = 100\%$.

დიელექტრიკები ერთმანეთის მიმართ შეიძლება მიმდევრობით ან პარალელურად იყოს განლაგებული, მაგრამ უმეტეს შემთხვევაში წარმოქმნიან მექანიკურ ნარევს. ელექტრული ველის მოქმედებით მათში პოლარიზაციის პროცესის მიმდინარეობის დასახასიათებლად ლიხტენკერას განტოლება გამოვიყენოთ, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოვთვალოთ მრავალკომპონენტებიანი სისტემის (ჩვენს შემთხვევაში ორი კომპონენტი) სხვადასხვა ფიზიკური პარამეტრი, თუ ცნობილია ცალკეული კომპონენტების რაოდენობა და საწყისი მონაცემები, რათქმა უნდა კომპონენტები ერთმანეთში ქიმიურ რეაქციაში არ შედიან.

ამ განტოლებას დიელექტრიკული შეღწევადობისთვის ზოგადად შემდეგი სახე აქვს

$$\epsilon_r^x = \Theta_1 \cdot \epsilon_{21}^x \cdot \Theta_2 \cdot \epsilon_{21}^x \quad (3-17)$$

სადაც x - ცალკეული კომპონენტების განაწილების მახასიათებელი კოეფიციენტია და იღებს მნიშვნელობებს 1,0 ან -1.

ვთქვათ, კომპონენტები ერთმანეთის მიმართ პარალელურად არიან განლაგებული (ნახ 3-10ა), მაშინ $x=1$ და (3-17) გამტოლება შემგედ სახეს მიიღებს:

$$\epsilon_r = \Theta_1 \cdot \epsilon_{21} + \Theta_2 \cdot \epsilon_{21} \quad (3-18)$$

მექანიკური ნარევის შემთხვევაში, როდესაც კომპონენტები ქაოსურად არიან განლაგებული X ნოლისაკენ მიისწრაფის და (3-17) გამოსახულების გაწარმოებით მივიღებთ

$$\ln \epsilon_r = \Theta_1 \ln \epsilon_{r1} \cdot \Theta_2 \ln \epsilon_{r2} \quad (3-19)$$

კომპონენტების ერთმანეთის მიმართ მიმდევრობით (ნახ. 3-10ბ) ჩართვის შემთხვევაში $X=-1$ და მივიღებთ

$$\frac{1}{\epsilon_r} = \frac{\Theta_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{\Theta_2}{\epsilon_{r2}} \quad (3-20)$$

გამოსახულებებს 3-18, 3-19 და 3-20 აზრი იმ შემთხვევაში აქვს, თუ $\epsilon_{21} = \epsilon_{22} < 2,5$ და ორივე დიელექტრიკში დენის მატარებელი ნაწილაკები ერთი და

იგივეა (ელექტრონული პოლარიზაცია და ელექტრო გამტარობა). წინააღმდეგ შემთხვევაში ორი დიელექტრიკის გამყოფ საზღვარზე ადგილი ექნება მოცულობითი მუხტის დაგროვებას (ნახ. 3-10გ).

მოცულობითი მუხტი ინტენსიურად იმ შემთხვევაში წარმოიქმნება, თუ კომპონენტების დენის ძირითადი მატარებლების ბუნება საგრძნობლად განსხვავდება. ამ შემთხვევაში დენის მატარებლები ერთი დიელექტრიკიდან მეორეში გაერცელებას ვერ ახერხებენ და თავს იყრიან კომპონენტების გამყოფ სასაზღვრო ფენაში, რის შედეგად მოცულობითი მუხტი წარმოიქმნება. ამ მოვლენას *მიგრაციულ პოლარიზაციას* უწოდებენ.

§ 3-10 დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა

იდეალური დიელექტრიკი ელექტრულ დენს არ ატარებს, რადგან მას დენის მატარებლების კონცენტრაცია ნულის ტოლია, მაგრამ რეალურ დიელექტრიკებში ყოველთვის არსებობს თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების მცირე რაოდენობა, რომლებიც ელექტრული ველის მოქმედებით მოწესრიგებულ მოძრაობას იწყებენ და ე.წ. *გამჭოლი გამტარობის დენს* ($I_{გაჭ.}$) წარმოქმნიან. ამ მოვლენას დიელექტრიკის *ელექტროგამტარობას* უწოდებენ.

დიელექტრიკის ერთეულოვან მოცულობაში გამავალი გამჭოლი გამტარობის დენის სიდიდე შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$I_{გაჭ.} = nqv, \quad (3-16)$$

სადაც n - თავისუფალ ნაწილაკთა რიცხვია დიელექტრიკის ერთეულოვან მოცულობაში, q - თავისუფალი ნაწილაკის მუხტია, v - მოძრაობის სიჩქარე;

დიელექტრიკების ელექტროგამტარობის სახე ძირითადად დამოკიდებულია იმ ნაწილაკებზე, რომლებიც გამჭოლ დენს განაპირობებენ. ამ მხრივ ასხვავებენ ელექტრონულ, იონურ და მოლიონურ ელექტროგამტარობას.

ელექტრონულ ელექტროგამტარობას თავისუფალი ელექტრონები განაპირობებენ და ის დამახასიათებელია მხოლოდ მყარი ნეიტრალური დიელექტრიკებისათვის, რომლებსაც მინარევები არ გააჩნიათ.

იონურ ელექტროგამტარობას თავისუფალი იონების მოძრაობა განაპირობებს. დამახასიათებელია ყველა სახის ტექნიკური დიელექტრიკებისათვის. იონები შეიძლება იყოს, როგორც მინარეული, ასევე დიელექტრიკის ატომებისაგან წარმოქმნილი.

მოლიონურ ელექტროგამტარობას მუხტის მქონე მოლეკულათა ჯგუფების – მოლიონების მოძრაობა განაპირობებს და დამახასიათებელია თხევადი არაერთგვაროვანი დიელექტრიკებისათვის (სუსპენზიები, ემულსიები).

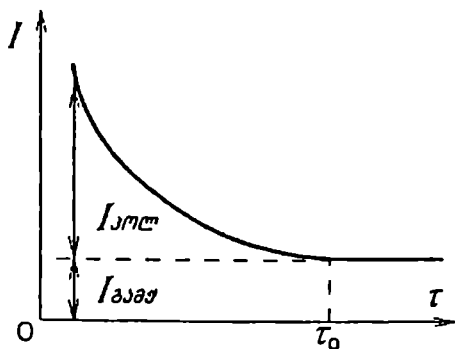
ელექტროგამტარობასთან ერთად დიელექტრიკში ველის მოქმედებით ადგილი აქვს პოლარიზაციის მოვლენას, რაც ძალიან მცირე მანძილზე, მცირე დროის განმავლობაში მუხტის მქონე ნაწილაკების მოწესრიგებულ გადაადგილებაში გამოიხატება. ე.ი. პოლარიზაციის პროცესს თან ახლავს მცირე დროის განმავლობაში პოლარიზაციის მოვლენით განპირობებული დენი ($I_{პოლ.}$).

პოლარიზაციის, ანუ ტევადური დენი დამოკიდებულია დიელექტრიკზე მოქმედი ძაბვის სახეზე. ცვლადი ძაბვის შემოქმედებისას პოლარიზაციის მოვლენა უწყვეტად მიმდინარეობს, ამიტომ ეს დენიც უწყვეტია ე.ი. ცვლადი ძაბვის მოქმედებისას დიელექტრიკში გამავალი დენი ორი დენის ჯამს წარმოადგენს:

$$I = I_{გამჭ.} + I_{პოლ.} \quad (3-21)$$

ცვლადი ძაბვის შემთხვევაში ხელსაწყოს საშუალებით პოლარიზაციის და გამჭოლი გამტარობის დენე-

ბის განცალკავება შეუძლებელია, ამიტომ ცვლად ძაბვაზე დიელექტრიკის წინააღმდეგობა არ ისაზღვრება.



ნახ. 3-11. დიელექტრიკებში გამაგალი დენის დამოკიდებულება დროზე

მუდმივი ძაბვის მოქმედებისას დიელექტრიკის პოლარიზაციის მოვლენას ადგილი აქვს ძაბვის მოდების და მისი მოხსნის მომენტებში, ამიტომ ძაბვის მოდებიდან გარკვეული დროის გავლის შემდეგ პოლარიზაციული დენი მიიღევა და დიელექტრიკში გაივლის მხოლოდ გამჭოლი გამტარობის დენი. ეს

კარგად ჩანს ნახ. 3-11-ზე მოცემულ გრაფიკზე. ამ მოვლენას დიელექტრიკში დენის *აბსორბციას* (ლათ. *absorbition*-მიღევა) უწოდებენ.

ზემოთგანხილულის თანახმად, დიელექტრიკზე მუდმივი ძაბვის ზემოქმედებისას, პოლარიზაციის დამყარების შემდეგ მასში გამაგალი დენი

$$I = I_{\text{გააგ}} \quad (3-22)$$

აქედან გამომდინარე დიელექტრიკების ელექტროგამტარობის მოვლენის შესწავლა და მისი მახასიათებელი სიდიდეების დადგენა უნდა მოხდეს დიელექტრიკზე მუდმივი ძაბვის მოქმედებით პოლარიზაციის პროცესის დამყარების შემდეგ ($\tau = 50 \div 60$ წმ), მაშინ თანახმად ომის კანონისა დიელექტრიკის ნიმუშის წინააღმდეგობა იქნება

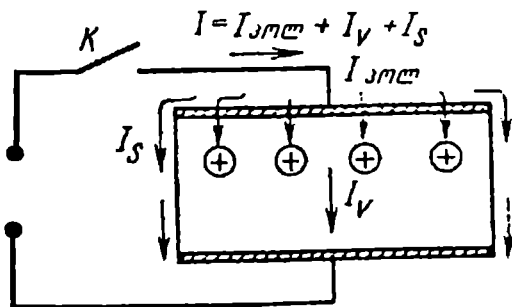
$$R = \frac{U}{I_{\text{გააგ}}} \quad (3-23)$$

დიელექტრიკის ელექტროგამტარობის მოვლენის შეფასებას კუთრი გამტარობის სიდიდით ახდენენ:

$$\gamma = \frac{I_{\text{გაგ.}}}{E} = \frac{nqv}{E} = nqu \quad [\text{V/ომი.მ}] \quad (3-24)$$

სადაც E ელექტრული ველის დაძაბულობაა.

გამოსახულების $u = V/E$ - თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების ძერადობას უწოდებენ. ეს ნაწილაკები დიელექტრიკში მინარევეების ან სუსტად ბმული ატომებისაგან წარმოიქმნებიან.



ნახ. 3-12. ელექტრული დენი დიელექტრიკში (I_V) და ზედაპირზე (I_S).

ტექნიკური დიელექტრიკების ელექტროგამტარობაში მინარევეების როლი იმდენად დიდია, რომ ისინი მოლიანად განსაზღვრავენ ელექტროგამტარობის ბუნებას და სიდიდეს.

ელექტრონული ელექტროგამტარობის შემთხვევაში მუდმივი ძაბვის ხანგრძლივი მოქმედებისას დიელექტრიკში ნიუთიერების გადატანას ადგილი არ აქვს, ე.ი. დროის მიხედვით დენის სიდიდე და წინააღმდეგობა უცვლელია, მაგრამ იონური ელექტროგამტარობისას იონები ელექტროდებზე განეიტრალებიან და გამოიყოფიან. ამ შემთხვევაში თუ წინააღმდეგობის სიდიდე იზრდება, მაშინ ელექტროგამტარობა მინარეული იონებითაა განპირობებული.

როდესაც წინააღმდეგობის სიდიდე მუდმივ ტემპერატურაზე დროის მიხედვით მცირდება მაშინ

ელექტროგამტარობას სტრუქტურიდან მოწყვეტილი იონები განაპირობებენ, რაც დიელექტრიკის ქიმიურ დაშლას – დაძველებას იწვევს და საბოლოოდ ადგილი აქვს დიელექტრიკის გარღვევას.

მყარ დიელექტრიკებში ზედაპირის მდგომარეობის გამო (ნახ. 3-12), ზედაპირზე უფრო მეტი დენი (I_s) გაედინება, ვიდრე მოცულობაში (I_v). ამიტომ შემოაქვთ კუთრი მოცულობითი (ρ_v) და კუთრი ზედაპირული წინაღობის (ρ_s) ცნება.

კუთრი მოცულობითი წინააღმდეგობა დიელექტრიკის მოცულობიდან წარმოსახვით ამოჭრილი იმ კუბის წინააღმდეგობაა რომლის წიბოები l -ის ტოლია და დენი ორ პარალელურ გვერდს შორის გაედინება. რადგან პრაქტიკაში ასეთი კუბის დამზადება ძნელია, ამიტომ ρ_v შემდეგი ფორმულით იანგარიშება:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} , \quad (3-25)$$

სადაც R_v – ნიმუშის მოცულობითი წინააღობაა ომებში, S – ელექტროდის ფართია m^2 -ში, ხოლო h – დიელექტრიკის სისქეა m -ში,

კუთრი ზედაპირული წინააღმდეგობა (ρ_s) ეს ის წინააღმდეგობაა, რომელიც ექნება დიელექტრიკის ზედაპირზე პირობითად გამოყოფილი l მ ზომების მქონე კვადრატს ორ პარალელურ გვერდს შორის და შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

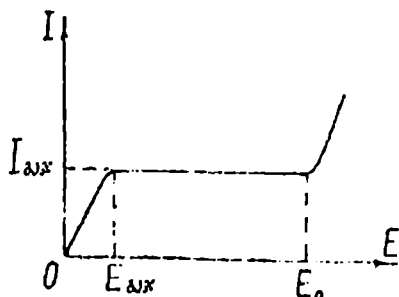
$$\rho_s = R_s \frac{l}{h} , \quad (3-26)$$

სადაც R_s – ზედაპირული წინააღმდეგობაა ომებში; h – ელექტროდებს შორის მანძილი და l – ელექტროდების სიგრძეა m -ში.

§ 3-11 აირადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა

ნებისმიერი აირის მოცულობაში ყოველთვის არსებობს დადებითი და უარყოფითი მუხტის მქონე ნაწილაკების ძირითადად თავისუფალი იონების ძალიან მცირე რაოდენობა, რომელთა არსებობა გარეშე მაიონიზირებული ფაქტორებითაა განპირობებული (ულტრაიისფერი სხივები, კოსმოსური გამოსხივება, მიწის რადიაცია და სხვა). ეს ნაწილაკები დროის ნებისმიერ მომენტში წარმოიქმნიან და ურთიერთშეხვედრისას რეკომბინაციას განიცდიან, ე.ი. ნეიტრალური მოლეკულა წარმოიქმნება. ამიტომ მათი რიცხვი არ იზრდება. თუ ასეთ აირზე ელექტრული ველი იმოქმედებს მაშინ მასში გაივლის მცირე სიდიდის გამჭოლი გამტარობის დენი $I_{გამჭ.} = 10^{-16}$ ა/მ², რომელიც აირის არათავისთავად გამტარებლობას განაპირობებს.

დავუშვათ, რომ აირზე მოქმედი ელექტრული ველის დაძაბულობა ძალიან მცირეა, მაშინ ველის მოქმედებით თავისუფალი ნაწილაკები მოძრაობას იწყებენ და ძაბვის გაზრდით



ნახ. 3-13. აირში დენის დამოკიდებულება ძაბვაზე

დენიც იზრდება (ნახ. 3-13). ე.ი. სრულდება ომის კანონი. ეს მანამ გაგრძელდება სანამ აირში არსებული ყველა თავისუფალი ნაწილაკი მონაწილეობას არ მიიღებს გამჭოლი დენის შექმნაში, რის შემდეგ დაძაბულობის გაზრდით დენის სიდიდე არ იზრდება, რადგან უცვლელი გარეშე ფაქტორებით მეტი ნაწილაკები არ წარმოიქმნება, ხოლო შინაგანი ფაქტორები კი ველის მცირე დაძაბულობის გამო დენის მატარებელ ახალ ნაწილაკებს ვერ წარმოქმნიან. ე.ი.

რდება, რადგან უცვლელი გარეშე ფაქტორებით მეტი ნაწილაკები არ წარმოიქმნება, ხოლო შინაგანი ფაქტორები კი ველის მცირე დაძაბულობის გამო დენის მატარებელ ახალ ნაწილაკებს ვერ წარმოქმნიან. ე.ი.

გვაქვს ეგრეთწოდებული *გაჯერების* მოვლენა, რომელსაც შეესაბამება I_g და E_g . გაჯერების დენის და შესაბამისად ველი დაძაბულობის სიდიდე ძალიან მცირეა და ელექტროდებს შორის 10მმ მანძილის შემთხვევაში

$$E_{\text{გაჯ.}} = 0,6 \frac{\text{მ}}{\text{გ}}, \text{ ხოლო } i_{\text{გა}} = 10^{-15} \frac{\text{ა}}{\text{გ}^2} \text{ ე.ი. გარეშე ველის}$$

მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში აირები იდეალური დი-ელექტრიკებს წარმოადგენენ.

როდესაც დიელექტრიკზე მომქმედი ელექტრული ველის დაძაბულობა E_0 - ს სიდიდეს გადააჭარბებს, მაშინ მკვეთრად იზრდება თავისუფალი ნაწილაკების ენერგია, რაც მათი ნეიტრალურ მოლეკულებთან შეჯახებისას ამ უკანასკნელის დაშლას - ე.წ. თავისთავად იონიზაციას განაპირობებს, ე.ი. დენის დამატებითი მატარებლები წარმოიქმნება და შესაბამისად დენიც იზრდება. ასეთ გამტარობას თავისთავად გამტარობას უწოდებენ. თავისთავადი ელექტროგამტარობის გაზრდა შემდგომ დი-ელექტრიკის ელექტრულ გარღვევას იწვევს.

§ 3-12 თხევადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა

თხევადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა ძლიერ დამოკიდებულია სითხის მოლეკულების აგებულებაზე და მინარევეების რაოდენობაზე. კერძოდ თხევადი დიელექტრიკები, რომლებიც მინარევეებს არ შეიცავენ მცირე ელექტროგამტარობით, ანუ მაღალი წინააღმდეგობით ხასიათდებიან (ცხრილი 3-4) და მისი სიდიდე სუსტად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

ასეთ სითხეში მოხვედრილი მინარეული ატომები დისოციაციას შედეგად დენის მატარებლების კონცენტრაციის ზრდიან, შესაბამისად იზრდება გამტარებლობა. ეს მოვლენა უფრო საგრძნობია ძლიერდიპოლური

მინარეების მოხვედრისას (წყლის) თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკში.

სითხეების ϵ_r -ის და ρ -ს მნიშვნელობები 20°C -ზე

ცხრ. 3-4.

№	სითხე	აბეზულება	ρ ომი.მ	ϵ_r
1.	ბენზოლი	ნეიტრალური	10^{11} - 10^{12}	2,5
2.	ტრანსფორმატორის ზეთი		10^{10} - 10^{13}	2,25
3.	სოკოლი	პოლარული	10^8 - 10^{10}	4,5
4.	აბუსალათინის ზეთი			4,6
5.	აკეტონი	ძლიერ დიპოლური	10^4 - 10^5	22
6.	ეთილის სპირტი		10 - 10^5	33
7.	გამოხდილი წყალი		10^3 - 10^4	81

ნეიტრალურ დიელექტრიკებთან შედარებით პოლარულ თხევად დიელექტრიკებს ნაკლები კუთრი წინააღმდეგობა გააჩნია (ცხრილი 3-4.), ამასთანავე ϵ_r - ის გაზრდასთან ერთად კუთრი წინააღმდეგობა მცირდება, რადგან დენის გადატანაში მინარეებთან ერთად დიპოლებიც მონაწილეობენ, ამის გამო ძლიერდიპოლურ თხევად დიელექტრიკებს იმდენად მცირე წინააღმდეგობა გააჩნია, რომ მათ დიელექტრიკად არ იყენებენ.

ნებისმიერი დიელექტრიკის მინარეებისგან გაწმენდა წინააღმდეგობას საგრძნობლად ადიდებს.

თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკში მუდმივი დენის ხანგრძლივი გატარებით მინარეები ელექტროდებზე გამოიყოფიან რის გამოც წინააღმდეგობა იზრდება, ამ მოვლენას სითხის ელექტროგაწმენდას უწოდებენ.

თხევადი დიელექტრიკის ტემპერატურის გაზრდით იმატებს იონთა დისოციაციის ხარისხი, კონცენტრაცია და ძვირადობა, რის გამოც იზრდება გამჭოლი დენის სიდიდე და მცირდება კუთრი წინააღმდეგობა. ამ მოვლენას შემდეგი ფორმულით ახასიათებენ.

$$\rho_i = \rho_0 e^{-\alpha}, \quad (3-27)$$

სადაც ρ_0 და ρ_i სითხის კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდეებია საწყის (t_0) და საბოლოო (t) ტემპერატურაზე, ხოლო (α) მოცემული სითხის მახასიათებელი მუდმივაა. როგორც ვხედავთ ტემპერატურის გაზრდით სითხის კუთრი წინააღმდეგობა ექსპონენციალურად მცირდება.

თხევადი დიელექტრიკების კუთრი გამტარებლობის (γ) სიბლანტესთან (η) დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს:

$$\gamma \cdot \eta = \frac{Nq^2}{6 \cdot \pi \cdot r} \quad (3-28)$$

სადაც η - სითხის დინამიური სიბლანტეა, γ კუთრი გამტარობაა, N - დენის მატარებლების კონცენტრაცია, q - კი მათი მუხტის სიდიდეა

თუ თხევად დიელექტრიკებში, ტემპერატურის გაზრდით $\gamma \cdot \eta$ - ს ნამრავლის სიდიდე იზრდება, ეს იმას ნიშნავს, რომ გამტარებლობა მინარეული იონებითაა განპირობებული და ტემპერატურის გაზრდა მათ დისოციაციის ხარისხს ზრდის.

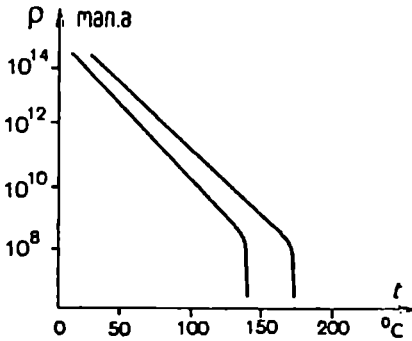
§ 3-13 მყარი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა

მყარ დიელექტრიკებში დენის გადამტანებს მინარეული ან სუსტად ბმული იონები წარმოადგენენ, ხოლო ელექტრონული გამტარობის როლი ძალიან მცირეა და თავს იჩენს მხოლოდ ძლიერ ელექტრულ ველში. იონების მოძრაობას თან ახლავს ნივთიერების გადატანა, რომლის ატომები ელექტროდზე გამოიყოფიან, ამით შეგვიძლია დავადგინოთ არა მარტო ელექტროგამტარობის

ტიპი, არამედ ელექტროგამტარობაში მონაწილე იონების სახეც.

სუფთა, ნეიტრალურ, მყარ დიელექტრიკებში (ქარვა, ფთოროპლასტი, პოლიეთილენი, პოლისტიროლი და სხვა) ელექტროგამტარობა თავისუფალი ელექტრონების მოძრაობითაა განპირობებული, რომელთა კონცენტრაცია ძალიან მცირეა, ამიტომ დიელექტრიკებში გა-

მავალი დენის სიდიდეც მცირე იქნება. ე.ი. ასეთ დიელექტრიკებს კუთრი წინააღმდეგობის დიდი მნიშვნელობა გააჩნიათ
($\rho = 10^{15} \div 10^{16}$ ომი.მ)



ნახ. 3-14. იონური ელექტროგამტარობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ტემპერატურის გაზრდით ელექტრონების კონცენტრაცია თითქმის არ იზრდება ამიტომ მყარი ნეიტრალური დიელექტრიკების კუთრი წინააღმდეგობა ტემპერატურის გაზრდით ნაკლებად

მცირდება.

იონური აგებულების მყარ დიელექტრიკებში, სადაც გამტარობას იონთა მოძრაობა განსაზღვრავს, დაბალ ტემპერატურაზე მინარეული ან სუსტადმზული იონები გადაადგილდებიან, ამიტომ $\rho = 10^{10} \div 10^{14}$ ომი.მ, ხოლო მაღალ ტემპერატურაზე თბური ფლუქტუაციის საშუალებით კრისტალის კვანძებიდან გათავისუფლებული იონები მოძრაობენ. ამის გამო ტემპერატურის გაზრდით ρ სწრაფად მცირდება (ნახ. 3-14). ამ დამოკიდებულების მრუდზე გადაღუნვის წერტილის არსებობა კრისტალის კვანძებიდან ახალი ტიპის იონების გათავისუფლებაზე მიგეითითებს. გადაღუნვის წერტილის ტემპერატურის საშუალებით იონების აქტივაციის ენერჯიის განსაზღვრა შესაძლებელია.

ზოგადად იონური დიელექტრიკებისათვის წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება ფორმულა (3-27) საშუალებით გამოისახება.

ამორფული დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა კი ყველა მიმართულებით თანაბარია და დამოკიდებულია მინარევების კონცენტრაციაზე, შემადგენლობაზე და პოლიმერიზაციის ხარისხზე.

ფოროვან დიელექტრიკებში (მარმარილო, ქაღალდი, აზბესტი) კუთრი წინაღობა გარემოს ტენიანობაზეა დამოკიდებული. ფორებში წყლის მოლეკულები ადვილად აღწევენ და დენის მატარებლის დამატებით რაოდენობას წარმოქმნიან, თუ ასეთ დიელექტრიკს $100-120^{\circ}\text{C}$ - მდე გავაცხელებთ, მაშინ ტენის აორთქლების გამო კუთრი წინაღობა ნაწილობრივ გაიზრდება.

ელექტრული ველის დიდი დაძაბულობის შემთხვევაში (10-100 კვ/მმ) ელექტრონების ენერგია იზრდება, რის გამოც ზოგიერთი მათგანი ატომებს ტოვებს და ელექტროგამტარობაში მონაწილობს, რაც დიელექტრიკის წინააღმდეგობას ამცირებს. ეს მოვლენა შემდეგი ემპირიული ფორმულით გამოისახება:

$$\rho_E = \rho \cdot e^{-\beta \cdot E} \quad (3-29)$$

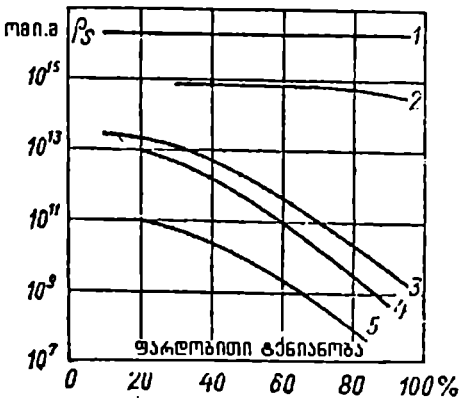
სადაც ρ_E - მყარი დიელექტრიკის კუთრი წინააღმდეგობაა გერეშე ველის დაძაბულობაზე დამოკიდებული, ხოლო ρ კი ამ წინააღმდეგობის სიდიდეა, როდესაც ρ არ არის დამოკიდებული E - ზე. β - დიელექტრიკის აგებულებით განპირობებული კოეფიციენტი.

§ 3-14 მყარი დიელექტრიკების ზედაპირული ელექტროგამტარობა

როგორი სუფთა არ უნდა იყოს მყარი დიელექტრიკის ზედაპირი მასზე მაინც არის წყლის მოლეკულების და ჭუჭყის თხელი ფენა, რაც დენის დამატებით

მატარებელს წარმოქმნის. აგრეთვე დიელექტრიკის ზედაპირზე მყოფ ატომს ქიმიურ კავშირში არამონაწილე შედარებით თავისუფალი ელექტრონი გააჩნია, რომელიც ველის მოქმედებით ადვილად გადაადგილდება, აქედან გამომდინარე დიელექტრიკის ზედაპირზე (ნახ. 3-11.) უფრო მეტი სიდიდის დენი გაედინება ვიდრე მოცულობაში. ამიტომ დიელექტრიკის ზედაპირული წინააღმდეგობის სიდიდე ρ_s ნაკლებია ან ტოლი ρ_v . რადგან ეს მოვლენა დიელექტრიკის ბუნებითაა განპირობებული, ამიტომ ρ_s და ρ_v მყარი დიელექტრიკის ძირითადი მახასიათებელი სიდიდეებია, მაგრამ ზედაპირზე დენის მატარებლების წარმოქმნას გარემოს ტენიანობა და სისუფთავეც განაპირობებს, ამიტომ დიელექტრიკის ზედაპირული წინააღმდეგობის სიდიდეზე ამ ფაქტორების გავლენა მნიშვნელოვანია.

დიელექტრიკის კუთრი ზედაპირული წინააღმდეგობის სიდიდე მით ნაკლებია, რაც მეტია მისი დიელექტრიკული შეღწევადობა.



ნახ. 3-15. დიელექტრიკის კუთრი ზედაპირული წინააღმდეგობის დამოკიდებულება გარემოს ტენიანობაზე

კუთრი ზედაპირული წინააღმდეგობის ყველაზე დიდი მნიშვნელობა (ნახ. 3-15) მყარ ნეიტრალურ დიელექტრიკებს გააჩნიათ. მაგალითად ცერეზინი (1) და ცვილი (2). როგორც წესი მათი ზედაპირი წყალში არა სველებადია ე.ი. $\rho_s \approx \rho_v$ და თითქმის არ არის დამოკიდებული გარემოს ტენიანობაზე.

პოლარული დიელექტრიკების ρ_s -ის

სიდიდე გარემოს ტენიანობის გაზრდით სწრაფად მცირდება (კერამიკა, 3 და ელექტროტექნიკური ქაღალდი 4), ხოლო თუ წყალი დიელექტრიკის მასალას ნაწილობრივად ხსნის (მარმარილო 5) მაშინ ρ_v -ის სიდიდე გარემოს ტენიანობის გაზრდით საგრძნობლად მცირდება.

დიელექტრიკის ზედაპირის გაწმენდა დროებითი ღონისძიებაა და საგრძნობ ეფექტს არ იძლევა. უფრო ხელსაყრელია ზედაპირი ისეთი მასალებით დაიფაროს, რომელიც დიელექტრიკის ზედაპირს წყალში არასველებადობის უნარს აძლევს ასეთებია: პარაფინი, ცვილი და სხვადასხვა სახის ლაქები.

ხშირად სამრეწველო საწარმოებისაგან გამოყოფილი დიდი რაოდენობით ჭუჭყი მაღალი ძაბვის იზოლატორის ზედაპირზე ხვდება და ტენტან ერთად მაღალი გამტარობის არხს წარმოქმნის, ასეთ შემთხვევაში ჭუჭყისაგან გასუფთვებული იზოლატორის ზედაპირს სილიციუმორგანული წარმოშობის *ჰიდროფობული* პასტეებით ფარავენ, ისინი მოცულობაში შეიწოვენ ჭუჭყს და მას წყალში ხსნადობის ე.ი. ელექტროლიტის წარმოქმნის უნარს უკარგავს ეს კი ზედაპირულ წინააღმდეგობას საგრძნობლად ზრდის.

§ 3-15 დიელექტრიკული დანაკარგები

დიელექტრიკებზე ელექტრული ველის მოქმედებით ელექტრული ველის ენერჯიის სითბურ ენერჯიად გარდაქმნას რის შედეგადაც დიელექტრიკი თბება, *დიელექტრიკული დანაკარგების მოვლენა* ეწოდება. ამ მოვლენას დიელექტრიკში მიმდინარე პოლარიზაციის და ელექტროგამტარობის პროცესები განაპირობებენ, ხოლო დიელექტრიკზე ძლიერი ელექტრული ველის შემოქმედებისას – ონიზაციის პროცესი.

პოლარიზაციისას ბმული ნაწილაკების წანაცვლებას, განსაკუთრებით კი დიპოლთა შემობრუნებას ხელს უშლის მოლეკულარული და ხახუნის ძალები, რომელთა დაძლევაზე ელექტრული ენერგიის გარკვეული ნაწილი იხარჯება და სწორედ ეს ნაწილი გადადის სითბოში. ასეთ დანაკარგებს პოლარიზაციულ დიელექტრიკულ დანაკარგებს უწოდებენ ($P_{\text{კოლ}}$).

ელექტრული ველის მოქმედებით, დიელექტრიკში მცირე სიდიდის გამჭოლი გამტარობის დენი გაედინება და ჯოულ - ლენცის კანონის თანახმად სითბო გამოიყოფა, რომელსაც ელექტროგამტარობით გამოწვეულ დიელექტრიკულ დანაკარგებს უწოდებენ ($P_{\text{გაბ}}$).

ძლიერი ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკში იონიზაციის პროცესი ფორმირდება. ამ მოვლენაზეც ელექტრული ველის ენერგიის გარკვეული ნაწილი იხარჯება და მას იონიზაციით გამოწვეულ დიელექტრიკულ დანაკარგს უწოდებენ ($P_{\text{იონ}}$).

დიელექტრიკული დანაკარგების სრული სიმძლავრე P ამ სამი მდგენელის ჯამს წარმოადგენს:

$$P = P_{\text{კოლ}} + P_{\text{გაბ}} + P_{\text{იონ}} \quad (3-30)$$

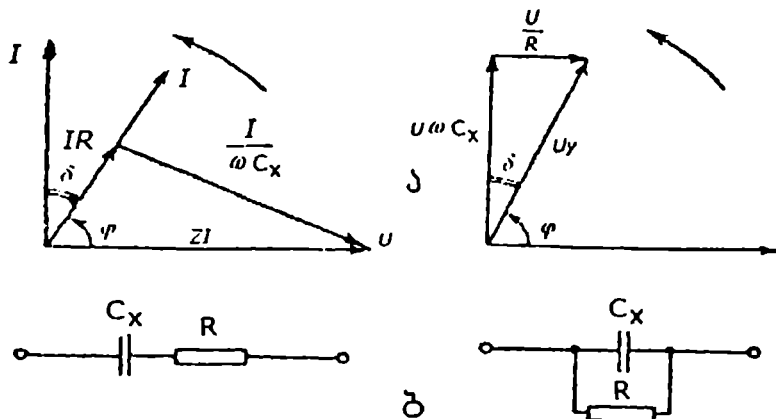
იმისდა მიხედვით, თუ როგორია დიელექტრიკის აგებულება, გარეშე ველის გეარობა და სიდიდე, დიელექტრიკულ დანაკარგებს ზემოთ განხილული სხვადასხვა ფაქტორები განაპირობებენ.

დიელექტრიკებს, სადაც თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები თითქმის არ არის და პოლარიზაცია ხახუნის და მოლეკულარული ძალების დაძლევის გარეშე მიმდინარეობს იდეალურ დიელექტრიკს უწოდებენ. მასში სრული დიელექტრიკული დანაკარგები ნულის ტოლია.

რეალურ დიელექტრიკებში ველის მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში $P_{\text{გაბ}}$ სიდიდე შედარები ნაკლებია და სრულ დანაკარგებს პოლარიზაციის პროცესი განსაზღვრავს.

დიელექტრიკული დანაკარგების მოვლენა შეინიშნება, როგორც ცვლადი, ასევე მუდმივი ელექტრული

ველის ზემოქმედებისას, მაგარამ ცვლადი ველის მოქმედებისას დიელექტრიკული დანაკარგები გაცილებით მეტია. ეს იმით აიხსნება, რომ ცვლადი ველის ზემოქმედებისას პოლარიზაციის მოვლენა უწყვეტად მიმდინარეობს, მუდმივი დენის ზემოქმედებისას კი პროცესი წყვეტილია. აქედან გამომდინარე დანაკარგები ცვლადი ველის მოქმედებისას უფრო მეტია ვიდრე მუდმივ ელექტრულ ველში.



ნახ. 3-16. დანაკარგებიანი დიელექტრიკის ვექტორული დიაგრამა (ა) და ექვივალენტური სქემა (ბ).

პრაქტიკაში მიღებულია ე.წ. დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხე (δ) და ამ კუთხის ტანგენსის ($tg\delta$) მნიშვნელობა.

კუთხე δ არის ნებისმიერ ტევადურ (კონდენსატორიანი) ელექტრულ წრედში მოდებულ S ძაბვისა და გამავალი I დენის ვექტორებს შორის ძვრის φ კუთხის შემავსებელი 90° - მდე (ნახ. 3.16).

$$\varphi + \delta = 90^\circ \quad (3-31)$$

იდეალური დიელექტრიკებისათვის $\delta = 0$, ხოლო რეალურებისათვის $\delta > 0$, რაც მეტია δ , მით მეტი ელექტრული ველის ენერგია დიელექტრიკულ დანაკარგებზე გარდაქმნება. დიელექტრიკული დანაკარგების ნორმაზე მეტად გადიდება დიელექტრიკის ელექტროსაიზოლაციო ყველა თვისების გაუარესებას იწვევს.

დიელექტრიკული დანაკარგების მოვლენის შესწავლა დაკავშირებულია ისეთი ცვლადი ძაბვის წრედის ანალიზთან (ნა. 3-16), რომელშიც ჩართულია გამოსაკვლევი დიელექტრიკული მასალისაგან დამზადებული კონდენსატორი C_x ტევადობით. ასეთი წრედის ვექტორულ დიაგრამაში წრედში გამავალი I დენის ვექტორი წინ უსწრებს მოდებული U ძაბვის ვექტორს $\varphi = 90^\circ - \delta$ კუთხით და შედგება დენის აქტიური: $I_s = U/R$ და რეაქტიული $I_r = U_\omega C_x$ მდგენელებისაგან.

ვექტორული დიაგრამის საშუალებით შეგვიძლია განვსაზღვროთ დანაკარგების კუთხის $\text{tg} \delta$ მნიშვნელობა:

$$\text{tg} \delta = \frac{I_r}{I_s} = \frac{U/R}{U\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R} \quad (3-32)$$

სადაც $\omega = 2\pi f$ - ცვლადი ძაბვის ციკლური სიხშირეა; R - კონდენსატორის დიელექტრიკის წინაღობაა.

$\text{tg} \delta$ თვისობრივად ახასიათებს დიელექტრიკის მთელ მოცულობას და თუ სპეციალურად არ არის მითითებული გაზომვის ტემპერატურა, სიხშირე ან ველი დაძაბულობა მაშინ ძნელია დიელექტრიკის შეფასება $\text{tg} \delta$ -ს საშუალებით.

დიაგრამის საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს დიელექტრიკული დანაკარგების აქტიური სიმძლავრე (P_a)

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_s = U \cdot I_r \cdot \text{tg} \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \text{tg} \delta$$

$$\text{ე.ი. } P = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_x \cdot \text{tg} \delta \quad (3-33)$$

გამოსახულებიდან ჩანს, რომ გამოყოფილი სიმძლავრე, დიელექტრიკზე მოდებული ძაბვის სიდიდის

და სიხშირის გადიდებით, იზრდება. რაც შეეხება C_x და $I_{\text{გ}}^{\text{დ}}$ ისინი დამოკიდებული არიან, როგორც ძაბვაზე და სიხშირეზე, ასევე დიელექტრიკის აგებულებაზე, ტემპერატურაზე, ტენიანობაზე და სხვა მრავალ ფაქტორზე.

დიელექტრიკული მასალის დასახასიათებლად კუთრი დიელექტრიკული დანაკარგების სიმძლავრე (P_v) შემოყავთ, რომელშიც დიელექტრიკის მოცულობის ერთეულში გამოყოფილი სიმძლავრეა. მისი მნიშვნელობა $I_{\text{გ}}^{\text{დ}}$ – სთან ერთად დიელექტრიკული მასალის მახასიათებელი პარამეტრია.

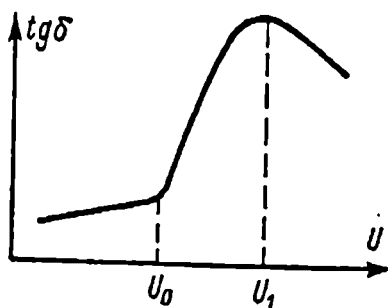
§ 3-16 დიელექტრიკული დანაკარგები აირებში

როდესაც აირზე მოქმედი გარეშე ველის დაძაბულობა იონიზაციის საწყის დაძაბულობაზე (E_0) ნაკლებია, მაშინ აირში იონიზაციის მოვლენას ადგილი არ აქვს და იონიზაციით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდე ძალიან მცირეა. ასეთი აირის ელექტროგამტარობაც ძალიან მცირეა. ამიტომ ელექტროგამტარობით გამოწვეული დანაკარგები ნულის ტოლია, რადგან პოლარიზაციის მოვლენა აირებში უდანაკარგოდ მიმდინარეობს ამიტომ პოლარიზაციით გამოწვეული დანაკარგებიც ნულის ტოლია. ე.ი. შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ელექტრული ველის მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში ($E < E_0$) აირი იდეალურ დიელექტრიკად ითვლება და $I_{\text{გ}}^{\text{დ}} < 10^{-5}$.

თუ გარეშე ველის სიდიდე E_0 – ზე მეტია, მაშინ აირში იონიზაციის პროცესი იწყება, რაც ზრდის იონიზაციით გამოწვეულ დანაკარგებს და $I_{\text{გ}}^{\text{დ}}$ დაძაბულობის მატებით მკვეთრად იზრდება, ამიტომ აირის გამოყენება საინჟინერიოდ იმ შემთხვევაში შეიძლება თუ ველის

დაძაბულობა იონიზაციის საწყის დაძაბულობაზე ნაკლებია.

პრაქტიკაში ხშირია შემთხვევა, როდესაც აირი არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში იმყოფება, ან მყარი და თხევადი დიელექტრიკი აირად ჩანართებს შეიცავს. ამ ჩანართების ზომები 10^{-4} მმ-დან რამოდენიმე მილიმეტრამდეა. რადგან აირის იონიზაციის საწყისი დაძაბულობა



ნახ. 3-17. აირჩანართებიანი მყარი დიელექტრიკის $tg\delta$ - დამოკიდებულება U - ზე.

გამოიყოფა, რაც დიელექტრიკის გარღვევის წინა პირობაა.

ამ შემთხვევაში იონიზაციით გამოწვეული დანაკარგები ($P_{ონ}$) შემდეგი ფორმულით გამოისახება

$$P_{ონ} = A \cdot f \cdot (U - U_0)^3, \quad (3-34)$$

სადაც A - მოცემული სისტემისათვის მუდმივი სიდიდეა, f - გარეშე ველის სიხშირეა, ხოლო U და U_0 კი მოდებული და იონიზაციის საწყისი ძაბვაა. ამ ფორმულას აზრი აქვს თუ $U > U_0$.

აირჩანართებში, როდესაც $U > U_0$ ძაბვის ზრდასთან ერთად $tg\delta$ -ს სიდიდეც იზრდება (ნახ. 3-17), რაც აირჩანართებში იონიზაციის პროცესის დაწყების მაჩვენებელია. დამოკიდებულებას $tg\delta = f(U)$ იონიზაციის მრუდს

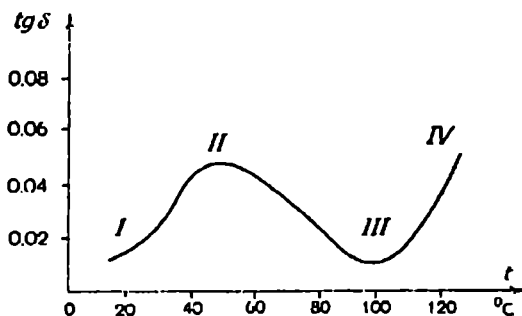
უფრო ნაკლებია, ვიდრე მყარი ან თხევადი დიელექტრიკის, ამიტომ იონიზაცია აირად ჩანართებში უფრო ნაკლებ ძაბვაზე იწყება. ამ მოვლენას ნაწილობრივ განმუხტვას უწოდებენ. ის დიელექტრიკულ დანაკარგებს ზრდის. ჩანართებში მყოფი იონები კი დიელექტრიკის მოლეკულებს შლიან. რის შედეგადაც აირები და სითბო

უწოდებენ. ამ დამოკიდებულებაზე, რაც მეტია S_0 -ის სიდიდე მით მეტად ერთგვაროვანია მყარი დიელექტრიკი.

§ 3-17 დიელექტრიკული დანაკარგები სითხეებში

თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკებში, რომლებიც მინარევებს არ შეიცავენ დიელექტრიკული დანაკარგები მხოლოდ ელექტროგამტარობითაა გამოწვეული და შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\text{tg } \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon_r \cdot f \cdot \rho} \quad (3-35)$$



ნახ. 3-18. ზეთ-კანიფოლიანი კომპაუნდის $\text{tg } \delta$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ρ – თხევადი დიელექტრიკის კუთრი წინააღმდეგობაა ომი.მ-ში, ხოლო f გარეშე ელექტრული ველის სიხშირეა. როგორც ვხედავთ თხევად, ნეიტრალურ, სუფთა დიელექტრიკში დანაკარგები იმდენად მცირეა, რომ მას პრაქტიკული მნიშვნელობა არ აქვს. ამის საუკეთესო მაგალითს საკონდენსატორო ზეთი წარმოადგენს რომლის $\text{tg } \delta < 10^{-4}$.

პოლარულ სითხეებში კი ელექტროგამტარობით გამოწვეულ დანაკარგებთან ერთად პოლარიზაციით გამოწვეული დანაკარგებიც არსებობს. ამასთანავე დანაკარგები გაცილებით მეტია ვიდრე ნეიტრალურ თხევად დიელექტრიკებში.

ბლანტ - დიპოლურ სითხეებში, სადაც დიპოლთ-შორის ურთიერთქმედება დიდია, ველის ცვლილებით დიპოლები მდგომარეობას ძნელად იცვლიან (ნახ. 3-18), ამის გამო *ღბ* უმნიშვნელოა (I უბანი). ტემპერატურის გაზრდით სიბლანტე მცირდება, დიპოლების ორიენტაციაზე ელექტრული ველის მეტი ენერგია იხარჯება ე.ი. *ღბ* მაქსიმუმს აღწევს (II უბანი).

ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით სიბლანტე იმდენად მცირდება, რომ დიპოლთშორის ურთიერთქმედება ფაქტიურად ნულის ტოლია და ველის მცირე ენერგიაა საჭირო პოლარიზაციისთვის, ე.ი. *ღბ* მცირდება (III უბანი). მაღალ ტემპერატურებზე $90 - 120^{\circ}\text{C}$ კი ელექტროგამტარობით გამოწვეული დანაკარგები და შესაბამისად *ღბ* მკვეთრად იზრდება (IV უბანი). ასეთი დიელექტრიკებისათვის $\rho > 10^{-2}$.

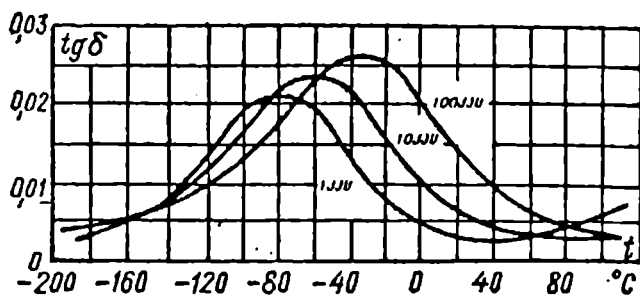
თხევად დიელექტრიკებში ϵ_r - ის სიდიდის გაზრდით *ღბ* სიდიდეც იზრდება. ეს ზრდა ძირითადად გამოწვეულია დიპოლების მონაწილეობით ელექტროგამტარობაში, ამიტომ ძლიერდიპოლურ თხევად დიელექტრიკებს იმდენად მაღალი გამტარობა და შესაბამისად *ღბ* დიდი მნიშვნელობა აქვთ, რომ ისინი, როგორც დიელექტრიკები პრაქტიკულად არ გამოიყენებიან.

თხევად დიელექტრიკებში პოლარული მინარევების რაოდენობის გაზრდით *ღბ*-სიდიდე ძლიერ იზრდება, რაც ელექტროგამტარობის გაზრდითაა განპირობებული.

§ 3-18 დიელექტრიკული დანაკარგები მყარ დიელექტრიკებში

მყარი დიელექტრიკების რთული აგებულების გამო მათში დიელექტრიკული დანაკარგების ყველა სახეა მოსალოდნელი. გამარტივების მიზნით ოთხ შემთხვევას განიხილავენ.

დანაკარგები მოლეკულური სტრუქტურის მქონე მყარ დიელექტრიკებში ძირითადად განპირობებულია მოლეკულების გვარობით. თუ ის შედგება ნეიტრალური მოლეკულებისაგან და არ შეიცავს მინარევებს, მაშინ დანაკარგები ძალიან მცირეა ($\text{tg}\delta = 10^{-4} \cdot 10^{-5}$), სუსტადაა დამოკიდებული გარეშე ველის სიხშირეზე და გარემოს ტემპერატურაზე. ასეთებს პარაფინი, გოგირდი, პოლიეთილენი, პოლისტროლი, პოლიტეტრაფთოროეთილენი, ქარვა და სხვა ნივთიერებები მიეკუთვნებიან.



ნახ. 3-19. ელექტროტექნიკური ქაღალდის $\text{tg}\delta$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

დიელექტრიკებში რომლებიც დიპოლური მოლეკულებისაგან შედგებიან (ქაღალდი, კაუჩუკი, ორგანული მინა, ებონიტი და სხვა). $\text{tg}\delta$ რთულადაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე და სიხშირეზე. ნახ. 3-19 - ზე მოყვანილია ელექტროტექნიკური ქაღალდის $\text{tg}\delta$ - ს და-

მოკიდებულება ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ ტემპერატურის გაზრდით ε იზრდება და მაქსიმუმს დაბალ ტემპერატურულ ინტერვალში აღწევს. ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით დიპოლების სითბური ენერგია იზრდება, მათ შორის ურთიერთქმედების ძალა კი მცირდება, ამის გამო ε -ც მცირდება, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით ε -ს მატება ელექტროგამტარობის ზრდით არის განპირობებული. გარეშე ელექტრული ველის სიხშირის გაზრდა მაქსიმუმის წერტილის მაღალტემპერატურულ ზონაში წანაცვლებას იწვევს.

იონური აგებულების დიელექტრიკებში დანაკარგების სიდიდე იონების განლაგების სიმჭიდროვითაა განპირობებული. თუ იონები მჭიდროდ არიან განლაგებულნი, მაშინ ε ძალიან მცირეა და უმნიშვნელოდ იზრდება ტემპერატურის გაზრდით. თუ იონებს სტრუქტურაში არამჭიდრო განლაგება აქვთ, მაშინ ტემპერატურის გაზრდით ε სწორხაზოვნად იზრდება. ასეთი თვისებებით უმეტესად საიზოლაციო ფაიფური და კერამიკა ხასიათდება. იონური წარმოშობის ამორფულ დიელექტრიკებში (ელექტროტექნიკური მინა) ε ძლიერადაა დამოკიდებული ქიმიურ შემადგენლობაზე.

არაერთგვაროვანი სტრუქტურის მქონე დიელექტრიკები ორი ან მეტი მასალისგან შედგებიან. ერთი ელექტრულ, ხოლო მეორე კი მექანიკურ თვისებებს განაპირობებს. ამ შემთხვევაში ε - ს საერთო მნიშვნელობის დასადგენად ლიხტენკერას განტოლებას იყენებენ (3-19), რომელსაც ε - სთვის შემდეგი სახე აქვს.

$$\varepsilon = \Theta_1 \varepsilon_1 + \Theta_2 \varepsilon_2, \quad (3-36)$$

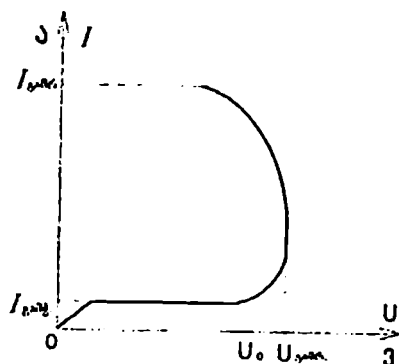
სადაც ε_1 და ε_2 ცალკეული კომპონენტების დანაკარგებია, ხოლო Θ_1 და Θ_2 ამ კომპონენტების პროცენტული წილია სისტემაში.

განტოლება ძალაშია ნებისმიერ ტემპერატურაზე, მაგრამ ჯამური I_{Σ} - ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდს მაქსიმუმის ორი ტემპერატურა გააჩნია, რაც ცალკეული კომპონენტების I_{Σ} - ის t - ზე დამოკიდებულების მრუდის მაქსიმუმებითაა განპირობებული.

§ 3-19 დიელექტრიკების გარღვევა

ნებისმიერი დიელექტრიკი ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ინარჩუნებს ელექტროსაიზოლაციო თვისებებს, თუ მასზე მოქმედი ელექტრული ველის დაძაბულობა გარკვეულ სიდიდეს არ აღემატება.

ეს იმას ნიშნავს, რომ დიელექტრიკში მიმდინარე ელექტრული მოვლენები მნიშვნელოვან თვისობრივ ცვლილებებს არ იწვევენ. როგორც ვიცით, დიელექტრიკის ერთეულოვან მოცულობაში ძალიან მცირეა თავისუფალ დამუხტულ ნაწილაკთა რიცხვი,



ნახ. 3-20. დიელექტრიკში გამავალი დენის დამოკიდებულება ძაბვაზე

ამიტომ მასში გამავალი გამჭოლი გამტარობის დენის სიმკვრივეც ძალიან მცირე იქნება $j = 10^{-8} \div 10^{-16}$ ამპ/მ², მაგრამ ელექტრული ველის დაძაბულობის გარკვეული მნიშვნელობისას დიელექტრიკში ფორმირდება იონიზაციის მოვლენები, რომელთანაც დაკავშირებულია მნიშვნელოვანი თვისობრივი ცვლილებები. კერძოდ, დიელექტრიკის ერთეულ მოცულობაში თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების (ელექტრონები და იონები) რიცხ-

ვის ზრდა. რის შედეგადაც იზრდება დიელექტრიკში გამავალი დენის სიდიდე. ეს კარგად ჩანს $I = f(U)$ დამოკიდებულების გრაფიკზე დიელექტრიკის ვოლტ - ამპერულ მახასიათებელზე (ნახ 3-20), რომლის მიხედვითაც თუ დიელექტრიკის ნიმუშზე მოდებული ძაბვის მნიშვნელობა U_0 - ს არ აღემატება, მაშინ დიელექტრიკში გამავალი გამჭოლი დენი მნიშვნელოვნად მცირეა და არ არის დამოკიდებული ძაბვაზე.

ძაბვის U_0 - ზე მეტი მნიშვნელობისას დიელექტრიკში ფორმირებული იონიზაციის მოვლენები გამჭოლი გამტარობის დენის გაზრდას განაპირობებს. ძაბვის ამ მნიშვნელობას (U_0) *იონიზაციის დაწყების ანუ საწყის ძაბვას* უწოდებენ.

ძაბვის შემდგომში უმნიშვნელო ზრდა დენის მკვეთრ ზრდას იწვევს და როდესაც ფარდობა $(\frac{\delta I}{\delta U}) \rightarrow \infty$,

დიელექტრიკში გამავალი დენი გაცილებით მეტია (10^{12} - ჯერ) გამჭოლი გატარობის დენზე. ამ მოვლენას ელექტროსაინოლაციო თვისებების დაკარგვას ანუ *დიელექტრიკის ელექტრულ გარღვევას* უწოდებენ.

ძაბვის იმ მნიშვნელობას, რომელზეც ფორმირდება გარღვევა, *დიელექტრიკის გამრღვევი ძაბვა* ($U_{გამრ}$) ეწოდება.

ექსპერიმენტებით ცნობილია, რომ დიელექტრიკის სისქის (h) ცვლასთან ერთად $U_{გამრ}$ სიდიდეც იცვლება. ამიტომ დიელექტრიკული მასალის გარღვევის მოვლენის შეფასებას იმ ელექტრული ველის დაძაბულობის სიდიდით ახდენენ ($E_{გამრ}$), რომლის მოქმედებისას ერთგვაროვან ველში დიელექტრიკში ელექტრული გარღვევა ფორმირდება.

$$E_{გამრ} = \frac{U_{გამრ}}{h} \quad (3-37)$$

$E_{გამრ}$ - სოგჯერ დიელექტრიკის *ელექტრულ სიმტკიცესაც* უწოდებენ. მისი განზომილებაა ვ/მ ან კვ/მმ.

დიელექტრიკის ელექტრული სიმტკიცე არამარტო დიელექტრიკის თვისებებზეა დამოკიდებული, არამედ ველის არაერთგვაროვნებაზე, სიხშირეზე, პოლარობაზე და სხვა ფაქტორებზე.

ერთგვაროვან ველში და ნორმალურ პირობებში აირების ელექტრული სიმტკიცე ($2,5 \div 3,5$) კვ/მმ, სითხეების კი ($10 \div 35$) კვ/მმ, ხოლო მყარი დიელექტრიკებისათვის $E_{გამ}$ მაქსიმალური მნიშვნელობა 500 კვ/მმ აღწევს. როგორც ვხედავთ ყველაზე მეტი ელექტრული სიმტკიცე მყარ დიელექტრიკებს, ხოლო მცირე – აირებს გააჩნიათ.

დიელექტრიკში დენის სიდიდის სწრაფი ზრდა დენის მატარებელი ნაწილაკების მყისიერი ზრდითაა გამოწვეული, რაც დიელექტრიკის მოცულობაში მყოფი ნეიტრალური მოლეკულებისაგან დადებითი და უარყოფითი მუხტის მქონე ნაწილაკების წარმოქმნით - იონიზაციითაა განპირობებული.

იონიზაცია მოხდება იმ შემთხვევაში თუ ნეიტრალური ატომის გარე სავალენტო შრეზე მყოფი ელექტრონი დამატებით ენერგია მიიღებს (W_j), რომლის სიდიდე მეტია ან ტოლია ატომის იონიზაციის ენერგიაზე ($W_{იონიზ}$) ე.ი.

$$W_j > W_{იონიზ} \quad (3-38)$$

გარღვევის მომენტში დიელექტრიკში გარღვევის არხი წარმოიქმნება, რომელიც იონიზებული ნაწილაკებით – პლაზმით არის შევსებული. მას მაღალი გამტარობა აქვს. ველის მოხსნის შემდეგ ყველა იონის რეკომბინაცია ხდება და გარღვევის არხი ქრება. ამის გამო თხევადი და აირადი დიელექტრიკები გამრღვევი ძაბვის მოხსნის შემდეგ ელექტროსაიზოლაციო თვისებებს აღიდგენენ, ხოლო მყარ დიელექტრიკებში გარღვევის არხი ნეიტრალური აირებით არის შევსებული. მათ კი ნაკლები ელექტრული სიმტკიცე გააჩნიათ.

ორგანული წარმოშობის მყარ დიელექტრიკებში გარღვევის არხის ზედაპირი ნახშირის ფენით არის დაფარული. ამის გამო გარღვევის შემდეგ მყარ დი-

ელექტრიკებში ელექტრული სიმტკიცის აღდგენა არ ხდება.

დიელექტრიკის ელექტრული სიმტკიცის სიდიდე ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზეც არის დამოკიდებული, კერძოდ თუ გარღვევის პროცესს ძაბვის მოქმედების დაწყებიდან 10-60 წმ – ს განმავლობაში ხდება. ე.ი. დიელექტრიკში მიმდინარე სითბური პროცესები ფორმირებას ვერ ასწრებენ ამ შემთხვევაში მხოლოდ ელექტრული გარღვევის მექანიზმს აქვს ადგილი და ასეთ ელექტრულ სიმტკიცეს *ხანმოკლე ელექტრულ სიმტკიცეს* უწოდებენ ($E_{გამრ.ხან}$).

თუ გარღვევა იმდენად მცირე დროის განმავლობაში ხდება, რომ ის გარღვევის ჩამოყალიბების დროის ტოლია ($10^{-5}-10^{-8}$ წმ). მაშინ დიელექტრიკს *იმპულსური ელექტრული სიმტკიცით* ახასიათებენ.

როდესაც ძაბვის მოქმედებით დიელექტრიკის გარღვევის ფორმირება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მიმდინარეობს, მაშინ დიელექტრიკის გარღვევის დრო ველის დაძაბულობის გაზრდით მცირდება. ამ დამოკიდებულებას დიელექტრიკის სიცოცხლის მრუდს უწოდებენ და მისი საშუალებით ისაზღვრება საიზოლაციო კონსტრუქციის მუშაობის საიმედოობა.

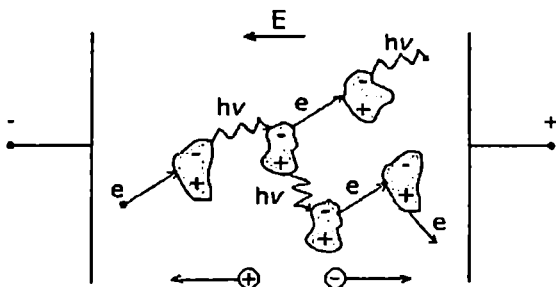
პრაქტიკაში გამოყენებული საიზოლაციო კონსტრუქციის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე შედარებით მეტი უნდა იყოს, ვიდრე მასზე რეალურად მოქმედი, ანუ მუშა ძაბვა. მათ ფარდობას იზოლაციის *ელექტრული სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტს* (A) უწოდებენ.

$$A = \frac{U_{გამ}}{U_{მუშ}}$$

§ 3-20 აირადი დიელექტრიკების გარღვევა ერთგვაროვან ველში

აირადი დიელექტრიკები ფართოდ არიან გავრცელებული. მათი ერთ - ერთი წარმომადგენელი ჰაერია, რომელიც იზოლაციას ელექტრო გადამცემ ხასებზე, ტრანსფორმატორებზე და სხვა მოწყობილობებზე ქმნის. მისი ელექტრული სიმტკიცე ერთგვაროვან ველში 3 კვ/მმ.

ვიციტ, რომ აირის მოცულობაში ყოველთვის არსებობს დადებითი და უარყოფითი მუხტის მქონე თავისუფალი ნაწილაკების მცირე რაოდენობა, რომლებიც თუ მათზე ელექტრული ველი არ მოქმედებს თბურ - ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან.



ნახ. 3-21. აიროვანი დიელექტრიკის ელექტრული გარღვევის სქემატური გამოსახვა

ვთქვათ, ასეთი აირი მოთავსებულია ორ ბრტყელ ელექტროდს შორის (ნახ. 3-21), რომლებიც ერთგვაროვან ელექტრულ ველს ქმნიან. მაშინ ველის მოქმედებით დამუხტული ნაწილაკები ელექტრული ველის გასწვრივ იმოძრავენ, ველში აჩქარდებიან და მოლეკულებთან დაჯახებებს შორის λ მანძილზე W_p ენერგიას შეიძენენ.

$$W_p = Eq\lambda \quad (3-39)$$

სადაც E ველის დაძაბულობაა, q კი - ნაწილაკის მუხტის სიდიდე.

დაჯახების მომენტში ეს ენერგია ნეიტრალური ატომის გარე სავალენტო შრეზე მყოფ ელექტრონს გადაეცემა და თუ სრულდება იონიზაციის პირობა (3-38) ეკრძოდ

$$Eq\lambda > W_{\text{იონიზ.}} \quad (3-40)$$

მაშინ ადგილი აქვს ნეიტრალური ატომის იონიზაციას, რის შედეგად ორ დამუხტულ ნაწილაკს ვიღებთ. ასეთ იონიზაციას, *დარტყმით იონიზაციას* უწოდებენ (დაშტრიხული უბნები). წარმოქმნილი ნაწილაკებიც ელექტრულ ველში აჩქარდებიან.

როდესაც ელექტრონის მიერ ველში შექმნილი ენერგია ნაკლებია იონიზაციის ენერგიაზე, მაშინ ატომი დაჯახების შემდეგ აგზნებულ მდგომარეობაში გადადის და გარკვეული დროის შემდეგ ის ჭარბ ენერგიას ფოტონის ($h\nu$) სახით გამოასხივებს. ეს ფოტონი კი მეორე აგზნებულმა ატომმა შეიძლება შთანთქოს და თუ აქ შესრულდა იონიზაციის პირობა მაშინ ადგილი აქვს ფოტოიონიზაციას. აირებში ძირითადად იონიზაციის ეს ორი სახე გვხვდება.

იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრონები რაღაც მანძილის გავლის შემდეგ ახალ იონიზაციას იწვევენ. ეს პროცესები ზეგვისებურად მცირე დროის განმავლობაში (10^{-8} წმ) მიმდინარეობს, რის შედეგად ელექტრონებს შორის სივრცეში იონიზებული უბნები იარსებებს, რომლებშიც ველის მოქმედებით დადებითი მუხტის მქონე ნაწილაკები უარყოფითი ელექტრონებისაკენ იმოძრაებენ და უარყოფითი მუხტის მქონე კი - პირიქით, რადგან ელექტრონის მასა გაცილებით ნაკლებია ვიდრე იონის, შესაბამისად ელექტრონის ძვრადობა და თავისუფალი განარბენის სიგრძე უფრო მეტი იქნება, აქედან გამომდინარე ელექტრონები უფრო ადრე აღწევენ ელექტრონებს, ვიდრე იონები. ე.ი. დროის მცირე შუალედში ელექტრონებს შორის მოცულობითი დადებითი მუხტი იარსებებს, რაც ველის დამაბულობას და იონიზაციის ხარისხს ზრდის.

მუხტების ეს მოძრაობა ნეიტრალური მოლეკულების დამატებით იონიზაციას იწვევს, რის შედეგად ელექტროდებს შორის პლასმით შევსებული მაღალი გამტარობის მქონე გარღვევის არხი წარმოიქმნება რომელშიც დიდი დენი გაივლის. ეს კი აირის ელექტრულ გარღვევას ნიშნავს.

პოტენციალთა სხვაობას λ მანძილზე, რომელიც დარტყმით იონიზაციას იწვევს *იონიზაციის პოტენციალს* უწოდებენ ($U_{\text{იონიზ.}}$) ფორმულა (3-40) დან მივიღებთ რომ

$$U_{\text{იონიზ.}} = \frac{W_{\text{იონიზ.}}}{q} \quad (3-41)$$

მისი სიდიდე აირადი დიელექტრიკებისათვის 4 დან 25 ელექტრონვოლტის იცვლება, შესაბამისად იონიზაციის ენერგია 4-25 ელექტრონვოლტის ტოლია. თუ λ -ს სიდიდე მუდმივია, მაშინ დარტყმითი იონიზაცია თითქმის ყოველთვის ველის ერთ დაძაბულობაზე დაიწყება. ამ დაძაბულობას *იონიზაციის საწყის დაძაბულობას* (E_0) უწოდებენ.

ფორმულა 3-40 - ში შემავალი წევრებიდან ელექტრონის მუხტის სიდიდე q და ატომის იონიზაციის ენერგია $W_{\text{იონ}}$ გარეშე ფაქტორებზე დამოკიდებული არ არის, ხოლო ელექტრონის თავისუფალი განარბენის სიგრძე (λ) წნევის გაზრდით მცირდება ე.ი. მცირდება λ მანძილზე შექმნილი ენერგია. იონიზაციის პირობა რომ შესრულდეს საჭიროა E -ს გაზრდა. ამიტომ წნევის გაზრდით გამრღვევი ველის დაძაბულობა იზრდება.

ცნობილია, რომ სხვადასხვა აირებისათვის λ - სიდიდე მიახლოებით ერთნაირია, მაგრამ $W_{\text{იონიზ.}}$ განსხვავებული მნიშვნელობები აქვთ, ამიტომ განსხვავებულია იმ ველის დაძაბულობა, რომელიც იონიზაციის პირობას ასრულებს ე.ი. სხვადასხვა აირებს სხვადასხვა ელექტრული სიმტკიცე ($E_{\text{გამ}}$) გააჩნიათ.

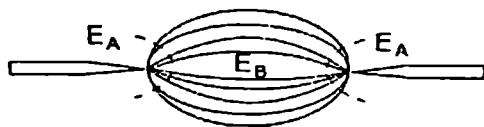
რადგან აირადი დიელექტრიკების გარღვევის მოვლენა სუფთა ელექტრული ხასიათისაა ამიტომ, მათი

გარღვევის დასახასიათებლად ძაბვისა და ელექტრული სიმტკიცის აბსოლიტურ მნიშვნელობებს იყენებენ, ხოლო სითხეების და მყარი დიელექტრიკების გარღვევის მოვლენაში გარკვეულ როლს სითბური პროცესები ასრულებენ, ამიტომ მათში გარღვევის მოვლენას აღნიშნული პარამეტრების ეფექტური მნიშვნელობებით აფასებენ.

§ 3-21 აირადი დიელექტრიკების გარღვევა არაერთგვაროვან ველში

ძალოვან ელექტროტექნიკურ მოწყობილებებში ერთგვაროვანი ველი იშვიათად გვხვდება. უმეტეს ელექტროსაიზოლაციო მასალებს, მათ შორის აირებსაც არაერთგვაროვან ველში უწევთ მუშაობა. ძლიერ არაერთგვაროვანი ველი ორ ნემსისებრ ელექტროდს შორის მიიღება (ნახ. 3-22), ხოლო სუსტად არაერთგვაროვანი ველი ორ სფეროს ან ბრტყელ ელექტროდს შორის იმ შემთხვევაში წარმოიშევა, თუ ელექტროდებს შორის მანძილი ელექტროდის ზომაზე მეტია.

არაერთგვაროვან ველში ელექტროდების მახლობლად ველის დაძაბულობა (E_A) მაქსიმალურია და ველის საშუალო დაძაბულობაზე ($E_{საშ}$) მეტია. ველის შუა



ნახ. 3-22. არაერთგვაროვანი ველი ორ ნემსისებრ ელექტროდებს შორის

B წერტილში კი დაძაბულობა მინიმალურია ე.ი.

$E_A > E_{საშ} > E_B$ ეს კი იმას ნიშნავს, რომ იონიზაციის პირობა

ელექტროდების მახლობელ წერტილებში ყველაზე ადრე სრულდება. აქ იონიზაციას იისფერი ნათება, ბგერის და ელექტრომაგნიტური გამოსხივება ახასიათებს.

ამ მოვლენას *ლოკალურ იონიზაციას* ანუ "გვირგვინის" მოვლენას უწოდებენ, ხოლო იმ ძაბვას რო-

მელზეც გვირგვინი გაჩნდება - გვირგვინის ძაბვა უწოდეს ($U_{\text{გვირ}}$). გვირგვინის მოვლენა აირის მთლიან გარღვევას არ ნიშნავს, მაგრამ იზრდება $l_{\text{გვ}}$, გამოიყოფა სიბოლო და მზადდება პირობები სრული გარღვევისათვის.

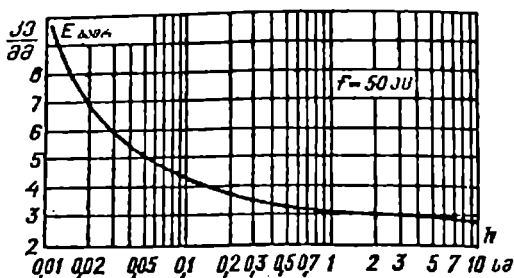
ძაბვის მატებით ველის შიგა სივრცეში ელექტრული ველის დაძაბულობა იზრდება ($E_{\text{გ}}$), აქაც სრულდება იონიზაციის პირობა და ადგილი აქვს აირის მთლიან გარღვევას, მაგრამ ამ შემთხვევაში ($U_{\text{გა}}$) უფრო ნაკლებია, ვიდრე ერთგვაროვან ველში ელექტროდებს შორის ასეთივე მანძილის შემთხვევაში, ამიტომ პრაქტიკაში ყოველთვის ცდილობენ ერთგვაროვანი ველი შექმნან ან სხვადასხვა საშუალებით ველი გაათანაბრონ ე.ი. შეამცირონ ველის არაერთგვაროვნების კოეფიციენტი K , რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოთვლება

$$K = \frac{E_{\text{მაქს}}}{E_{\text{საშ}}} \quad (3-42)$$

ერთგვაროვანი ველისათვის $K=1$, სუსტად არაერთგვაროვან ველისათვის კი $K<2$, ხოლო ძლიერ არაერთგვაროვანი ველისათვის კი $K>4$. უმეტეს ელექტროტექნიკურ მოწყობილებებში $K<2$.

§ 3-22 აირადი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცის დამოკიდებულება გარეშე ფაქტორებზე

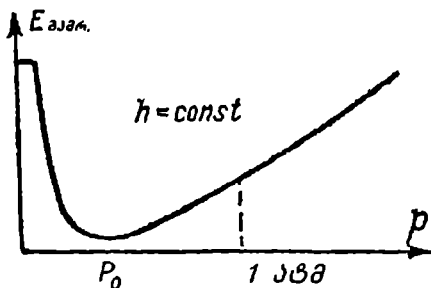
აირების ელექტრული სიმტკიცე როგორც ერთგვაროვან ასევე არაერთგვაროვან ველში ძირითადად დამოკიდებულია ელექტროდებს შორის მანძილზე (h), აირის წნევაზე (P), ტემპერატურაზე (t), ქიმიურ შემადგენლობაზე, გარეშე ელექტრული ველის სიხშირეზე (f) და ტენშემცველობაზე. განვიხილოთ თითოეული მათგანის გავლენა აირის $E_{\text{გა}}$ ან $U_{\text{გა}}$ სიდიდეზე, როდესაც დანარჩენი პარამეტრი უცვლელია ან მათი გავლენა უმნიშვნელოა.



ნახ. 3-23. ჰაერის $E_{გაგ}$ - ს დამოკიდებულება h - ზე შორის

ნახ. 3-23-ზე მოყვანილია ჰაერის ელექტროული სიმტკიცის დამოკიდებულება ელექტროდებს შორის მანძილზე (h), საიდანაც ჩანს, რომ h - ის მცირე მნიშვნელობისას h - ის შემცირებით $E_{გაგ}$ გაიზრდება, რაც მცირე მანძილების შემთხვევაში გარღვევის ჩამოყალიბების სირთულით აისხნება. ამ შემთხვევაში h და λ მიახლოებით ერთმანეთის ტოლია, ამიტომ თავისუფალი ელექტრონი ისე აღწევს მეორე ელექტროდს, რომ ადგილი არ აქვს მის დაჯახებას ნეიტრალურ ატომთან ე.ი. არ ხდება იონიზაცია. იონიზაციის აღბათობა რომ გაიზარდოს საჭიროა ველის მეტი დაძაბულობა ე.ი. იზრდება $E_{გაგ}$ - იც.

ელექტროდებს შორის დიდი მანძილების შემთხვევაში, სანამ ელექტრონი ელექტროდს მიაღწევს, მას ნეიტრალურ ატომებთან მრავალჯერადი დაჯახება უხდება. ამის გამო იონიზაციის აღბათობაც მეტია და $E_{გაგ}$ პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული h - ზე.



ნახ. 3-24. აირის $E_{გაგ}$ -ის დამოკიდებულება წნევაზე

ჰაერის ელექტრული სიმტკიცე რთულად არის დამოკიდებული წნევაზე (ნახ. 3-24) კერძოდ, თუ $P > P_0$, მაშინ წნევის გაზრდით $E_{გაგ}$ გაიზრდება, რადგან წნევის გაზრდა λ - ს შემცირებას იწვევს, ამის გამო იონიზაციის პირობა რომ შესრულდეს საჭიროა E - ს გაზრდა ე.ი. იზრდება $E_{გაგ}$, ზოგადად ამ უბანზე წნევის გაზრდით $E_გ$ - ის სიდიდე პროპორციულად იზრდება და

$$E_გ = \delta \cdot E_{გ0} \quad (3-42)$$

სადაც δ პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელიც წნევისა და ტემპერატურის გავლენას ითვალისწინებს $E_{გ0}$ და $U_{გაგ}$ სიდიდებზე.

$$\delta = 0,386 \frac{P}{1 + 273} \quad (3-43)$$

ნორმალურ წნევაზე და ტემპერატურაზე $\delta = 1$

როდესაც $P < P_0$, მაშინ აირი გაიშვიათებულია, λ -ს სიდიდე იმდენად დიდია, რომ მისი მნიშვნელობა ელექტროდებს შორის მანძილს შეესაბამება და ელექტრონი ისე აღწევს მეორე ელექტროდს, რომ ადგილი არ აქვს დაჯახებას. ამიტომ დაჯახების ალბათობა რომ გაიზარდოს საჭიროა ველის დაძაბულობის გაზრდა, რაც $E_{გაგ}$ ზრდას განაპირობებს.

ძალიან მცირე წნევების (ვაკუუმის) შემთხვევაში ($P < 10^{-5}$ მმ.ვწ.სე) აირი იმდენადაა გაიშვიათებული, რომ გარღვევას ელექტროდიდან ემისირებული ელექტრონების დენი განაპირობებს, ამიტომ $E_{გაგ}$ ფაქტიურად P - ზე დამოკიდებული არ არის და ასეთ აირებს მაღალი ელექტრული სიმტკიცე ახასიათებთ (50 კვ/მმ).

P_0 აირის ის წნევაა, რომელზედაც აირს მინიმალური ელექტრული სიმტკიცე ან მინიმალური გამრღვევი ძაბვა გააჩნია. მისი სიდიდე სხვადასხვა აირებისთვის 1-დან 18 მმ.ვწ.სე-მდე იცვლება

აირების ტენშემცველობის გაზრდით იონიზაციის ალბათობა იზრდება, შესაბამისად $E_{გაგ}$ მცირდება, ხოლო გარეშე ელექტრული ველის სიხშირის გავლენა აირების

ელექტრულ სიმტკიცეზე არაერთგვაროვან ველში უფრო მკვეთრად არის გამოხატული ვიდრე ერთგვაროვან ველში და თავს იჩენს ელექტრული ველის მაღალი სიხშირეების შემთხვევაში ($f > 10^5$ ჰერცი).

§ 3-23 თხევადი დიელექტრიკების გარღვევა

სითხეები ყოველთვის შეიცავენ მინარევებს მყარი, თხევადი და აირადი ნაწილაკების სახით, რის გამოც სუფთა სითხის მიღება გაძნელებულია, ეს კი სითხეების გარღვევის ერთიანი თეორიის შექმნას ართულებს.

მაღალი სისუფთავის თხევად დიელექტრიკებში გარღვევა ელექტროდიდან გამოსული ელექტრონის ველში აჩქარებით და აირების მსგავსად დარტყმითი იონიზაციით იწყება. რადგან ელექტრონის თავისუფალი განარბენის სიგრძე (λ) სითხეებში ნაკლებია ვიდრე აირებში, ამიტომ იონიზაციის პირობა რომ შესრულდეს (ფორმულა 3-40) და გარღვევა ჩამოყალიბდეს ველის მეტი დაძაბულობაა საჭირო. ე.ი. სუფთა სითხეები მეტი ელექტრული სიმტკიცით ხასიათდებიან, ვიდრე აირადი დიელექტრიკები.

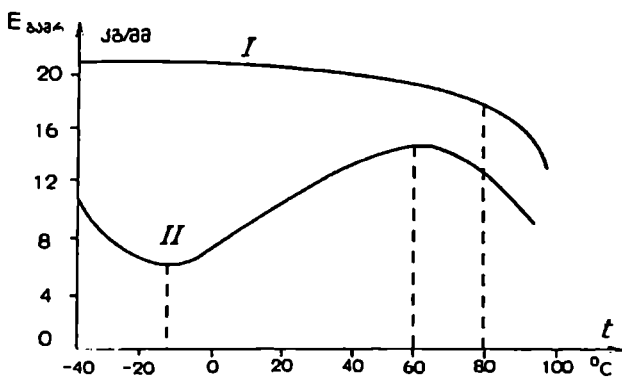
სითხეში ყოველთვის არსებობს მასში გახსნილი სხვადასხვა აირის ნაწილაკები, რომლებიც ან ატმოსფეროდან დიფუზიის გზით ან სითხის მოლეკულების ელექტროქიმიური დაშლის შედეგად წარმოიქმებიან. ორივე შემთხვევაში ისინი მიკრო ზომის ბუშტებად ერთიანდებიან. ველის მოქმედებით ასეთ ბუშტებში ადგილი აქვს აირის ნაწილაკების იონიზაციას, რაც ელექტროგამტარობის ზრდას და საბოლოოდ სითხის გარღვევას იწვევს.

თხევადი მინარევების სახით უმეტესად წყლის მოლეკულები გვევლინებიან, რომლებიც ნორმალურ პირობებში ზეთში არ იხსნებიან და მცირე ზომის წვეთებად არიან შეტივტივებული. ველის მოქმედებით წვეთში

მყოფი წყლის ძლიერ დიპოლური მოლეკულები ელექტროდებს შორის გამტარობის არხს წარმოქმნის, რომელშიც შემდეგ გარღვევის არხი ვითარდება. წყლის მცირე რაოდენობაც კი საგრძნობლად ამცირებს თხევადი დიელექტრიკების ელექტრულ სიმტკიცეს.

თუ თხევად დიელექტრიკებში მყარი მინარევების სახით მაღალი გამტარობის მასალის ნაწილაკები არიან (ლითონის ფხენილი, მური და სხვა), მაშინ ისინიც წყლის მოლეკულების მსგავსად იქცევიან და ელექტრულ სიმტკიცეს ამცირებენ. თხევადი დიელექტრიკის მინარევებისაგან გასუფთავება კი მის ელექტრულ სიმტკიცეს საგრძნობლად ადიდებს.

მინარევებიანი ან სუფთა თხევადი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცის სიდიდესე ტემპერატურა სხვადასხვა გავლენას ახდენს, კერძოდ ნახ. 3-25 - ზე მოყვანილია სატრანსფორმატორო ზეთის ელექტრული სიმტკიცის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ სუფთა გამომშრალი ზეთის (I მრუდი) ელექტრული სიმტკიცე $t=80^{\circ}\text{C}$ - მდე დამოკიდებული არ არის ტემპერატურაზე.



ნახ. 3-25. სატრანსფორმატორო ზეთის $E_{\text{გაბრ.}}$ -ის დამოკიდებულება t - ზე

ექსპლუატაციაში მყოფი - წყალშემცველი ზეთის (II მრუდი) ელექტრული სიმტკიცე ნორმალურ პირობებში ($t=20^{\circ}\text{C}$) უფრო ნაკლებია, ვიდრე სუფთა ზეთის. ტემპერატურის გაზრდით წყალი ემულსიური მდგომარეობიდან ხსნარში გადადის რის გამოც $E_{გაგ}$ იზრდება, აღწევს მაქსიმუმს და შემდეგ მცირდება.

ღაბალ ტემპერატურაზე $E_{გაგ}$ შემცირდება სითხიდან ყინულის მცირე ზომის კრისტალების გამოყოფით აიხსნება. ტემპერატურის შემდგომი შემცირებით $E_{გაგ}$ გაზრდა ზეთის სიბლანტის გაზრდითაა განპირობებული.

მყარი დიელექტრიკების გარღვევა

მყარი დიელექტრიკების აგებულების მრავალფეროვნება მათში ელექტრული გარღვევის სხვადასხვა მექანიზმებს განაპირობებს, ხოლო გარეშე ელექტრული ველის დაძაბულობის სიდიდე გარღვევის პროცესის ფორმირების ხანგრძლივობას განსაზღვრავს. ამის გამო ერთიანი დიელექტრიკში განსხვავებულ პირობებში გარღვევის სხვადასხვა მექანიზმებია მოსალოდნელი. ამ მექანიზმებიდან ძირითადად სამს გამოყოფენ: მიკროსკოპულად ერთგვაროვანი და არაერთგვაროვანი დიელექტრიკების ელექტრული გარღვევა; თბური ანუ ელექტროთბური გარღვევა და ელექტროქიმიური გარღვევა.

§ 3-24 მყარი დიელექტრიკების ელექტრული გარღვევა

ელექტრული გარღვევა დიელექტრიკზე ძაბვის მოქმედების დაწყებიდან 30 - 40 წამის განმავლობაში ხდება, ამიტომ დიელექტრიკში მიმდინარე თბური პროცესები ელექტროგამტარობა და დიელექტრიკული დანა-

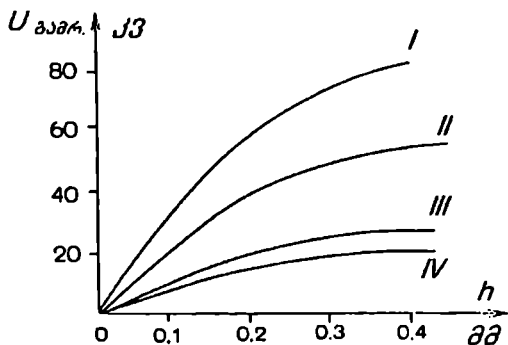
კარგები $E_{გაგ}$ -ს სიდიდეზე გავლენას ვერ ახდენს. ის დამოკიდებული არ არის გარემოს ტემპერატურაზე და იონიზაციის საწყისი დაძაბულობის მიღწევის შემდეგ გარღვევის ჩამოყალიბება ძალიან მკვირვ დროის განმავლობაში (10^{-5} - 10^{-3} წმ) ხდება.

მიკროსკოპულად ერთგვაროვან დიელექტრიკებში გამტარობის ელექტრონები ველში დაჯახებებს შორის λ მანძილზე აჩქარდებიან და თუ შეიძენენ ენერგიას, რომელიც დარტყმითი იონიზაციის მოსახდენად არის საკმარისი (ფორმულა 3-40), მაშინ ადგილი ექნება მყარი დიელექტრიკის ატომების იონიზაციას, რის გამოც დიელექტრიკში გარღვევის არხი წარმოიქმნება. მისი გავრცელების გზაზე მყარი დიელექტრიკის სტრუქტურა იშლება და აქროლადი აირები გამოიყოფა, რის გამოც ძაბვის მოხსნის შემდეგ გარღვევის კვალი ჩანს. აღსანიშნავია რომ, გარღვევის არხი ძირითადად მიკრო დეფექტებზე ვრცელდება.

რადგან მყარ დიელექტრიკებში ელექტრონის λ უფრო ნაკლებია ვიდრე სითხეებში და აირებში, ამიტომ იონიზაციის პირობა (ფორმულა 3-40), რომ შესრულდეს, ველის მეტი დაძაბულობაა საჭირო ე.ი. მყარ დიელექტრიკებს $E_{გაგ}$ -ს მეტი მნიშვნელობა გააჩნია ვიდრე სითხეებს და აირებს.

მყარი ერთგვაროვანი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცე არაერთგვაროვან ველში გაცილებით ნაკლებია ვიდრე - ერთგვაროვანში, რაც არაერთგვაროვან ველში ელექტროდის მახლობლად ნაწილობრივი იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი იონების დიელექტრიკის მოცულობაში გავრცელებით აიხსნება.

ამის საილუსტრაციოდ ნახ. 3-26 - ზე მოყვანილია ერთგვაროვანი ელექტროტექნიკური მინის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება ელექტროდებს შორის მანძილზე ერთგვაროვან (I) და არაერთგვაროვან (II) ველში.



ნახ. 3-26. ელექტროტექნიკური მიწის U_g - ს დამოკიდებულება სისქეზე.

თუ ელექტროტექნიკური მიწა არაერთგვაროვანია და აირის ჩანართებს შეიცავს, მაგრამ ერთგვაროვან ველშია მოთავსებული (III) ან მასზე არაერთგვაროვანი ველი მოქმედებს (IV), მაშინ აირის მოლეკულების იონიზაცია შედარებით ველის მცირე დაძაბულობაზე იწყება ვიდრე დიელექტრიკის მოლეკულების. იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი იონები მთელ მოცულობაში ვრცელდებიან რაც ველის ნაკლებ დაძაბულობაზე გარღვევის არხის ჩამოყალიბებას განაპირობებს, ამიტომ ასეთი დიელექტრიკის ელექტრული სიმტკიცე უფრო ნაკლებია ვიდრე იმავე დიელექტრიკის, რომელიც აირად ჩანართებს არ შეიცავს (I) და ნაკლებად არის დამოკიდებული ველის არაერთგვაროვნებაზე (III და IV მრუდების შედარება).

§ 3-25 მყარი დიელექტრიკების ელექტროტბური გარღვევა

მყარი დიელექტრიკების ელექტროტბურ ანუ თბურ გარღვევას ადგილი აქვს ელექტრული ველის ხანგრძლივი

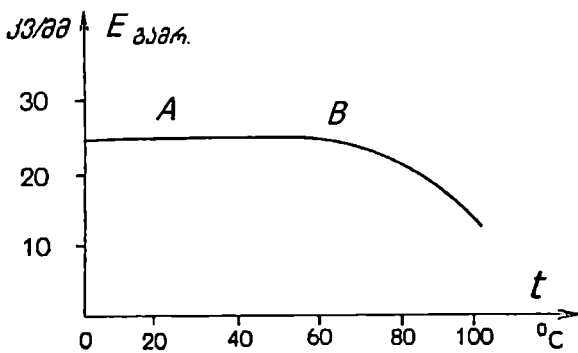
მოქმედებისას, როდესაც დიელექტრიკის მოცულობაში მიმდინარე თბური პროცესებით გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა (P) დიელექტრიკის მიკრომოცულობის ტემპერატურის გაზრდას იწვევს, რის გამოც მასში იონიზაციის პროცესი იწყება, იზრდება თავისუფალი ნაწილაკების რიცხვი და იონიზაცია თანდათანობით გავრცელდება მთელ მოცულობაში, ამიტომ გარღვევის არხის ფორმირება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მიმდინარეობს.

თუ დიელექტრიკის მოცულობაში გამოყოფილი სითბო P მეტია დიელექტრიკის მიერ გაცემული სითბოს რაოდენობას (Q), მაშინ დიელექტრიკის ტემპერატურა იმატებს, ხოლო თუ ნაკლებია დიელექტრიკის ტემპერატურა მცირდება. სითბური ბალანსის განტოლებიდან შეგვიძლია განვსაზღვროთ ძაბვის ის მნიშვნელობა, რომელზეც მოცემულ საიზოლაციო კონსტრუქციაში თბური გარღვევა იწყება.

$$P = Q \quad \text{ანუ} \quad U^2 \omega c t g \delta = \sigma S (t_{\text{გ}} - t_0) \quad (3-44)$$

სადაც U, C და $t g \delta$ დიელექტრიკის დანაკარგების მახასიათებელი სიდიდეებია, ხოლო t_0 და $t_{\text{გ}}$ გარემოს და დიელექტრიკის ტემპერატურებია, σ - დიელექტრიკის სითბოგაცემის კოეფიციენტი, S - კი მისი ფართი. ამ განტოლებიდან შეიძლება განისაზღვროს მოცემული ტემპერატურათა სხვაობის, კონკრეტული დიელექტრიკისათვის იმ ძაბვის სიდიდე, რომლის მოქმედებითაც შესაძლებელია თბური გარღვევა.

რადგან ელექტრულ ველში ელექტრონის მიერ შექმნილი ენერგია იონიზაციის (3-40) პირობას ვერ აკმაყოფილებს, ამიტომ სითბური გარღვევის არხის ჩამოყალიბების პროცესს ძირითადად თბური იონიზაცია განაპირობებს. ტემპერატურის გაზრდით თბური იონიზაციის ალბათობა იზრდება ე.ი. სითბური გარღვევისას ელექტრული სიმტკიცე დამოკიდებულია ტემპერატურაზე.



ნახ. 3-27. მყარი დიელექტრიკების $E_{\text{გამრ.}}$ - დამოკიდებულება t -ზე.

ნახ. 3-27-ზე მოყვანილია მყარი დიელექტრიკის $E_{\text{გამრ.}}$ - ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ ტემპერატურის მცირე მნიშვნელობისას (AB უბანი) $E_{\text{გამრ.}}$ არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე ე.ი. ადგილი აქვს ელექტრულ გარღვევას, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით ელექტრული სიმტკიცე მცირდება (BC უბანი), ანუ თავს იჩენს ელექტროტბური გარღვევა. აქედან გამომდინარე, ელექტროტბური გარღვევის ალბათობის შესამცირებლად აუცილებელია გაიზარდოს სითბოგადაცემა გარემოზე. ამ მიზნით დიელექტრიკის ზედაპირის ფართს ადიდებენ.

მყარი არაერთგვაროვანი დიელექტრიკების მიკრომოცულობაში გამოყოფილი სითბოს გამო მიკრომოცულობის ტემპერატურა შესაძლებელია გაცილებით მეტი იყოს ვიდრე დიელექტრიკის საშუალო ტემპერატურა. ამით მიკრომოცულობაში თბური გარღვევის განვითარების ხელსაყრელი პირობები იქმნება.

ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებს ნაკლები სითბოგამტარობა გააჩნით ვიდრე არაორგანულს, ამიტომ თბური გარღვევის მოვლენა უფრო ძლიერ ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებშია გამოხატული.

§ 3-26 მყარი დიელექტრიკების ელექტროქიმიური გარღვევა

მყარი დიელექტრიკების ელექტროქიმიური გარღვევა ანუ დიელექტრიკის დაძველება ძირითადად დიელექტრიკში აირჩანართებითაა განპირობებული.

აირად ჩანართებში ცვლადი ძაბვის მოქმედებით ადგილი აქვს იონიზაციას, რის გამოც ველში აჩქარებული იონიზირებული ნაწილაკები დიელექტრიკის შედარებით უჯახებიან და მის დაშლას იწვევენ. დაშლის პროდუქტები აირის სახით გამოიყოფიან, რის შედეგად ადგილი აქვს მიკრომოცულობის ქიმიური შემადგენლობის ცვლილებას. ამ პროცესის ინტენსივობა ელექტროგამტარობის და დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდის ხარჯზე თანდათანობით იზრდება და საბოლოოდ დიელექტრიკი მუშა ძაბვაზე ირღვევა.

ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში ნაწილობრივი განმუხტვა პოლიმერული მოლეკულის შეუქცევად დაშლას იწვევს, ხოლო არაორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში, რომლებიც უმეტესად იონური სტრუქტურის მქონე უანგეულებს წარმოადგენენ იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი იონები ველის მიმართულების შეცვლისას მოძრაობის მიმართულებას იცვლიან. ამის გამო დაშლილი მოლეკულების რიცხვი ცვლადი ძაბვის მოქმედებისას არაორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში გაცილებით ნაკლებია ვიდრე ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში. აქედან გამომდინარე ცვლადი ძაბვის მოქმედებით დაძველების პროცესი ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში გაცილებით ინტენსიურად მიმდინარეობს, ვიდრე არაორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში.

მეორე მხრივ ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში მუდმივი ძაბვის მოქმედებით გამოწვეულ ელექტროგამტარებლობას თავისუფალი ელექტრონების ან მინარეული იონების მოძრაობა განაპირობებს, ხოლო სტრუქტურიდან იონების ამოგლეჯვას ადგილი არ აქვს.

არაორგანული წარმოშობის დიელექტრიკები, იონური აგებულების უანგეულებს წარმოადგენენ, რომელთა ელექტროგამტარობა კვანძებიდან ამოგლეჯილი სუსტად ბმული იონების მოძრაობითაა განპირობებული, რაც მიკრომოცულობის ქიმიური შემადგენლობის ცვლილებას იწვევს. ე.ი. მუდმივი ძაბვის მოქმედებით ელექტროქიმიური დაძველების პროცესი უფრო ინტენსიურად ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალებში მიმდინარეობს ვიდრე არაორგანულში.

მყარი დიელექტრიკების ელექტროქიმიური გარღვევა ანუ დაძველება მსგავსად თბური გარღვევისა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ყალიბდება, მაგრამ თბური გარღვევისაგან განსახვევებით მიკრომოცულობის ქიმიური შემადგენლობა იცვლება.

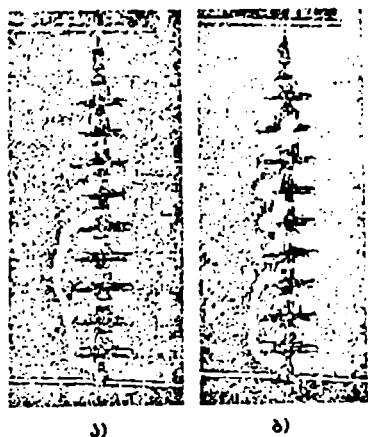
§ 3-27 მყარი დიელექტრიკების ზედაპირული გარღვევა

მყარი დიელექტრიკების ზედაპირული ელექტროგამტარობის შესწავლისას დავადგინეთ, რომ დიელექტრიკის ზედაპირზე მიმდინარე მოვლენები არა მარტო დიელექტრიკის ზედაპირის მდგომარეობითაა განპირობებული არამედ მასზე საგრძნობ გავლენას დიელექტრიკის გარემომცველი ატმოსფერო ახდენს.

ჰაერის ტენიანობა დიელექტრიკის ზედაპირზე დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვს საგრძნობლად ადიდებს, ამით მყარი დიელექტრიკისა და ჰაერის გამყოფ საზღვარზე იონიზაციის დაწყების ხელსაყრელი პირობა იქმნება, რასაც *ზედაპირულ გარღვევამდე* ანუ *ზედაპირულ გადაფარვამდე* მივყავართ. (ნახ. 3-28.).

ზედაპირული გარღვევა დიელექტრიკის მიერ ელექტროსაიზოლაციო თვისების სრულ დაკარგვას არ იწვევს, მაგრამ გარღვევის არხში გამოყოფილი დიდი რაოდენობის სითბოს ზემოქმედებით ზედაპირზე მაღალი

გამტარობის არხი წარმოიქმნება, რაც შემდგომი ზედაპირული გარღვევის ჩამოყალიბების ხელსაყრელ პირობას ქმნის. ხშირია შემთხვევა, როდესაც ზედაპირული გადაფარვის შედეგად იზოლატორი იმდენად ზიანდება, რომ მისი ექსპლუატაცია შეუძლებელია.



ნახ. 3-28. მყარი დიელექტრიკის ზედაპირული გარღვევა. გაჭუჭყიანებული (ა) და ძლიერ გაჭუჭყიანებული (ბ).

სოგიერთ საიზოლაციო კონსტრუქციებში ზედაპირული გარღვევის ძაბვა უფრო ნაკლებია, ვიდრე ამავე მანძილზე ჰაერის გამრღვევის ძაბვა. ამ მოვლენის ერთ-ერთ მიზეზს ზედაპირის მახლობელ ფენაში ველის ერთგვარონების დარღვევა წარმოადგენს, რაც ზედაპირზე ადსორბირებულ ტენში იონიზაციის ხელსაყრელ პირობებს ქმნის.

ელექტრული ველის დაძაბულობის გათანაბრების მიზნით მაღალი ძაბვის (330 კვ-ზე მეტი) იზოლატორებს და ძაბვის შემყვანებს მაღალი პოტენციალის მხარეს ველის გამათანაბრებელ სპეციალურ ეკრანებს უყენებენ. ამასთან ერთად გეომეტრიულ ფორმას ისეთ სახეს აძლევენ, რომ სიმაღლის შეუცვლელად ზედაპირზე დენის

გაუონვის მანძილი გაზარდოს.

ატომოსფერული ტენის ან ჭუჭყისაგან დაცვის მიზნით გასუფთავებული იზოლატორის ზედაპირს *ჰიდროფობული* პასტებით ფარავენ რაც ზედაპირს წყალში არასველებადობის უნარს ანიჭებს და გადამ-ფარავი ძაბვის სიდიდე საგრძნობლად იზრდება.

დიელექტრიკების არაელექტრული თვისებები

საიზოლაციო კონსტრუქციებში მასალათა შერჩევას გათვალისწინებული უნდა იყოს ელექტრული თვისებების ცვლილება გარეშე ფაქტორების ხანგრძლივი მოქმედებით, როგორცაა: გარემოს ტენიანობა, მაღალი ან დაბალი ტემპერატურა, აგრესიული გარემო, ვიბრაცია, მექანიკური დაძაბულობა, მაიონიზირებელი გამოსხივება და სხვა. ასევე გასათვალისწინებელია საერთო ფიზიკო-ქიმიური მახასიათებლები, კუთრი წონა, სიბლანტე, მექანიკური სიმტკიცე, სითბოტევადობა, სითბოგამტარობა, სითბოგაფართოების კოეფიციენტი და სხვა.

ამ პარამეტრების ნაწილი სიმკვრივე, სიბლანტე, მექანიკური თვისებები და სხვა შეისწავლება მასალათამცოდნეობისა და მასალათაგამძლეობის კურსში.

§ 4-1 დიელექტრიკების ტენმედუგობა

ელექტროსაიზოლაციო მასალები მეტნაკლებად ჰიგროსკოპულები არიან ე.ი. გარემოსაგან ტენის შთანთქმის უნარი გააჩნიათ და გარკვეული სიდიდის ტენგამტარობით ხასიათდებიან, ანუ მათი მუცულობაში გარკვეული სიდიდის ტენი გაივლის.

ატმოსფერული ჰაერი ყოველთვის შეიცავს გარკვეული რაოდენობის წყლის ორთქლს, რასაც ტენს უწოდებენ და ტემპერატურის ცვლილებით მისი რაოდენობა იცვლება.

ტენის იმ მაქსიმალურ რაოდენობას (m_{max}), რომელიც შეიძლება არსებობდეს მოცემულ ტემპერატურაზე 1მ^3 ჰაერში *აბსოლიტურ ტენიანობას* უწოდებენ, მასზე მეტი ტენი ატმოსფეროში არ იარსებებს, ის ნამის სახით

გამოიყოფა. ტემპერატურის გაზრდით აბსოლიტური ტენიანობა სწრაფად იზრდება. ნორმალურ წნევაზე და ტემპერატურაზე ($t = 20^{\circ}\text{C}$ და $P = 1$ ატმ) ჰაერის აბსოლიტური ტენიანობა 17.3 გრ/მ³ - ია.

ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა φ წარმოადგენს მოცემულ პირობებში ტენშემცველობისა და აბსოლიტური ტენიანობის ფარდობას გამოხატულს პროცენტებში

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{ა}}} \cdot 100\% \quad (4-1)$$

ელექტროსაიზოლაციო მასალებისათვის ნორმალური პირობებია, როდესაც გარემოს ტემპერატურა 20°C , წნევა 1 ატმოსფერო და ფარდობითი ტენიანობა 65% - ია. ამ შემთხვევაში 1მ^3 ჰაერში $11,25$ გრამი წყალია.

წყალი ძლიერ დიპოლურ დიელექტრიკს წარმოადგენს, რომლის $\epsilon_r \approx 81$ და $\rho = 10^3 \div 10^4$ ომი.მ. ამასთანავე წყლის მოლეკულებს მცირე გეომეტრიული ზომები გააჩნიათ ($d = 2,7 \cdot 10^{-8}$ მ). ამიტომ დიფუზიის გზით ისინი ადვილად აღწევენ მყარი ნივთიერებების მოცულობაში და ცვლიან მის ელექტრულ თვისებებს, კერძოდ მცირდება კუთრი წინააღმდეგობა და იზრდება ϵ . ეს პროცესები გარემოს ტემპერატურისა და ტენიანობის გაზრდით ძლიერდება. ამ მოვლენების გასათვალისწინებლად აუცილებელია შევისწავლოთ დიელექტრიკების ტენშედწვეადობა, ტენგამტარობა, ზედაპირის წყალში სველებადობის უნარი და სხვა.

ტენშედწვეადობა ერთ - ერთ მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს იმ დიელექტრიკებისათვის, რომლებიც კაბელების, კონდენსატორების, კომპაუნდების დასამზადებლად გამოიყენებიან. ნებისმიერ მასალებში (გარდა მინა, კერამიკა, მეტალები) ყოველთვის არსებობს მცირე ზომის ფორები, რომლის საშუალებითაც წყლის მოლეკულები მოცულობაში აღწევენ. ამიტომ S (მ²) ფართობის და h (მ) სისქის მქონე დიელექტრიკში დროის τ (წმ) განმავლობაში გავლილი წყლის რაოდენობა m (კგ),

როდესაც დიელექტრიკის გვერდებს შორის $P_1 - P_2$ წნევათა სხვაობა შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

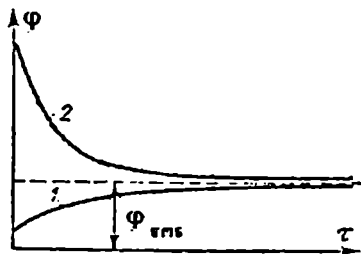
$$m = \Pi \frac{(P_1 - P_2)}{h} S\tau \quad \text{ან} \quad \Pi = \frac{mh}{(P_1 - P_2)S\tau}, \quad (4-2)$$

სადაც Π ტენგამტარობის კოეფიციენტია და დამოკიდებულია დიელექტრიკის აგებულებაზე, ტემპერატურაზე, სტრუქტურაზე და სხვა. წყალში არასველებადი დიელექტრიკებისთვის Π -ს მნიშვნელობა იმდენად მცირეა, რომ დიელექტრიკის მოცულობაში ტენის შეღწევა პრაქტიკულად არ ხდება.

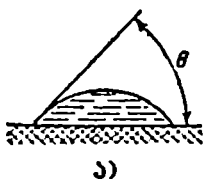
მასალაში წყლის მოლეკულების დიფუზიით მოცულობაში ტენიანობა იზრდება (ნახ. 4-1 I მრუდი). თუ გარემოს ტენშემცველობას შემცირებთ ტენი მასალიდან გარეთ გამოდის

(ნახ. 4-1 II მრუდი), მაშინ ადგილი აქვს შრობას. ორივე ეს პროცესი ერთმანეთს თერმოდინამიურ წონასწორობაში იმყოფება და საბოლოოდ წონასწორული ტენშემცველობა მყარდება, რასაც *ჰიდროსკოპულობას* უწოდებენ ($\varphi_{\text{ნომ}}$). ფოროვანი და ბოჭკოვანი მასალები მეტად ჰიდროსკოპულები არიან ვიდრე პლასტმასები და მინა.

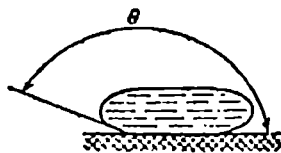
სითხის წვეთის მიერ ზედაპირთან შექმნილი



ნახ. 4-1 ტენშემცველობის ცვლილება დატენიანებისას (1) და შრობისას (2)



ა)



ბ)

ნახ. 4-2 ზედაპირი სველებადია (ა), არასველებადია (ბ)

კუთხის სიდიდე (θ) (ნახ. 4-2) ზედაპირის სითხით სველებადობის უნარს ახასიათებს. თუ $\theta < 90^\circ$ მაშინ ზედაპირი მოცემულ სითხეში სველებადია (ნახ. 4-2 ა) და რაც პატარაა θ ზედაპირი მით მეტად სველებადია. როდესაც $\theta > 90^\circ$ მაშინ ზედაპირი სითხეში არასველებადია.

სითხეში სველებადი დიელექტრიკის ელექტრული მახასიათებლები უფრო მეტად იცვლებიან ტენიან გარემოში მოთავსებისას ვიდრე არასველებადის.

§ 4-2 დიელექტრიკების სითბური თვისებები

ტემპერატურა დიელექტრიკის ყველა ელექტრულ პარამეტრზე ახდენს გავლენას, ამიტომ მნიშვნელოვანია დიელექტრიკის თბური თვისებების შესწავლა, რომელთაგან აღსანიშნავია: სითბოგამტარობა, სითბოტევადობა, სითბოგაფართოების კოეფიციენტი, სითბომდეგობა, ცივმდეგობა და სხვა.

ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკის მოცულობაში გამოყოფილი სითბო გარემოს გადაეცემა, ამიტომ დიელექტრიკს კარგი სითბო გამტარობის უნარი უნდა ჰქონდეს. ცნობილია, რომ ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებს მცირე სითბოგამტარობა აქვთ და $\gamma_T < 0,7$ ეტ/მ.კ. არაორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებისათვის კი $\gamma_T > 80$ ეტ/მ.კ.

საიზოლაციო კონსტრუქციის სითბოგადაცემის გაზრდის მიზნით, მის დასამზადებლად კარგი სითბოგამტარობის მქონე დიელექტრიკულ მასალებს იყენებენ ან ხელოვნურ გაცივებას მიმართავენ.

ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებს უფრო დიდი სითბოგაფართოების კოეფიციენტი აქვთ, ვიდრე - არაორგანული წარმოშობისას, ამიტომ ამ უკანასკნელის გეომეტრიული ზომები ტემპერატურის ცვლილებით ნაკლებად იცვლება.

სითბომედევობა არის დიელექტრიკის თვისება მასზე ტემპერატურის ხანგრძლივი მოქმედებით საგრძნობლად არ შეიცვალოს ელექტროსაიზოლაციო და მექანიკური თვისებები. ამ მოთხოვნით განისაზღვრება დიელექტრიკის საექსპლუატაციო მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა, რომლის საფუძველზე საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის რეკომენდაციის შესაბამისად სითბომედევობის შემდეგი კლასებია დადგენილი.

Y კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 90°C არ აღემატება. მიეკუთვნებიან ორგანული წარმოშობის ბოჭკოვანი მასალები - ცელულოზა, აბრეშუმი, ქაღალდი და სხვა, როდესაც ისინი გაჟღენთილი არ არიან ან არ იმყოფებიან საიზოლაციო სითხეებში.

A კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 105°C . ამ კლასს მიეკუთვნება იგივე მასალები რაც *Y* კლასს, თუ ისინი გაჟღენთილი არიან ან ჩაშვებულა საიზოლაციო სითხეებში. აგრეთვე ამ კლასს პოლიამიდური ფისები მიეკუთვნებიან.

E კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 120°C - ია. ამ კლასს მიეკუთვნებიან ორგანულშემავსებლიანი პლასტმასები, გეტინაქსი, ტექსტოლიტი, პოლიეთილენტერაფტალატის აფსკი, ეპოქსიდური, პოლიეთერული და პოლიურეთანის ფისები, კომპაუნდები და სხვა.

ამგვარად, ზემოთ აღნიშნულ კლასებში მხოლოდ ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალები გვხვდება. მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურის გაზრდით კი არაორგანული წარმოშობის მასალების წილი იზრდება, რაც მათი მაღალი სითბომედევობით აიხსნება.

B კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 130°C - ია. მიეკუთვნება ორგანული წარმოშობის მასალებით გაჟღენთილი ან შეწებებული არაორგანული წარმოშობის მასალები. მაგალითად: ქარსი, მინაბოჭკო, აზბესტი და სხვა.

F კლასი - მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა 155°C - ია. მიეკუთვნებიან არაორგანული წარმოშობის მასალები

შეწებებული მაღალტემპერატურული ორგანული მასალებით, კერძოდ პოლიეთერული და სილიციუმორგანული ფისები.

H კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 180°C - ია. ამ კლასს იგივე მასალები მიეკუთვნება რაც F კლასს, მაგრამ შემაკავშირებლად გამოყენებულია საგანგებოდ მაღალტემპერატურული სილიციუმორგანული ფისები.

C კლასი - მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა 180°C - ზე მეტია. მას მიეკუთვნება სუფთა არაორგანული წარმოშობის მასალები, შემწვებაებისა და გამჟღავნების გარეშე, როგორებიცაა: ქარსი, მინა მინაქსოვილი, კვარცი, კერამიკა, ფაიფური, აზბესტი და სხვა. აგრეთვე ამ კლასს მიეკუთვნება ორგანული წარმოშობის ფთოროპლასტი - 4 და პოლიიმიდური მასალები.

ცივიმდეგობა არის მასალის თვისება დაბალი ტემპერატურის მოქმედებისას არ შეიცვალოს საექსპლუატაციო თვისებები. ელექტროსაიზოლაციო მასალების ტემპერატურის შემცირებით თითქმის ყველა ელექტრული პარამეტრის გაუმჯობესებას აქვს ადგილი, მაგრამ თვით მასალა მყიფე და ბლანტი ხდება.

§ 4-3 დიელექტრიკების ქიმიური თვისებები და რადიაციის მიმართ მდგრადობა

ექსპლუატაციისას დიელექტრიკზე ელექტრული ველისა და ტემპერატურის გარდა გარკვეულ მოქმედებას გარემოში არსებული აგრესიული ნივთიერებები ახდენენ, რომლებიც დიელექტრიკის ზედაპირის დაშლას და კოროზიას იწვევენ.

სამრეწველო საწარმოების მიერ ატმოსფეროში გამოყოფილი ზოგიერთი ნივთიერებების ჟანგულები წყლის მოლეკულებთან ურთიერთქმედებისას ძლიერ მომქმედ

მეავეებს (აზოტმეავეა, გოგირდმეავეა და სხვა) წარმოქმნიან, რომლებიც დიელექტრიკის ზედაპირს ქიმიურად შლიან. ამ მოქმედების შესაფასებლად საიზოლაციო მასალები ლაბორატორიულ პირობებში აგრესიული გარემოს მიმართ მდგრადობაზე წინასწარ გამოცდას გადაიან.

ატმოსფეროში მყოფი ჭუჭყის ნაწილაკები, რომლებიც ჰაერში შეტივტივებული არიან, დიელექტრიკის ზედაპირზე მოხვედრისას ელექტრულ ველში პოლარიზდებიან და დიელექტრიკის ზედაპირთან გარკვეული სახის ქიმიურ კავშირს ამყარებენ. დროთა განმავლობაში ისინი ზედაპირთან ცემენტაციას განიცდიან, ხოლო ტენის მოქმედებით ზედაპირულ გამტარებლობას იმდენად ზრდიან, რომ იზოლატორის ზედაპირული გადაფარვა მუშაობაზე ხდება.

აგრესიული გარემოს ზემოქმედება საგრძნობლად აძლიერებს იზოლატორის ზედაპირზე მიმდინარე ნაწილობრივ განმუხტვებს.

თანამედროვე ელექტრონული მოწყობილობები სხვადასხვა სახის მაიონიზირებელი გამოსხივების მოქმედებისას განიცდიან, გავლენას ახდენს დიელექტრიკის თითქმის ყველა ელექტრულ პარამეტრზე. კერძოდ საგრძნობლად იზრდება დენის მატარებლების კონცენტრაცია, მნიშვნელოვნად მცირდება წინააღმდეგობა და ელექტრული სიმტკიცე.

დიელექტრიკებისათვის მაიონიზირებელ გამოსხივებას მიეკუთვნება ისეთი გამოსხივება, რომელსაც დიელექტრიკში დენის მატარებელი ნაწილაკების წარმოქმნა ან ქიმიური კავშირების გაწყვეტა შეუძლია. ასეთებია α , β და γ სხივები, რენტგენის და ულტრაიისფერი გამოსხივება და სხვა.

თუ მათი ინტენსივობა ან მოქმედების ხანგრძლივობა მცირეა, მაშინ დიელექტრიკის ელექტრული პარამეტრები საგრძნობ ცვლილებას არ განიცდის, ამიტომ რადიაციის მიმართ მდგრადობის დასახასიათებლად შემოჰყავთ გამოსხივების ის მაქსიმალური დოზა, რო-

მელიც ხანგრძლივი მოქმედებისას დიელექტრიკის ელექტრული მახასიათებლების საგრძნობ ცვლილებას არ იწვევს.

დიელექტრიკზე დიდი ინტენსივობის მაიონიზირებელი გამოსხივების მოქმედებისას გაჟონვის დენის სიდიდე ნახტომისებურად იზრდება, ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებში კი დაძველების პროდუქტები აირები გამოიყოფა. რის გამოც გარღვევის ფორმირება ადვილად ხდება.

მაღალი ენერჯიის და დიდი ინტენსივობის მაიონიზირებელი გამოსხივების მოქმედებით ორგანული დიელექტრიკები დესტრუქციას განიცდიან და მექანიკურ სიმტკიცეს კარგავენ.

დიელექტრიკული მასალები

§ 5-1 დიელექტრიკების კლასიფიკაცია

დიელექტრიკული მასალების ძირითადი დანიშნულებაა ელექტრული იზოლაციის შექმნა ელექტროტექნიკურ დანადგარში, ამის გამო მათ ელექტროსაიზოლაციო მასალებსაც უწოდებენ.

ელექტრული იზოლაცია ელექტრულად განცალკევებს სხვადასხვა პოტენციალის მქონე დენგამტარ ნაწილებს და მისი ძირითადი დანიშნულებაა მაქსიმალურად შეზღუდოს ელექტრული დენის გავლა დანადგარის იმ ნაწილში, სადაც გათვალისწინებული არ არის. გარდა ამისა ელექტრული იზოლაცია ადამიანს იცავს ელექტროტექნიკური დანადგარის დენგამტარ ნაწილებზე მოდებული ძაბვის უშუალო ზემოქმედებისაგან. ამიტომ წარმოუდგენელია თუნდაც უმარტივესი ელექტროტექნიკური ხელსაწყოს მუშაობა ელექტრული იზოლაციის გარეშე.

ხელსაწყოს შესაქმნელად გამოყენებული ელექტროსაიზოლაციო მასალისათვის ცნობილი უნდა იყოს ელექტრული და არაელექტრული მახასიათებელი სიდიდეები და მათი ცვლილების ხასიათი გარეშე ფაქტორების ცვლილებისას.

ელექტროსაიზოლაციო მასალები აგრეგატული მდგომარეობის ან ქიმიური თვისებების მიხედვით კლასიფიცირდებიან.

აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით ანსხვავებენ: აიროვან, თხევად და მყარ მასალებს. განსაკუთრებულ ჯგუფს გამყარებადი ელექტროსაიზოლაციო მასალები მიეკუთვნება, რომლებიც ელექტრული იზოლაციის დამზადებამდე სითხეები არიან, ხოლო დამზადების შემდეგ - გამყარდებიან. ასეთ მასალებს ელექტროსაიზოლაციო ლაქები და კომპაუნდები მიეკუთვნებიან.

კუთვნიებიან.

ქიმიური თვისებების მიხედვით ანსხვავებენ ორგანული და არაორგანული წარმოშობის ელექტროსაიზოლაციო მასალებს. როგორც ვიცით, ორგანული ნივთიერებების შემადგენლობაში სხვადასხვა ქიმიურ ელემენტებთან ერთად ნახშირბადი შედის. ამ ნივთიერებათა დიდი ნაწილი კარგი მექანიკური თვისებებით, დრეკადობით და ელასტიურობით ხასიათდება. რომელთაგან შეიძლება დამზადდეს უწერილესი ბოჭკო, თხელი ფირები და რთული კონსტრუქციის დეტალები, მაგრამ ორგანული წარმოშობის ნივთიერებებს დაბალი სითბომედეგობა გააჩნია.

არაორგანული წარმოშობის ნივთიერებებს სითბომედეგობის მაღალი ტემპერატურა ახასიათებთ. უმრავლესი მათგანი საკმაოდ მყიფეა და მათი ტექნოლოგიურად დამუშევა გაძნელებულია, მაგრამ გაცილებით მაღალი მექანიკური თვისებები აქვთ, ვედრე ორგანული წარმოშობის ნივთიერებებს.

ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში გამოყენებული ელექტროსაიზოლაციო მასალათა რიცხვი რამოდენიმე ათეულ ათასს აჭარბებს, რომელთა სრულად აღწერა-პრაქტიკულად შეუძლებელია, მაგრამ განვიხილავთ იმ ელექტროტექნიკურ მასალებს რომლებიც მასიურად გამოიყენებიან.

§ 5-2 აიროვანი დიელექტრიკული მასალები

აიროვანი დიელექტრიკებიდან ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ მასალად ჰაერი ითვლება. ის ჩვენგან დამოუკიდებლად ბუნებრივი ელექტროსაიზოლაციო მასალაა და მისი უგულუბელყოფა პრაქტიკულად შეუძლებელია. მთელ რიგ ელექტრონულ მოწყობილობებში, ჰაერი მყარ იზოლაციასთან ერთად ელექტროსაიზოლაციო

სისტემას ქმნის.

ჰაერის ელექტრული მახასიათებელი სიდიდეები საკმაოდ ფართოდ განვიხილეთ წინა თავებში და მისი გამეორება მიზანშეწონილად არ მიგვაჩნია. ხშირ შემთხვევაში ჰაერი შეიძლება უკეთესი თვისებების მქონე ელექტროსაიზოლაციო აირებით შეიცვალოს.

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ჰაერის გარდა აზოტი (N_2), წყალბადი (H_2), ჰალოგენებშემცველი და დაბალი ელექტრული სიმტკიცის მქონე სხვა ინერტული აირები გამოიყენებიან.

ელექტროსაიზოლაციო აირების ძირითადი მახასიათებელი სიდიდეები

ცხრ. 5-1.

მახასიათებლები	ჰაერი	აზოტი N_2	წყალბადი H_2	ელბაზი SF_6	ფორი CCl_2F_2	პერყვიორირებული ნახშირწყალბადები C_xF_y
კუთრი წონა [კგ/მ ³]	1,293	1,25	0,09	6,7	6,33	18÷30
სითბოგამტარობა [კვტ/მK]	24	24	166	0,01	-	-
სითბოტევადობა [კჯ/კგK]	1,005	1,06	14,2	0,62	-	-
ϵ_r - დიელექტრიკული შეღწევადობა	1,0006	1,0006	1,0003	1,0019	1,0016	1,001÷1,005
ρ - კუთრი წინაღობა [ომ მ]	10^{15}	10^{15}	10^{13}	10^{14}	10^{14}	10^{14}
ღებ-დიელექტრიკული დანაკარგები	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
$E_{ბ.ა.}$ - ელექტრული სიმტკიცე [კვ/მმ]	3,0	2,7	1,8	7,5	6÷7	18÷30

ელექტრულ მანქანებში ჰაერი წარმოადგენს გამაგრილებელ საშუალებას, მისი მეშვეობით დენგამტარ ნაწილებში გამოყოფილი სითბო ბუნებრივი ან ხელოვნური (კირკულაციით გამოიტანება ატმოსფეროში. დიდი სიმძლავრის მანქანებში, მაგ. ტურბოგენერატორებში ჰაერის თბური მახასიათებლები ვერ აკმაყოფილებს ეფექტურ გაგრილებას, ამიტომ მას ცვლიან წყალბადით, რომელსაც 7 - ჯერ მეტი სითბოგამტარობა და 14 - ჯერ

მეტი სითბოტევადობა აქვს, მაგრამ ფეთქებად საშიშია და მისი გამოყენება გარკვეულ სირთულეებთანაა დაკავშირებული.

ზოგიერთ ელექტროტექნიკურ დანადგარში ჰაერის გამოყენება დაუშვებელია, რადგან მასში შემავალი უანგბადი ხელს უწყობს დეტალების დაუანგვას და დაშლას, განსაკუთრებით მაღალი ძაბვის ზემოქმედებისას, ამიტომ ჰაერი იკვლება თითქმის იგივე მახასიათებლების მქონე ნეიტრალური აირით - აზოტით.

მაღალი დიელექტრიკული თვისებებით ხასიათდებიან *ჰალოგენშემცველი* აირები, მათი იონიზაცია საკმაოდ ძნელია, ამის გამო მაღალი ძაბვის ბევრ დანადგარში ისინი წარმატებით ცვლიან არა მარტო ჰაერს, არამედ - თხევად იზოლაციასაც. ასეთ აირს მიეკუთვნება SF₆ ანუ ელექტროტექნიკური აირი - *ელეგანზი*. იგი 6 - ჯერ მძიმეა ჰაერთან შედარებით და მისი ელექტრული სიმტკიცე 2.5 - ჯერ მეტია, კარგად იკუმშება 10 ატმოსფეროდე და ელექტრული სიმტკიცე 10÷12კვ/მმ აღწევს. ის ხშირად გამოიყენება მაღალი ძაბვის ძალოვანი ამომრთველების და სხვადასხვა აპარატურების შესავსებად.

ყურადღებას იმსახურებს აგრეთვე ნახშირწყლები, რომელთა მოლეკულებში წყალბადის ატომები შეცვლილია ფთორის ატომებით, საერთო ქიმიური ფორმულით C_xF_y და მათ *პერფთორირებულ ნახშირწყლებს* უწოდებენ (CF₄, C₃F₆, C₄F₈, C₄F₁₀). მათი ელექტრული სიმტკიცე 6-10-ჯერ მეტია ჰაერზე, ამიტომ ისინი მაღალი ძაბვის სპეციალური მოწყობილობების შესავსებად გამოიყენებიან.

ინერტული აირები არგონი, ნეონი, კრიპტონი და ქსენონი ძალიან დაბალი ელექტრული სიმტკიცეებით ხასიათდებიან. ამიტომ ისინი ელექტრო - ვაკუუმური ხელსაწყოების, აირგანმუხტვის მილაკების ლუმინესენციური ნათურების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

§ 5-3 ნავთობის ელექტროსაიზოლაციო ზეთები

ნავთობის ელექტროსაიზოლაციო ზეთები პარაფინული, ნაფტენური და არომატული ნახშირწყალბადების ნარევეს წარმოადგენენ და ნავთობის ფრაქციული გამოხდით მიიღებიან. ჯერ გამოიხდება მსუბუქი ფრაქციები: ბენზინი, ლიგროინი, ნავთი და დი'სელის საწვავი, ხოლო დარჩენილი მძიმე ფრაქციიდან გამოიყოფა სოლიარის დისტილატი, რომლისგანაც 300 - 400°C ტემპერატურაზე ნავთობის ზეთის ნახევარფაბრიკატი გამოიყოფა, ამ უკანასკნელისგან ელექტროსაიზოლაციო ზეთების მისაღებად მისი შემდგომი ფიზიკო - ქიმიური გადამუშავება ხდება.

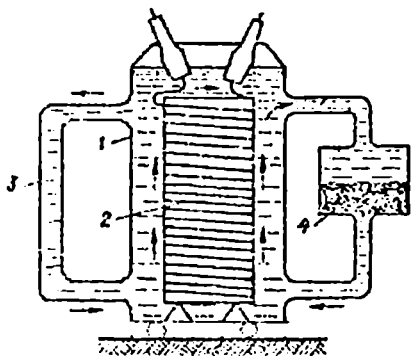
იმისდა მიხედვით, თუ როგორი წარმოშობისაა ნავთობნედლეული და როგორი დანიშნულების საიზოლაციო ზეთებია მისაღები, ანსხვავებენ: მუავეურ - ტუტოვან, კარბამიდულ, ადსორბციულ, სელექტიურ და სხვა სახის გადამუშავება - გაწმენდას.

ქიმიური გადამუშავების შემდეგ მასში ქიმიური რეაქციის ნარჩენები რჩება. მათი ზეთიდან მოცილება წყლის საშუალებით ხდება ("წყლით გარეცხვა"), ხოლო ზეთიდან წყლის მოცილებას კი სპეციალური დანადგარებით ახდენენ.

თვისებებისა და გამოყენების მიხედვით ანსხვავებენ ტრანსფორმატორის, საკონდენსატორო და საკაბელო ზეთებს.

ტრანსფორმატორის ზეთი ღია ყვითელი ფერიდან მუქი ყავისფერი, ნეიტრალური სითხეა. ის ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ტრანსფორმატორების ავზის შესავსებად, სადაც მას ორი დანიშნულება აქვს. ავსებს ტრანსფორმატორის ბოჭკოვანი იზოლაციის ფორებს (ქაღალდის) და ამით მის ელექტრულ სიმტკიცეს ზრდის. მეორეს მხრივ გრაფნილებში და გულარაში გამოყოფილი სითბოს გადამტანი საშუალებაა ატმოსფეროში. (ნახ. 5-1). კერძოდ ტრანსფორმატორის აქტიურ

ნაწილში (2) გამოყოფილი სითბო ზეთის მოლეკულებს გადაეცემა, ისინი ფართოვდებიან და ამომგდები ძალის მოქმედებით მალლა მიემართებიან, რადიატორის (3) საშუალებით სითბოს გარემოს გადასცემენ და ტრანსფორმატორის ავზის (1) ქვედა ნაწილს უბრუნდებიან.



ნახ. 5-1. ზეთის მოძრაობა ტრანსფორმატორის ავზში

საგრძობლად უარესდება.

ტრანსფორმატორის ზეთს აგრეთვე იყენებენ მალალი ძაბვის გამზომი ტრანსფორმატორების, ტრანსფორმატორების შემყვანი იზოლატორების, რეაქტორების ავზების, ინდუქტიური კოჭების და სხვა აპარატურის შესავსებად.

ელექტროენერგეტიკაში შემდეგი მარკის ნავთობის ზეთები გამოიყენება. TK მუავეური გაწმენდით, TA აღსორბციული გაწმენდით, TC სელექციური გაწმენდით, FK პიდროკრეკინგული გაწმენდით და სხვა.

დღისათვის ჩვენს ქვეყანაში გამოყენება დაიწყო ნაფტენის ბაზაზე დამზადებულმა ევროპული წარმოების ზეთებმა, რომლებიც კარგი ელექტრული თვისებებით ხასიათდებიან.

ნავთობის ზეთების ძირითადი მახასიათებლებია:

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა ტრანსფორმატორის ზეთს მალალი ძაბვის ამომრთველების შესავსებად იყენებენ. ზეთს ამ შემთხვევაშიც ორი დანიშნულება აქვს.

პირველი ქმნის ელექტრულ იზოლაციას, და მეორე მონაწილეობს ამომრთველის მუშაობისას წარმოქმნილი რკალის ჩაქრობაში. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში ზეთის თვისებები

1. სიმკვრივე - D_{20} -----850+900 კგ/მ³
2. კინემატიკური სიბლანტე - ν ----- 17+18.5 სსტ
3. გაყინვის ტემპერატურა - $t_{გყ}$ ----- მინუს 35°C
4. მჟავეური რიცხვი ----- 0,03+0,1 გრKOH/კგ
5. ფეთქის ტემპერატურა - $t_{ფეთ}$ ----- მეტი 135°C
6. მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი - V_T ----- -0,00065 1/K
7. კუთრი სითბოტევადობა - C ----- -1,5 ჯოული/კგ. K
8. სითბოგამტარობის კოეფიციენტი - γ_T ----- 1,0 ვატი/მ.K
9. დიელექტრიკული შეღწევადობა - ϵ_r ----- -2,1+2,5
10. კუთრი წინაღობა - ρ ----- 10¹⁰+10¹¹ ომი.მ
11. დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი - $t_{გდ}$ - 0,0001+0,025
12. ელექტრული სიმტკიცე - $E_{გაგ}$ ----- 10+40 კვ/მმ

აღნიშნული მახასიათებლების გარდა ტრანსფორმატორის ზეთის საექსპლუატაციო ვარგისიანობას კიდევ 20-მდე პარამეტრი განსაზღვრავს, რომლებსაც სპეციალურ ლიტერატურაში შეიძლება გავეცნოთ.

ტრანსფორმატორში ჩასხმამდე ზეთის ყველა მახასიათებელი მოწმდება და თუ მათი მნიშვნელობები სტანდარტით გათვალისწინებულ ნორმებს აკმაყოფილებენ, მაშინ შეიძლება მისი ექსპლუატაცია.

ექსპლუატაციის პროცესში ტრანსფორმატორის ზეთი მუდმივ შეხებაშია ატმოსეროს ჰაერთან, ლითონებთან (ფოლადი, სპილენძი), ბოჭკოვან მასალებთან (ხე, ქაღალდი) და რაც მთავარია, განიცდის ელექტრული ველის და ტემპერატურის ზემოქმედებას. ყოველივე ამის გამო მისი მახასიათებლები თანდათანობით უარესდება, ანუ ზეთი განიცდის დაძველებას. კერძოდ, იზრდება კინემატიკური სიბლანტე, ე.ი. მცირდება გრაფნილებიდან სითბოს გაცემა, მცირდება ფეთქის ტემპერატურა, ანუ ზეთი ადვილად აალებადი ხდება. იზრდება მჟავეური რიცხვი, დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი, მცირდება კუთრი წინაღობა და ელექტრული სიმტკიცე. ყოველივე ამან შეიძლება ტრანსფორმატორის ავარია გამოიწვიოს. ამიტომ ექსპლუატაციისას ზეთის პერიოდული შემოწმება

ხდება. ამოწმებენ არა ყველა მახასიათებელს, არამედ ყველაზე მკაცრობიარეს, მაგალითად, ზეთის გამრღვევ ქაბვას, დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტს, მუა-ვურ რიცხვს და სხვა.

ელექტრული სიმტკიცის განსაზღვრისას ზეთს სპეციალურ ჭურჭელში გაარღვევენ, სადაც ელექტროდებს შორის მანძილი 2,5მმ - ია. გამრღვევი ქაბვის მნიშვნელობას ნორმებს ადარებენ, თუ მიღებული სიდიდეები ნორმაზე ნაკლებია, მაშინ იწყება დანარჩენი მახასიათებელი სიდიდეების დადგენა, რის შედეგადაც ზეთის საექსპლუატაციო ვარგისიანობა ფასდება.

ექსპლუატაციისათვის უვარგის ზეთს აღდგენა - რეგენერაცია უტარდება.

ტრანსფორმატორის ზეთის უწყვეტი რეგენერაცია, ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციის დროს მიმდინარეობს. იგი ტრანსფორმატორის ავზზე დამონტაჟებული თერმოსიფონური ფილტრების საშუალებით წარმოებს (ნახაზი 5-1, 4). ფილტრში მოთავსებულია აღსორბენტები, რომლებშიც ზეთის გაელისას წყლის და მინარევების მოცილება ხდება.

საკონდენსატორო ზეთი კონდენსატორების დიელექტრიკული ქაღალდის გასაჟღენტად გამოიყენება. ისინი მაღალი ელექტრული სიმტკიცით, დიდი სისუფთავით და ძალიან მცირე დიელექტრიკული დანაკარგებით ხასიათდებიან.

საკაბელო ზეთები ძალოვანი კაბელების ქაღალდის იზოლაციის გასაჟღენტან გამოიყენებიან, რითაც ქაღალდის ელექტრული სიმტკიცე იზრდება.

ნავთობის ზეთები ქიმიურად ნეიტრალურები და კარგი დიელექტრიკული თვისებების არიან, მაგრამ ექსპლუატაციისას ძველდებიან და ადვილად იწვიან, რის გამოც ელექტროსადგურებში, სადაც ათეული ტონობით ტრანსფორმატორის ზეთია გამოყენებული, ხანძარსაშიში პირობები იქმნება. ყოველზე ამან მაღალი სითბომედევობის ან პრაქტიკულად უწვადი და უძველებადი სინთეზური თხევადი დიელექტრიკების შექმნა გამოიწვია.

§ 5-4 სინთეზური და მცენარეული თხევადი დიელექტრიკები

სინთეზური თხევადი დიელექტრიკების მისაღებად კვლევები ჯერ კიდევ გასული საუკუნის ორმოციან წლებში მიმდინარეობდა, განსაკუთრებით იმ ქვეყნებში, სადაც ნავთობის ზეთების დეფიციტი იყო. სინთეზური ელექტროსაინჰოლაციო ზეთებიდან აღსანიშნავია:

ქლორირებული ნახშირწყალბადები - მიიღებიან ნახშირწყალბად დიფენილის ($C_{12}H_{10}$) მოლეკულაში წყალბადის ატომების გარკვეული რაოდენობის ქლორის ატომებით ჩანაცვლებით და ასეთ ნაერთებს ასკარელები ეწოდებათ. მათგან გამოყენებაშია პენტაქლორდიფენილი - სოვოლი ($C_{12}H_7Cl_5$). პოლარული, დაძველებისადმი სტაბილური და უწყვადი სითხეებია, ახასიათებთ მნიშვნელოვანი ნაკლი - ძლიერ ტოქსიკურები არიან, ამიტომ ქლორირებული ნახშირწყალბადების მასიური გამოყენება შესაძლებელია და გამოიყენებიან ცეცხლსაშიშვონაში მომუშავე ელექტრული მოწყობილობების შესავსებად.

კაუბადორგანული სითხეები - ამ სითხეებში ნახშირწყალბადთან ქიმიურ კავშირში კაუბადის (Si) ატომებია, რის გამოც სითხეებს საკმაოდ მაღალი დიელექტრიკული თვისებები გააჩნიათ. $\epsilon_r = 2,4 \div 5,7$; $\rho = 10^{10} \div 10^{12}$ [ომი.მ]; $\text{t}_{\text{გდ}} < 0,002$; $E_{\text{გამრ}} = 20 \div 50$ კე/მმ მაღალი სითბომედეგობით - $t_{\text{ფოტქ}} = 150 \div 300^\circ\text{C}$, და რაც მთავარია დაძველებისადმი სტაბილურები არიან.

ფთორორგანული სითხეები - ასეთი სითხეების მოლეკულების შემადგენლობაში წყალბადის ატომები ნაწილობრივ ან მთლიანად ქლორისა და ფთორის ატომებითაა შეცვლილი. ეს კი გაცილებით მაღალ სითბომედეგობას განაპირობებს, ვიდრე ქლორირებული ნახშირწყალბადების.

მცენარეული ზეთები - მცენარეთა ნაყოფის თესლის გადამუშავებით მიიღებიან და ცხიმუშავეების გლი-

ცვრინულ ეთერებს წარმოადგენენ. ცხიმმჟავები კი ორგვარია: ნაჯერი და უჯერი. უჯერი ცხიმმჟავები ატმოსფეროდან ჟანგბადის ან სხვა ელემენტების მიერთებით ნაჯერ მდგომარეობაში გადადიან, ხოლო ნაჯერი ცხიმმჟავები ინერტულნი არიან. ამის გამო, ის მცენარეული ზეთები, რომლის შემადგენლობაში ცხიმმჟავებია ატმოსფეროს ტემპერატურის, ჰაერის ჟანგბადის და სინათლის ზემოქმედებისას თანდათანობით მყარდებიან და საკმაოდ მაღალი მექანიკური თვისებების მქონე თხელ ფირებს წარმოქმნიან. ასეთებს შრობად ზეთებს უწოდებენ.

ამ სითხეებში შრობის პროცესი არა სითხიდან ნივთიერების აორთქლებაა, არამედ პირიქით, თვით სითხისა და გარედან შემოსული ნივთიერებების რთული რეაქციაა, რის შედეგადაც სითხე თანდათანობით მყარდება, შედეგად წარმოიქმნება მაღალი დიელექტრიკული, საშუალო მექანიკური და თბური თვისებების მქონე ელექტროსაიზოლაციო ფირი.

ნაჯერი ცხიმმჟავიანი ზეთები კი თავიანთ აგრეგატულ მდგომარეობას არ იცვლიან და მათ უშრობად ზეთებს უწოდებენ.

ელექტროტექნიკაში გამოყენებული შრობადი ზეთებიდან აღსანიშნავია სელის და ტუნგოს ზეთები. ისინი მაღალხარისხოვანი ელექტროსაიზოლაციო ლაქების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

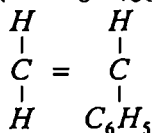
უშრობადი ზეთებიდან ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში *აბუსალათინის* - კასტორის ზეთი გამოიყენება. ის პოლარული, ბლანტი სითხეა $\epsilon_r = 3,5 \div 4,0$; $\rho = 10^{10}$ [ომი.მ]; $tg\delta = 0,01 \div 0,03$; $E_{გაგ} = 15 \div 20$ კვ/მმ. აბუსალათინის ზეთი უმეტესად საკონდენსატორო ქაღალდის გასაუფლენთად გამოიყენება.

§ 5-5 ფისის მაგვარი დიელექტრიკული მასალები

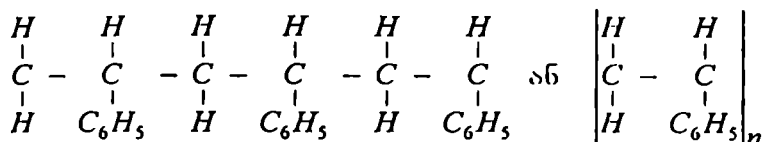
ფისის მაგვარი დიელექტრიკული მასალები - ფისები მაღალმოლეკულურ ორგანულ ნივთიერებებს წარმოადგენენ. ორგანული ნივთიერებები მოლეკულური აგებულების მიხედვით შეიძლება დაიყოს დაბალმოლეკულურ და მაღალმოლეკულურ ნივთიერებებად. დაბალმოლეკულური ნივთიერებების მოლეკულები ათეულობით ატომებისაგან შედგებიან. მაგ. მეთანი, ნეთობის ზეთები და სხვა. მაღალმოლეკულურისა კი ათეული ათასობით ატომებისაგან. ასეთი ნივთიერებები ბუნებაში ცოცხალი ორგანიზმებისა და მცენარეების შემადგენლობაში (აბრეშუმი, ცელულოზა, ცილები, ცხიმები და სხვა) გვხვდება.

მაღალმოლეკულურ ნივთიერებათა მიღება ხელოვნური გზითაც შეიძლება, კერძოდ, ბუნებრივი დაბალმოლეკულურ ნივთიერებათა სინთეზით. მათ მაღალპოლიმერულ ნივთიერებებს, ანუ პოლიმერებს უწოდებენ, რომელთა მოლეკულები დიდი რაოდენობის ერთნაირი აგებულების ატომთა ჯგუფების - მონომერებისაგან შედგებიან.

პოლიმერის მიღება პოლიმერიზაციის რეაქციით ხდება. ამ რეაქციის უმარტივესი მაგალითია პოლისტიროლის მიღება. დაბალმოლეკულური ნივთიერება სტიროლი (C_8H_8) თხევადი უჯერი ნახშირწყალბადია და მის სტრუქტურულ ფორმულას შემდეგი სახე აქვს:



სტიროლის მოლეკულაში ნახშირბადის ორ ატომს შორის ორმაგი ქიმიური კავშირიდან ერთი სითბოს, სინათლის ან სხვა ზემოქმედებით ადვილად წყდება, და მეზობელი მოლეკულის ნახშირწყალბადის ატომთან კოვალენტურ ბმას ამყარებს. შედეგად ერთნაირი მონომერთა უწყვეტი ჯაჭვი პოლისტიროლი წარმოიქმნება.



n - პოლიმერიზაციის ხარისხია და გვიჩვენებს პოლიმერის მოლეკულაში მონომერების რაოდენობას. პოლისტიროლისათვის $n=6000$. პოლიმერიზაციის რეაქცია შეიძლება კატალიზატორების გამოყენებით დაჩქარდეს.

პოლიმერზე გარკვეული ზემოქმედებით შესაძლებელია მისი მოლეკულის დაშლა შედარებით დაბალი პოლიმერიზაციის ხარისხის მქონე ნივთიერებებად. ამ პროცესს *დეპოლიმერიზაციას* უწოდებენ.

მოლეკულის აგებულების მიხედვით ხაზოვან და სივრცულ პოლიმერებს ანსხვავებენ.

ხაზოვანი პოლიმერების მოლეკულებს ძაფის ან ჯაჭვის სახე აქვთ. ე.ი. მოლეკულის სიგრძე გაცილებით მეტია (ათასჯერ) მის განივკვეთზე.

სივრცული აგებულების პოლიმერების მოლეკულებს კომპაქტური - სფერული ფორმა აქვთ. ხაზოვანი პოლიმერები დრეკადი და ელასტიურებია. ტემპერატურის ზემოქმედებისას უმრავლესობა ჯერ რბილდება, შემდეგ დნება. კარგად იხსნებიან შესაბამის გამხსნელებში. სივრცული პოლიმერები ხისტები არიან და მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედებისას რბილდებიან. მათი უმრავლესობა პრაქტიკულად უხსნადია.

ტემპერატურის ზემოქმედებისას გამოვლენილი თვისებების მიხედვით პოლიმერები თერმოპლასტურ და თერმორეაქტიულ პოლიმერებად იყოფიან.

პოლიმერი *თერმოპლასტურია*, თუ ტემპერატურის ზემოქმედებისას თანდათანობით რბილდება, ადვილად დეფორმირდება და გაცივების შემდეგ ყველა თვისება უბრუნდება. ასეთები ძირითადად ხაზოვანი პოლიმერებია და ისინი თერმოპლასტების სახელით არიან ცნობილი.

თერმორეაქტიული პოლიმერები ტემპერატურის ზემოქმედებისას პირიქით მეტად მაგრდებიან, იძენენ

მაღალ მექანიკურ სიმტკიცეს, კარგავენ ხსნადობის უნარს, ხოლო გაცივების შემდეგ თვისებები აღარ უბრუნდებათ. მათ რეაქტოპლასტებს უწოდებენ. ასეთებს სიეცრული პოლიმერების მნიშვნელოვანი ნაწილი მიეკუთვნებიან.

§ 5-6 ბუნებრივი ფისები

ბუნებრივი ფისები ძირითადად მცენარეული და ბიოგენური წარმოშობის ამორფული ნივთიერებებია. ისინი წყალში პრაქტიკულად უხსნადებია, მაგრამ კარგად იხსნებიან სპირტებში, ეთერებში და ეთერულ ზეთებში. გაშრობის შემდეგ წარმოქმნიან არაჰიგროსკოპიულ თხელ ფირებს, რომლებსაც კარგი დიელექტრიკული თვისებები აქვთ. ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში შემდეგი ბუნებრივი ფისები გამოიყენება.

შელლაქი - ტროპიკულ მცენარეთა ტოტებზე გარკვეული სახეობის მწერების გამონაყოფის - გუმილაქის გადამუშავებით მიიღება. ის ღია ყავისფერი მყიფე ქერცლოვანი ფხვნილია, რომელიც კარგად იხსნება სპირტებში და შელლაქის სახელითაა ცნობილი. ლაქის გახშობის შემდეგ წარმოქმნილი ფირი საკმაოდ მაღალი დიელექტრიკული თვისებებით ხასიათდება: ($\epsilon_r = 3,5$; $\rho = 10^{12} \div 10^{14}$ [ომი.მ]; $E_{გაბ} = 20 \div 30$ კვ/მმ. $t_{გბ} = 0,001$).

შელლაქისაგან დამფარავი და შემწებავი ელექტროსაიზოლაციო ლაქები მზადდება.

კანიფოლი - მიიღება ნაძვის ხის გამონაყოფი ფისის დახურულ ჭურჭელში გამოხდით. ჯერ აქროლადი სკიპიდარი გამოიყოფა, ქვაბში დარჩენილი მასა მუქ ყავისფერ სუსტპოლარული, ამორფულ ნივთიერებას კანიფოლს წარმოადგენს. ის წყალში უხსნადია, მაგრამ კარგად იხსნება სპირტებში, ბენზინში, ნავთობის და მცენარეულ ზეთებში. ხასიათდება კარგი დიელექტრიკული

თვისებებით ($\epsilon_r = 2,8$; $\rho = 10^{13} \div 10^{14}$ [ომი.მ];
 $\epsilon_{გდ} = 0,003$ $E_{გამრ} = 10 \div 15$ კვ/მმ.). კანიფოლი
 ელექტროსაიზოლაციო ლაქების და კომპაუნდების
 დასამზადებლად გამოიყენება.

კოპალები - ნიადაგში გაქევებულ მცენარეთა
 ფისებს წარმოადგენენ. ისინი ქვანახშირის ან ნავთობის
 საბადოების რაიონებში მოიპოვებიან. მათი წარმო-
 მადგენელია ქარვა, რომელიც ერთ - ერთი საუკეთესო
 დიელექტრიკული თვისებების მქონე ფისია ($\epsilon_r = 2,8$;
 $\rho = 10^{15} \div 10^{17}$ [ომი.მ]; $\epsilon_{გდ} = 0,001$ $E_{გამრ} = 15 \div 25$ კვ/მმ).
 ის პრაქტიკულად წყალში არასველებადია, ახასიათებს
 მაღალი თბური თვისებები $t_{დარბ} = 180 \div 200^\circ\text{C}$, $t_{დნ} = 300^\circ\text{C}$.
 კოპალებისა და ქარვისაგან მაღალხარისხოვანი ლაქები
 მზადდება.

§ 5-7 თერმოპლასტიკური პოლიმერები

თერმოპლასტიკური პოლიმერები საშუალო სით-
 ბომედევობით და მექანიკური თვისებებით ხასიათდება,
 ამასთანავე კარგი ელექტრული მახასიათებლები გააჩნიათ
 ($\epsilon_r = 1,9 \div 4,5$; $\rho = 10^{11} \div 10^{15}$ [ომი.მ]; $\epsilon_{გდ} \leq 0,03$;
 $E_{გამრ} = 15 \div 40$ კვ/მმ). უმეტესი მათგანი ნეიტრალური,
 არაჰიგროსკოპული და წყალში არასველებადი ნივთიერე-
 ბებია. მათგან მზადდება სხვადასხვა სისქის, ბოჭკო, ქაღ-
 ალდი, ფირები, კომპოზიციური მასალები, წებოები,
 ლაქები, კომპაუნდები და სხვა. თერმოპლასტიკური
 პოლიმერებისგან მზადდება იზოლირებული გამტარები,
 საკონტროლო, კავშირგაბმულობის და ძალოვანი
 კაბელები, ურთულესი კონფიგურაციის ელექტრო-
 საიზოლაციო დეტალები და სხვა. ამ პოლიმერებისაგან
 აღსანიშნავია:

პოლიეთილენი (C_4H_8)_n - ხაზოვანი აგებულების თეთრი პოლიმერია და ეთილენის პოლიმერიზაციით მიიღება. პოლიმერიზაციის რეაქციის რეჟიმის მიხედვით, ანსხვავებენ მაღალი და დაბალი წნევის პოლიეთილენს. პირველი 300 მეგაპასკალი წნევისა და 200°C ტემპერატურის შემოქმედებისას მიიღება. მაღალი წნევის პოლიეთილენი საკმაოდ მსუბუქია ($D=0,9\pm 0,93$ გრ/სმ³) და $n>18000$, ხოლო დაბალი წნევის პოლიეთილენი 0,5 მეგაპასკალი წნევისა და 80°C ტემპერატურის შემოქმედებისას კატალიზატორების დახმარებით მიიღება. ის უფრო მძიმეა ($D=0,94\pm 0,96$ გრ/სმ³) ვიდრე მაღალი წნევის პოლიეთილენი და ახასიათებს უფრო მაღალი თბური და მექანიკური თვისებები. ორივე სახის პოლიეთილენი დაბალი სითბომედეგობით ხასიათდებიან და მუშა ტემპერატურა 90°C არ აღემატება.

პოლიპროპილენი (C_3H_6)_n - მიიღება პროპილენის პოლიმერიზაციით 0.5±3.0 მგპა წნევისა და 70±80°C ტემპერატურისას კატალიზატორების თანხლებით. ის უფრო მყარი, ხაზოვანი პოლიმერია $n>75000$. ხასიათდება დიელექტრიკული მახასიათებლების სტაბილურობით. ელასტიურია, მდგრადია ცვეთისადმი და მრავალჯერადი ღუნვისადმი. მისი სითბომედეგობა 105°C არ აღემატება.

პოლისტიროლი (C_6H_5)_n - სტიროლის პოლიმერიზაციით მიიღება, რომელიც ზემოთ იყო განხილული. ის ხაზოვანი, თეთრი ფერის ნეიტრალური პოლიმერია. გააჩნია მაღალი დიელექტრიკული თვისებები და საშუალო მექანიკური მახასიათებლები. მისი სითბომედეგობა 80°C არ აღემატება.

პოლივინილქლორიდი (C_2H_3Cl)_n - მიიღება ვინილქლორიდის აირის დახურულ ჭურჭელში პოლიმერიზაციით, 0.4±0.12 მგპა წნევისა და 50±70°C ტემპერატურის შემოქმედებით. თეთრი ფერის პოლარული ფისია. ხასიათდება შედარებით დაბალი დიელექტრიკული თვისებებით, ვიდრე ზემოთ განხილული პოლიმერები ($\text{tg } \delta = 0.02$). სამაგიეროდ

მდგრადია ტუტეების და მუავეების ზემოქმედებისადმი. ელასტიურია, მისგან იზოლირებული გამტარები და კაბელის დამცავი გარსაცემები მზადდება. მისი სითბომედევობა 80°C არ აღემატება.

პოლიეტერაფთორეთილენი $(\text{C}_4\text{F}_8)_n$ - მიეკუთვნება ფთორორგნულ პოლიმერებს და მიიღება ტეტრაფთორეთილენის პოლიმერიზაციით. ცნობილია ტეფლონის ან ფთორპლასტ 4-ის სახელწოდებით. სივცრული აგებულების, თეთრი ფერის, ნეიტრალური პოლიმერია. ხასიათდება მაღალი დიელექტრიკული თვისებებით. პრაქტიკაში გამოყენებული დიელექტრიკებიდან მას ყველაზე დიდი კუთრი წინაღობა აქვს $\rho = 10^{16}$ ომი.მ, რომელიც თითქმის არ მცირდება 250°C -მდე ტემპერატურამდე. ახასიათებს განსაკუთრებულად მაღალი სითბომედევობა (250°C) და უმნიშვნელოდ ჰიგროსკოპულია. დრეკადობას -80°C - მდე ინარჩუნებს. მისგან შეიძლება დამზადდეს ძალიან მცირე სისქის (რამოდენიმე მიკრონის) ფირები. კარგად მუშავდება მექანიკურად, მისგან შეიძლება მიღებულ იქნას რთული კონფიგურაციის მქონე დეტალები. ყოველივე ზემოთაღნიშნულის გამო მისი გამოყენება თითქმის შეუზღუდავია ელექტროტექნიკის სხვადასხვა სფეროში. ხოლო დიდი კუთრი წინააღმდეგობის და $\epsilon_{\text{გ}}$ - მცირე მნიშვნელობის გამო ის საუკეთესო აქტიურ დიელექტრიკს წარმოადგენს.

პოლიმეთილმეტაკრილატი (ორგანული მინა) პოლიაკრილატების ჯგუფს მიეკუთვნება. ის სივცრული აგებულების გამჭვირვალე, პოლარული ფისია, მისი მოლეკულა საკმაოდ რთული აგებულებისაა. ახასიათებს საშუალო დიელექტრიკული, მექანიკური და დაბალი სითბური თვისებები. წვის შედეგად მასში დიდი რაოდენობით აირები (CO , H_2) და წყლის ორთქლი გამოიყოფა, რამაც განაპირობა მისი გამოყენება მაღალი ძაბვის განმუხტველებში, როგორც ელექტრული რკალის ჩამქრობი საშუალება.

დასახელება	მდგრადობა	სიმკვრივე კგ/სმ ³	სითბოზე დგრადობა °C	E_r	P [რმბ.მ]	ღვწ	$E_{კარ}$ ქმ/წმ
პოლიეთილენი	ნიეტრალური	0,97	80+90	2,4	10^{15}	0,0005	20
პოლისტიროლი		1,05	70+80	2,6	10^{15}	0,0005	35
პოლიტეტრაფთორ ეთილენი		2,30	250	2,1	10^{16}	0,0003	30
პოლივინილქლორიდი	პოლარული	1,4+1,7	60+70	5,0	10^{14}	0,08	20
პოლიმეთილ მეტაკრილატი		1,20	70+90	4,5	10^{12}	0,08	35
პოლიამიდური		1,5	100+120	4,0	10^{12}	0,03	20
ფენოლფორმალ დე ჰიდური		1,30	105+120	6,5	10^{12}	0,1	20
პოლიეთირეული		1,45	110+150	4,5	10^{14}	0,02	25
ეპოქსიდური		1,20	120+140	4,0	10^{13}	0,03	80
კაუბადარგანული		1,75	180+220	5,0	10^{14}	0,03	25

ფენოლოფორმალდეჰიდური ფისები ფენოლის ($H_3C_6 - OH$), კრეზოლის ($H_2C - C_6H_4 - OH$) ან სხვა ორგანული ნივთიერებების ფორმალდეჰიდებთან (H_2CO) პოლოკონდენსაციის რეაქციის შედეგად მიღებულ პროდუქტებს წარმოადგენენ. თუ რეაქციაში ფენოლის და ფორმალდეჰიდის მოლეკულების თანაბარი რაოდენობა მონაწილეობს მაშინ თერმორეაქტიული ფისი - ბაკელიტი მიიღება. ბაკელიტი ერთ - ერთი ტრადიციული ელექტროსაინჟინერული მასალაა. ის ძირითადად ფენოვანი კლასტამსების დასამზადებლად გამოიყენება.

ფენოლოფორმალდეჰიდური ფისები პოლარული დიელექტრიკებია. მათ საშუალო დიელექტრიკული მახასიათებლები გააჩნიათ. ამიტომ მათგან დამზადებული დეტალები ძირითადად დაბალი და საშუალო ძაბვის

დანადგარებში გამოიყენებიან.

თერმოპლასტიკური პოლიეთერული ფისებს პოლიეთილენტერაფტალატები - "ლავსანი", "მაილარი" და "დაკრონი" მიეკუთვნებიან. ისინი მაღალი დიელექტრიკული, მექანიკური და სითბური თვისებებით ხასიათდებიან.

§ 5-8 თერმორეაქტიული პოლიმერები

პოლიმერთა ეს სახეობა ძირითადად პოლიკონდენსაციის რეაქციით მიიღება და პოლარული დიელექტრიკებია. ამის გამო ხასიათდებიან საშუალო დიელექტრიკული მახასიათებლებით ($\epsilon_r = 3,0 \div 6,5$; $\rho = 10^{11} \div 10^{15}$ [ომ.მ]; $\text{tg}\delta \leq 0,035$; $E_{\text{გამრ}} \leq 30 \text{ კე/მმ}$), მაღალი მექანიკური და სითბური თვისებებით. გამოიყენებიან ელექტროსაიზოლაციო ლაქების, კომპაუნდების, პლასტმასების, სითბომედეგი კომპოზიციური მასალების დასამზადებლად. ასეთი პოლიმერებიდან განსაკუთრების აღსანიშნავია ე.წ. სხმული - გამყარებადი იზოლაციის მიღება, რომელიც მცირე სიმძლავრის, ინდუქტივობის კოჭების, ტრანსფორმატორების და ელექტრული მანქანების დასამზადებლად გამოიყენება. ასეთი იზოლაცია პრაქტიკულად ტენშეულწევადია, მდგრადია ქიმიურად აქტიურ გარემოში, კარგად მუშაობს ტროპიკულ პირობებში. ყოველივე ამის გამო იზოლაციის ექსპლუატაციის ვადა ათეული წლებით განისაზღვრება.

ეპოქსიდური ფისები პოლარული დიელექტრიკებია რომლებიც ეპოქსიდური რგოლებისაგან შედგებიან. ქიმიური შემადგენლობის მიხედვით იყოფიან დიანურ და ციკლოალიფატიურ ჯგუფებად. დიანური ეპოქსიდური ფისებს მიეკუთვნებიან ЭД-4; ЭД-8; ЭД-14; ЭД-16; ЭД-20; ЭД-24, აზოტშემცველი - ЭП, ЭА, ЭЦ, გლიცერინშემცველი - ДГФ-25 და სხვა მარკის ფისები.

ციკლოალიფატიური ფისები კი უჯერ მჟავეთა შენაერთების პირდაპირი ეპოქსიდირებით მიიღებიან. მათი მარკებია YPI-612, YPI-632, YPI-656 და სხვა.

სუფთა სახის ეპოქსიდური ფისები თერმოპლასტიკური, ხსნადი და ხანგრძლივი დროის განმავლობაში სტაბილური სითხეებია, მაგრამ თუ მათ ე.წ. გამამყარებელ კომპონენტს შევეურეთ, მაშინ პოლიმერიზაციის რეაქცია ყოველგვარი დაბალმოლეკულოვანი შენაერთის გამოყოფის გარეშე დაიწყება. რის შედეგადაც ის სივრცული აგებულების თერმორეაქციულ მყარ პოლიმერად გადაიქცევა. გამამყარებლის მიხედვით ანსხვავებენ ცივად გამყარების და ცხლად გამყარების ეპოქსიდურ პოლიმერებს.

გამამყარებლად ალიფატიური პოლიმიადების გამოყენებისას, გამყარების პროცესი ოთახის ტემპერატურაზე 4-6 საათის განმავლობაში მიმდინარეობს. ასეთი გამყარებული მასის მუშა ტემპერატურა $-85 \div 100^{\circ}\text{C}$ - ია, ხოლო გამამყარებლად არომატული დიამინების ან ანჰიდრიდების გამოყენებისას, გამყარების პროცესი $85 \div 150^{\circ}\text{C}$ -ზე 6-16 საათის განმავლობაში მიმდინარეობს და მუშა ტემპერატურა 150°C - ზე მეტია.

კომპონენტის შერჩევას ეპოქსიდური ფისისაგან დასამზადებელი ელექტრული იზოლაციის დანიშნულება და ტექნიკური მოთხოვნები განაპირობებს.

ეპოქსიდური ფისებისაგან დამზადებული ელექტროსაიზოლაციო ნაკეთობები მთელი რიგი უპირატესობებით ხასიათდებიან, როგორცაა ლითონებთან კარგი ადგეზია - შეჭიდულობა, მაღალი სითბოგამტარებლობა და მონოლითურობა.

კაუბადორგანული ფისები - მათ შემადგენლობაში გარდა ორგანული ნივთიერებებისათვის დამახასიათებელი ნახშირბადის ატომებისა, კაუბადის ატომებიც შედის. ასეთ მოლეკულაში შემავალი სილოქსინური კავშირი (Si-O) გაცილებით მტკიცეა, ვიდრე ნახშირბადული კავშირი (C-C). სილოქსანური კავშირი მაღალი სით-

ბომბდეგობას ($200\pm 230^{\circ}\text{C}$), და კარგ მექანიკურ თვისებებს განაპირობებს.

კაუბადორგანული ფისები მოლეკულების როგორც სივრცული, ასევე ხაზოვანი აგებულებით ხასიათდებიან ე.ი. თერმოპლასტიკური და თერმო-რეაქტიული თვისებებს ავლენენ, ამის გამო მათი გამოყენების სფერო საკმაოდ დიდია.

კაუბადორგანული ფისებისაგან დამზადებული ნაკეთობები სტაბილურად ინარჩუნებს ელექტრო-საიზოლაციო თვისებებს. სტაბილურობის ეფექტი უფრო მაღალია თუ ისინი კომპოზიციურ ელექტროსაიზოლაციო მასალას ქმნიან, არაორგანული წარმოშობის დი-ელექტრიკებთან, როგორებიცაა - ქარსი, ფაიფური, მინა, აზბესტი და სხვა.

პოლიმერული ფისების ძირითადი მახასიათებელი სიდიდეები 5-3 ცხრილშია მოყვანილი.

§ 5-9 ბიტუმები

ბიტუმები, ამორფული, სუსტად პოლარული და რთული აგებულების ნახშირწყალბადთა ნარევი. შავი ან მუქი ყავისფერი, დაბალ ტემპერატურაზე მყიფეებია, ხოლო ტემპერატურის ზრდასთან ერთად რბილდებიან და თანდათანობით გადადიან თხევად მდგომარეობაში, მათ როგორც ამორფულ ნივთიერებებს დნობის ტემპერატურა არ გააჩნიათ.

წარმოშობის მიხედვით ბუნებრივ და ხელოვნურ ბიტუმებს ანსხვავებენ. ბუნებრივ ბიტუმებს ასფალტები მიეკუთვნებიან, რომლებიც სასრგებლო ნამარხის სახით ნავთობსაბადოების რაიონებში მოიპოვებიან. ხელოვნურს კი ნავთობის ბიტუმები მიეკუთვნება, რომლებიც ნავთობის საფეხუროვანი გამოხდის შემდეგ მყარი სახით რჩებიან.

ბიტუმები უმნიშვნელო ჰიგროსკოპულობით ხასიათდებიან, კარგად იხსნებიან არომატულ ნახშირ-წყალბადებში (ბენზოლი, ტოლუოლი), ცუდად ნავთში და ბენზინში. პრაქტიკულად უხსნადია სპირტებში და წყალში. მათ საშუალო დიელექტრიკული თვისებები გააჩნიათ ($\epsilon_r = 2,5 \div 3,0$; $\rho = 10^{13} \div 10^{14}$ [ომი.მ]; $tg\delta = 0,01$; $E_{გაგ} = 10 \div 25$ კვ/მმ), ხოლო სითბომედეგობის საზღვრები 95°C და 200°C ფარგლებშია და ამ პარამეტრებით ბიტუმის მარკებია (BH-III(50°C)), (BH-IV(100°C)), და ა.შ.

ბიტუმები ტენმედეგი ელექტროსაიზოლაციო ლაქების, საღებავების, კომპაუნდების პლასტმასების და სხვათა დასამზადებლად გამოიყენებიან. ისინი ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში ყველაზე ადრე გამოყენებულ ბუნებრივ საიზოლაციო მასალებს წარმოადგენენ.

§ 5-10 ელექტროსაიზოლაციო ლაქები

ლაქები კოლოიდური ხსნარებია და ლაქური ფუძისა და აქროლადი ნივთიერებებისაგან შედგება. ლაქურ ფუძეს შრობადი ზეთები, ბიტუმები, ბუნებრივი და სინთეტიკური ფისები წარმოადგენენ, ხოლო აქროლად ნივთიერებებად ნავთი, ბენზინი, ბენზოლი, ტოლუოლი და სპირტები გამოიყენება.

ელექტროსაიზოლაციო ლაქები კლასიფიცირდებიან დანიშნულების, შრობის და შემადგენლობის მიხედვით.

დანიშნულების მიხედვით გამჟღენთ, დამფარავ და შემწვებავ ლაქებად ოყოფიან.

გამჟღენთი ლაქები ფოროვანი და ბოჭკოვანი ელექტროსაიზოლაციო მასალების გასაჟღენთად გამოიყენება, როგორცაა, ქაღალდი, მუყაო, ქსოვლები და სხვა. გაჟღენთვამდე ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ ნაკეთობაში

საკმაო რაოდენობითაა ჰაერჩანართები, რომლებიც დაბალი სითბოგამტარობით და ელექტრული სიმტკიცით ხასიათდებიან. ლაქით გაჟღენთვის შემდეგ, ფორები გამყარებული ლაქური ფუძით შეივსება, რაც მკვეთრად ზრდის სითბოგამტარობას და ელექტრულ სიმტკიცეს.

დამფარავი ლაქებით ელექტროტექნიკურ ნაკეთობათა ზედაპირის ფარავენ. ლაქის გაშრობის ან შეცხობის შემდეგ მექანიკურად მტკიცე, ტენზულწევადი და კრიალა ზედაპირი წარმოიქმნება, რომელიც ტენის შეღწევისაგან იცავს. ლაქების ამ ჯგუფს ემაღ - ლაქები (მინანქარ-ლაქები) მიეკუთვნება, რომლებითაც სხვადასხვა დიამეტრის გამტარების ზედაპირის დაფარვა ხდება, შედეგად მომინანქრებული გამტარები მიიღება, რომლებიც ელექტრული მანქანების, ტრანსფორმატორების აპარატების და სხვადასხვა გრაგნილების დასამზადებლად გამოიყენება.

შემწებაეი ლაქების დანიშნულებაა კომპოზიციური საიზოლაციო სისტემებში სხადასხვა დიელექტრიკული მასალის ერთმანეთთან შეწება. ეს ლაქები მაღალი ადგეზიის უნარით, უმნიშვნელო ჰიგროსკოპიულობით, მაღალი დიელექტრიკული და სითბური თვისებებით ხასიათდებიან.

შემწებაეი ლაქები ქარსიანი, ფოლგირებული, ფირული და კომპოზიციური ელექტროსაიზოლაციო მასალების დასამზადებლად გამოიყენებიან. ამ ლაქებს ფორებში მაღალი შეღწევადობა, კარგი ელექტრული და მექანიკური თვისებები ახასიათებთ. ასეთ ლაქებს ზეთ - ბიტუმიანი (БТ-950), ზეთ - ალკიდური (ГФ-984), პოლიეთერეპოქსიდური (ПЭ-970), ეპოქსიდური (ЭП-934), კაუბადორგანული (КО-9166 КО-919) და სხვა ლაქები მიეკუთვნებიან.

შრობის რეჟიმის მიხედვით ცივად და ცხლად (ღუმელური) შრობად ლაქებს ანსხვაევენ.

პირველ შემთხვევაში ლაქის შემადგენლობაში შედის ისეთი ლაქური ფუძე, რომელიც შრობას ატმოს-

ფერული ტემპერატურის პირობებში ($20 \pm 30^{\circ}\text{C}$) უზრუნველყოფს. მეორე შემთხვევაში შრობა ღუმელში მიმდინარეობს, სადაც ტემპერატურა $70 \pm 150^{\circ}\text{C}$ ფარგლებშია. ამ პროცესის დაჩქარებისათვის ლაქებში შრობის დამაჩქარებლები სიკავიტები შეჰყავთ.

აგებულების მიხედვით ფისოვან, ზეთიან და შავ ლაქებს ანსხეავენ. ფისოვანი ლაქების ლაქურ ფუძეში ძირითადად მოდიფიცირებული ბუნებრივი და ხელოვნური ფისები შედის. როგორცაა შელლაქი, პოლივინილაცეტატი, ეპოქსიდური, კაუბადორგანული ფისები, ხოლო ზეთიანი ლაქების ლაქური ფუძე ძირითადად შრობადი ზეთების და ბუნებრივი და ხელოვნური ფისებისაგან შედგება. შავი ლაქების შემდგენლობაში კი სხეადასხვა მარკის ბიტუმები შედის.

გამუდენთი ლაქები ძირითადად ცხელი შრობით მზადდებიან. მათი ფუძის შემადგენლობას მოდიფიცირებული ბუნებრივი და სინთეზური ფისები, შრობადი ზეთები, ბიტუმები და სიკატივები წარმოადგენენ. ეს ლაქები სითბომედეგობის თითქმის ყველა კლასის ელექტროსაიზოლაციო მასალების ან ელექტრული იზოლაციის დასამზადებლად გამოიყენება. ასეთებია: ზეთ - ბიტუმიანი, ზეთ - ფენოლიანი და ფენოლ - ალკიდური ლაქები.

§ 5-11 კომპაუნდები

კომპაუნდები მრავალკომპონენტიანი მასალებია, რომელთა შემადგენლობაში აქროლადი ნივთიერებები არ შედის. კომპაუნდები სამი კომპონენტისაგან შედგებიან ესენია: კომპაუნდის *ფუძე* (ბიტუმები, ზეთები, პოლიმერული ფისები), *გამამყარებელი* (ალიფატური პოლიამიდი, ანჰიდრიდები, დიამენები) და *შემავსებელი* - (კვარცის ქვიშა, ტალკი, ქარსი, აზბესტი და სხვა). ზემოთ

ჩამოთვლილი კომპონენტების სახე და მოცულობითი კონცენტრაცია კომპაუნდის დანიშნულების და საექსპლუატაციო მოთხოვნების მიხედვით იცვლება.

დანიშნულების მიხედვით კომპაუნდები გამოყენებულა და ჩასასხმელ კომპაუნდებად იყოფიან.

გამყვანთი კომპაუნდი ფოროვანი, ბოჭკოვანი და ჰაერის ჩანართიანი იზოლაციის გასაუფლებლად გამოიყენება. კომპაუნდებს გამოყენების წინ მცირე სიბლანტე უნდა გააჩნდეს, ამიტომ მათ ფუძეში საკმაოდ დიდია ზეთების და თითქმის მინიმუმამდეა შემცირებული შემავსებლის კონცენტრაცია. ზოგჯერ სიბლანტის შემცირების მიზნით მათ შეათბობენ.

ჩამოსასხმელი კომპაუნდები შედარებით დიდი ელექტრული მანქანების, აპარატების, ელექტრონული სქემებისა და სხვადასხვა საკომუტაციო აპარატების დამზადებისას ჰაერ - შუალედიან სივრცეების შესავსებად გამოიყენებიან. მათი საშუალებით ხდება ელექტრული იზოლაციის დაცვა ტენის, ქიმიურად აქტიური გარემოს და მექანიკური ზემოქმედებისაგან. ჩამოსასხმელი კომპაუნდი მკვეთრად ზრდის ელექტროტექნიკური დანადგარის იზოლაციის გამრღვევ ძაბვას და მექანიკურ სიმტკიცეს.

ფუძე-დამაკავშირებელი ტიპის მიხედვით კომპაუნდები შემდეგ ჯგუფებად იყოფიან: ეპოქსიდური ფისების, პოლიეთერული, პოლიუთერანის, ბიტუმის ფუძით, ხოლო გამაყრების პროცესის მიხედვით ცივად და ცხლად გამყარებად კომპაუნდებს ანსხვავებენ.

კომპაუნდების დამზადება უშუალოდ გამოყენების წინ ხდება. გამოიყენება აგრეთვე დამამზადებელი ქარხნიდან მზა კომპაუნდები. განვიხილოთ ზოგიერთი კომპაუნდის დამზადება და გამოყენების პირობები.

ბიტუმიანი კომპაუნდები ერთ - ერთი უძველესი და დღესაც ფართოდ გამოყენებული ელექტროსაიზოლაციო მასალებია. ეს კომპაუნდები ძნელად რბილება და ბიტუმებში შრობადი ზეთებისა და კანიფოლის შერევით

150±200°C ტემპერატურაზე მზადდებიან.

გამღვენთი კომპაუნდებისათვის ზეთების კონცენტრაცია მაღალია. მათ აგრეთვე გამხსნელებსაც ურევენ (ნაეთი, ტოლუოლი). გამყარების შემდეგ თერმოპლასტიკური, უმნიშვნელო პიგროსკოპული და მაღალი ელექტროსაიზოლაციო მახასიათებლების მქონე ელექტრული იზოლაცია მიიღება. გამოიყენებიან მცირე და საშუალო სიმძლავრის ელექტრული მანქანების სტატორის გრაგნილების გასაქვენთად.

ჩამოსასხმული კომპაუნდების შემადგენლობაში შრობადი ზეთები მინიმუმამდეა შემცირებული და მათ ნაკვლად შემავსებლები შეჰყავთ. ასეთი კომპაუნდები *საკაბელო მასების* სახელწოდებითაც არიან ცნობილნი და ძალური კაბელების შემაერთებელი და განშტოებადი ქუროების შესავსებად გამოიყენებიან.

ბიტუმიანი კომპაუნდები თერმოპლასტიკური არიან და მათი გამოყენება დიდი სიმძლავრის ელექტრულ მანქანებში, სადაც მუშა ტემპერატურაა მაღალი 120°C - შეზღუდულია.

ეპოქსიდური კომპაუნდები უშუალოდ ჩამოსხმის ან გაქვენთვის წინ ზემოთ განხილული კომპონენტებისაგან მზადდებიან. როგორც ცივი, ასევე ცხელი გამყარებისაა. ეს კომპაუნდები ყველა სახის ელექტროტექნიკური ხელსაწყოების, განსაკუთრებით კი მძლავრი და მაღალი ძაბვის ელექტრული მანქანების, აპარატების და ე.წ. "მშრალი" ტრანსფორმატორების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

§ 5-12 ბოჭკოვანი ელექტროსაიზოლაციო მასალები

ბოჭკოვანი ეწოდება ნივთიერებებს, რომლებიც მთლიანად ან ნაწილობრივად წაგრძელებული ფორმის ნაწილაკების - ბოჭკოებისაგან შედგებიან. ბოჭკოვანი

ნივთიერებები ფართოდ გამოიყენებიან ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში და მათ სხვადასხვა სახის ქსოვილები, ქაღალდი, მუყაო და ფიბრა მიეკუთვნება, რომელთა ბოჭკოვანი აგებულება თვალთ ან მიკროსკოპის საშუალებით შეიმჩნევა.

ბოჭკოვანი ელექტროსაიზოლაციო მასალები ძირითადად ორგანული, მცენარეული ან ცხოველური წარმოშობის ნივთიერებებია.

მცენარეული წარმოშობის ბოჭკოვანი მასალები ცელულოზისაგან შედგებიან. ცელულოზა მაღალმოლეკულოვანი ორგანული ნივთიერებაა - $(C_6H_{10}O_5)_n$, მისი მოლეკულები ჯაჭვისებური აგებულების გლუკოზური რგოლებისაგან შედგება. ყოველი გლუკოზური რგოლი პოლარულ ჰიდროქსიდურ - OH - ჯგუფს შეიცავს, ამიტომ ცელულოზა პოლარული ნივთიერებაა და საშუალო დიელექტრიკული და სითბური თვისებებით ხასიათდება.

ბოჭკოვანი აგებულება ჰიგროსკოპიულობას და ტენგამტარებლობას განაპირობებს. ამის გამო ცელულოზის ნაწარმი უმეტესად ლაქით დაფარული ან საიზოლაციო ზეთით გაუღენთილი გამოიყენება.

ცხოველური წარმოშობის ბოჭკოვან მასალებს აბრეშუმის და შალის ნაწარმი მიეკუთვნება. ისინი გაცილებით კარგი ელექტრული თვისებებით ხასიათდებიან, ვიდრე ცელულოზა, ხოლო ბუნებრივ ბოჭკოვან მასალებს აზბესტი წარმოადგენს, რომლის გამოყენება დღეისათვის შეზღუდულია.

§ 5-13 ელექტროსაიზოლაციო ქაღალდი, მუყაო და ფიბრა

ქაღალდი ხის მერქნის (ნაძვი, წიფელი, არყის ხე) გადამუშევრებით მიღებული მცენარეული ცელულოზისაგან მზადდება. მერქანი, გარდა ცელულოზისა ლიგროინს,

ფისებს და სხვადასხვა მინარევებს შეიცავს. მათი მოცილება დაქუცმაცებული მერქნის ხარშით სპეციალურ ქვაბში ტუტის ან მჟავის წყალხსნარებით ხდება. თუ მერქნის ხარშვა გოგირდმჟავას (H_2SO_4) წყალხსნარით წარმოებს მაშინ თეთრი ფერის საწერი ქაღალდი მიიღება, რომელსაც მოკლე ბოჭკოები აქვს და დაბალი მექანიკური თვისებები გააჩნია.

ელექტროსაიზოლაციო ქაღალდი ხის მერქნის ტუტის ($NaOH$) წყალხსნარით ხარშვისას მიიღება. ის მოყვითალო ფერისა, გრძელბოჭკოვანი და მაღალი მექანიკური და თბური თვისებებისაა. ასეთ ქაღალდს სულფატურ ქაღალდს უწოდებენ. მისი დიელექტრიკული მახასიათებლებია $\epsilon_r = 3,5 \div 10$; $\text{tg} \delta \leq 0,05$; $\rho = 10^8 \div 10^{13}$ [ომ.მ]; $E_{\text{გამრ}} = 10 \div 30$ კე/მმ.

ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში შემდეგი სახის სულფატური ქაღალდები გამოიყენება:

ა) *საკაბელო ქაღალდი* დაბალი და მაღალი ძაბვის ($10 \div 200$ კე) ძალური კაბელების დენგამტარი ძარღვების იზოლირებისათვის გამოიყენება. მისი სისქე $0,025$ მმ - დან $0,25$ მმ - მდე იცვლება, უმეტესად საკაბელო ზეით არის გაუღენთილი. ხასიათდება მცირე ϵ_r და $\text{tg} \delta$ მნიშვნელობებით, მაღალი ელექტრული სიმტკიცით და კარგი მექანიკური თვისებებით. საკაბელო ქაღალდის მარკებია: K, KH, KB, KBH და სხვა.

ბ) *საკონდენსატორო ქაღალდი* მაღალი სისუფთავით გამოირჩევა. მას $\text{tg} \delta$ ძალიან მცირე მნიშვნელობა გააჩნია და სხვადასხვა ძაბვის ქაღალდიანი კონდენსატორების დასამზადებლად გამოიყენება. გავრცელებული მარკებია: KOH, CKOH, MKOH, Ξ MKOH და სხვა.

გ) *სატელეფონო ქაღალდი* იგივე თვისებისაა, რაც საკონდენსატორო, მხოლოდ მცირე კუთრი წონისა, რათა მისგან დამზადებული კავშირგაბმულობის კაბელის წონა შემცირდეს. ასეთ ქაღალდებს აგრეთვე ფენოვანი პლასტიკების და კომპოზიციური მასალების დასამზადებლად

იყენებენ.

ელექტროსაიზოლაციო მუყაო სულფატური ცელულოზისაგან იმავე ტექნოლოგიით მზადდება, როგორც სულფატური ქაღალდი, მას უფრო მეტი სისქე და სიმკვრივე გააჩნია. უკანასკნელის გახრდის მიზნით მასში ბამბის ცელულოზა შეჰყავთ.

ელექტროსაიზოლაციო მუყაო დანიშნულების მიხედვით ორგვარია: ჰაერის ან ზეთის გარემოში მომუშავე.

პირველი მკვრივი აგებულებით ხასიათდება, რაც მას სიმაგრეს და დრეკადობას ანიჭებს. იგი განკუთვნილია უშუალოდ აირის გარემოში სამუშაოდ. მისგან ელექტრული მანქანების სხვადასხვა სახის საიზოლაციო დეტალები მზადდება. მეორე ზეთის გარემოში მომუშავე მუყაო მეჩხერი აგებულებისაა და ზეთის შეწოვის უნარით ხასიათდება. გამოიყენება ზეთშეესებულ ელექტროტექნიკურ დანადგარებში იზოლაციის შესაქმნელად.

ფიბრა - სულფატური თხელი ქაღალდის თუთიის ქლორიდის ($ZnCl_2$) თბილ წყალხსნარებში გატარებით მიიღება. გაუდენთილი და გაწურული ქაღალდი დოლიდან ჩამოჭრის შემდეგ ქაღალდს გააშრობენ და წინასწარ გათვალისწინებული სისქის მიხედვით დააპაკეტებენ. შემდეგ მისგან სხვადასხვა სისქის ფურცლოვანი ან მილისებური ნაკეთობები მზადდება.

ფიბრა საკონსტრუქციო იზოლაციის დასამზადებლად გამოიყენება. ფიბრის წვის შედეგად დიდი რაოდენობის აირები (CO , CO_2 , H_2 , H_2O) გამოიყოფა, რაც ხელს უწყობს ელექტრული რკალის ჩაქრობას. ამიტომ ფიბრის მიღებს მაღალი ძაბვის მილისებური განმმუხტველების დასამზადებლად იყენებენ, ამ მიზნით ისინი შეუცვლელნი არიან.

§ 5-14 ლაქქსოვილები

ლაქქსოვილი მოქნილი ელექტროსაიზოლაციო მასალაა და სხვადასხვა ლაქით გაუღენთილ, როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული წარმოშობის ქსოვილებს წარმოადგენენ. ქსოვილებად ბამბის, ბამბა - ქაღალდის, აბრეშუმის, შალის, პოლიმერების, მინის ბოჭკოს და სხვა საფეიქრო ნაწარმი გამოიყენება.

ლაქქსოვილის დასამზადებლად გამომშრალ ქსოვილს გამუღენთ ლაქში ატარებენ და შემდეგ გამოაშრობენ. მიღებულ მასალას ქსოვილი მექანიკურ, ხოლო ლაქური კომპონენტი ელექტრულ სიმტკიცეს ანიჭებს. ლაქქსოვილები მცირე ჰიგროსკოპულობით ხასიათდებიან. იმისდა მიხედვით თუ როგორი ქსოვილი და ლაქია გამოყენებული ლაქქსოვილებს სხვადასხვა სითბომდეგობის კლასი გააჩნიათ. (A დან F კლასის ჩათვლით).

ლაქქსოვილები ელექტრომანქანათმშენებლობაში, ელექტრონიკაში, რადიოტექნიკაში, ხელსაწყოთმშენებლობაში და სხვა დარგებში სახვევ - საიზოლაციო საშუალებად გამოიყენებიან. რომელთაგანაც აღსანიშნავია.

1. ბამბაქაღალდის, აბრეშუმისა და სინთეზურ სქოვილზე დამზადებული ლაქქსოვილები. დაბალ ტემპერატურაზე ($90 \pm 105^{\circ}\text{C}$) სამუშაოდ არიან განკუთვნილი. როგორც ჰაერის, ასევე ზეთის გარემოში. მათი მარკებია: ЛХН-105, ЛХБ-105, ЛШН-105, ЛКМ-105 და სხვა.

2. გაღაქული მინაქსოვილები უფრო მაღალი ტემპერატურის გარემოში ($105 \pm 155^{\circ}\text{C}$) გამოსაყენებლად არიან განკუთვნილი. მათი მარკებია: ЛСМ-120, ЛСБ-120, ЛСК-155 და სხვა.

3. ფთოროპლასტის ფუძიან მინაქსოვილებში მინის ქსოვილთან ერთად ფთოროპლასტის ფირიც გამოიყენება, რაც მაღალ ელექტრულ და სითბურ თვისებებს განაპირობებს. ასეთი ლაქქსოვილები რთულ პირობებში მომუშავე ელექტროტექნიკური მოწყობილობების

დასამზადებლადაა გათვალისწინებული. მარკებია $\Phi 4$, $\Phi 4-M$ და სხვა.

4. მინარეზინის ლაქქსოვილებში გამჟღავნებულ კომპონენტად ხელოვნური კაუჩუკის მასაა გამოყენებული, რაც ლაქქსოვილს ტემპერატურის დიდ დიაპაზონში ($105\div 180^{\circ}\text{C}$) მუშაობის უნარს და მაღალ ელასტიურობას ანიჭებს. მინარეზინის ლაქქსოვილების ძირითადი ტიპია ლატექსური, ესკაპონური, კაუბადორგანული.

5. მწებავი და თვითშემწებავი რეზინალაქქსოვილები და მინაქსოვილები. მათი ერთი ან ორივე მხარე ლაქითაა დაფარული, რომელიც წინასწარი შეშრობის შემდეგ წებვადობას ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ინარჩუნებს. ისინი ელექტროტექნიკურ მრეწველობაში დენგამტარი დეტალების შეერთების ადგილების გასაიზოლირებლად გამოიყენებიან.

ლაქქსოვილების ჯგუფს აგრეთვე მწებავი რეზინირებული ზონარი მიეკუთვნება, რომელშიც ბამბაქაღალდის, აბრეშუმის ქსოვილის ან პოლიმერული ფირის, ზონარის ზედაპირს ერთი ან ორივე მხარეს ლაქით ფარავენ.

§ 5-15 პლასტიკური მასები

პლასტიკური მასები ანუ პლასტმასები ისეთ მასალებს ეწოდებათ, რომელთაგან დეტალების დამზადება პლასტიკური დეფორმაციის საშუალებით ხდება (წნევითი ჩამოსხმა, ექსტრუზია, დაწნეხვა და სხვა). პლასტიკური მასების ძირითადი დამახასიათებელი თვისების - პლასტიკურობის გამოვლენა ტემპერატურის და წნევის ერთდორულად შემოქმედებისას ხდება.

პლასტმასების ძირითადი შემადგენელი კომპონენტებია, დამაკავშირებელი და შემავსებელი. დამაკავშირებელ კომპონენტად ბუნებრივი და ხელოვნური ფისები გა-

მოიყენება. ისინი შეწებებადობის და დეფორმაციის უნარს ტემპერატურისა და წნევის ზემოქმედებისას ავლენენ. დამაკავშირებლად აგრეთვე მინა და ცემენტიც გამოიყენება. დამაკავშირებელი კომპონენტი პლასტმასის დეტალს მონოლითურობას და ძირითად დიელექტრიკულ მახასიათებლებს სტაბილურობას ანიჭებს.

შემავსებელ კომპონენტად როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული მასალების ფხვნილი, ბოჭკო და ქსოვილი გამოიყენებიან. ისინი პლასტმასის ნაკეთობის მექანიკურ და სითბურ თვისებებს განაპირობებენ. ამასთანავე შესამჩნევად ცელიან დიელექტრიკულ მახასიათებლებს.

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა პლასტმასების სიხისტის შესამცირებლად და პლასტიკურობის გასაზრდელად შემადგენლობაში პლასტიფიკატორებს და ნაკეთობისათვის ფერის მისაცემად საღებავებს უმატებენ.

პლასტმასები, რომელთა შემადგენლობაში დამაკავშირებელი კომპონენტი - პოლიმერებია და მცირე რაოდენობით სტაბილიზატორებს და საღებავებს შეიცავენ ფაქტიურად ისეთივე ტექნოლოგიით მიიღებიან როგორითაც პოლიმერები.

პლასტმასების დასამზადებელ ძირითად ნედლეულს წნეხ - ფხვნილი წარმოადგენს. ის გარკვეული კონცენტრაციით ერთმანეთში შერეული პლასტმასის ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი კომპონენტია.

დამაკავშირებელი კომპონენტის თვისების მიხედვით ცხელი და ცივი დაწნეხვის პლასტმასები მზადდება.

პირველ შემთხვევაში დაწნეხვამდე და დაწნეხვისას წნეხ - ფხვნილს გარკვეულ ტემპერატურამდე აცხელებენ, ხოლო მეორე შემთხვევაში პლასტმასის ნაკეთობა მიღება ნორმალურ ტემპერატურაზე დაწნეხვით ხდება. აქედან გამომდინარე არსებობს თერმოპლასტიკური და რეაქტოპლასტიკური პლასტმასები.

თერმოპლასტიკურს მიეკუთვნება პლასტმასები, რომლებშიც დამაკავშირებლად პოლივინილის, პოლიამიდის, ცელულოზის ეთერის ფისებია გამოყენებული.

ასეთი პლასტმასები ცხელი დაწნევის შემდეგ ხელახალი დარბილების და გამხსნელებში ხსნადობის თვისებებს ინარჩუნებენ. რაც შეეხება რეაქტოპლასტიკურ პლასტმასებს, ისინი ცხელი დაწნევის შემდეგ დარბილების და ხსნადობის უნარს კარგავენ.

პლასტმასის ნაკეთობებს წნეხ - ფხვნილის წნეხფორმაში დაწნევით ამზადებენ. წნეხფორმა სპეციალური ფოლადისაგან დამზადებულ დეტალთა კვანძს წარმოადგენს, რომელთა შიგა პროფილი დასამზადებელი პლასტმასის დეტალის კონფიგურაციას იმეორებს.

შემავსებლის გარეშე პლასტმასის ნაკეთობათა დამზადება წნევითი ჩამოსხმით, ექსტრუზიით და სხვა მეთოდებით ხდება. ექსტრუზიის მეთოდით პლასტმასის ნაკეთობის დამზადებისას გაცხელებული მასა ხერყლიდან გარკვეული კონფიგურაციის უწყვეტი ნაკეთობად ღეროს, მილის, ფურცლის და სხვა სახით გამოიწნეხება. ასეთ მანქანაზე შესაძლებელია იზოლირებული გამტარების და სხვადასხვა კაბელების დამზადება.

პლასტმასების განსაკუთრებულ ჯგუფს ფენოვანი პლასტმასები მიეკუთვნება. ასეთ პლასტმასებში შემავსებელ კომპონენტად ბოჭკოვანი მასალები (ქაღალდი ან ქსოვილი) გამოიყენება. მათ *გეტინაქსებს* უწოდებენ, რომელთა დასამზადებლად სულფატურ ელექტროსაიზოლაციო ქაღალდს თერმორეაქტიული პოლიმერის ლაქში უღენტავენ და ნაწილობრივად აშრობენ. შემდეგ გაუღენთილი ქაღალდი ზომების მიხედვით იჭრება და დაპაკეტდება. უკანასკნელში იგულისხმება დაჭრილი ფურცლების გარკვეული რაოდენობის მოთავსება ფოლადის ფილებს შორის. ფურცლების რაოდენობა მზა ნაწარმის სისქის მიხედვით განისაზღვრება. დაპაკეტებულ ფურცლებს ჰიდრაულიკური წნეხის მუშა მაგიდებს შორის მოათავსებენ და გარკვეული ტემპერატურისა და წნევით დაწნეხავენ.

გეტინაქსები მზადდებიან, როგორც ატმოსფეროს ჰაერში, ასევე თხევად იზოლაციაში სამუშაოდ. ხასიათდებიან მაღალი მექანიკური, საშუალო სითბური

($110 \div 120^\circ\text{C}$) და დიელექტრიკული თვისებებით ($\epsilon_r = 4,0 \div 6,5$; $\rho = 10^{10} \div 10^{12}$ [ომი.მ]; $\text{იგდ} \leq 0,05$; $E_{\text{გამრ}} = 20 \div 40$ კვ/მმ).

გეტინაქსისაგან გამანაწილებელი მოწყობილობების პანელები, ელექტრონული სქემების სპილენძით ფოლგირებული პლატები, კონსტრუქციული დეტალები და სხვა ელექტროსაინჟინერული ნაკეთობები მზადდება.

თუ შემავსებლად ბამბის, ბამბაქალაღდის, მინა ბოჭკოს ან აზბესტის ქსოვილები გამოიყენება. მაშინ მიღებულ პროდუქციას ტექსტოლიტები ეწოდებათ. ტექსტოლიტებს გაცილებით მაღალი დიელექტრიკული, სითბური და მექანიკური თვისებები გააჩნიათ ვიდრე გეტინაქსებს.

§ 5-16 ელასტომერები

ელასტომერებს კაუჩუკის შემცველ ან მსგავსი თვისებების მქონე ნივთიერებებს უწოდებენ. კაუჩუკი მაღალმოლეკულოვანი ორგანული ნივთიერებაა ქიმიური ფორმულით $(C_5H_8)_n$, რომლის მოლეკულებს ზიგზაგისებური აგებულება გააჩნიათ. ეს მის შესანიშნავ თვისებას, ელასტიურობას განაპირობებს.

წარმოშობის მიხედვით კაუჩუკი ბუნებრივ (ნატურალური) და სინთეზური კაუჩუკად იყოფა. ნატურალური კაუჩუკი, კაუჩუკის ხის მიერ გამოყოფილი წვენი ლატექსისაგან მიიღება. ხიდან გამოყოფის შემდეგ წვენი მყარდება, ხოლო $+50^\circ\text{C}$ -ზე კი თხევადდება და წებვადობა ახასიათებს. კარგად იხსნება ბენზინში და მიიღება ე.წ. რეზინის წებო. ნატურალური კაუჩუკი მაღალი დიელექტრიკული თვისებებით ($\epsilon_r = 4,0 \div 6,5$; $\text{იგდ} \leq 0,05$ $\rho \leq 10^{12}$ [ომი.მ]; $E_{\text{გამრ}} = 10 \div 30$ კვ/მმ) და დაბალი სითბომედეგობით ($t_{\text{სით}} = 60 \div 65^\circ\text{C}$) ხასიათდება.

($t_{\text{სით}}=60\pm 65^{\circ}\text{C}$) ხასიათდება.

სინთეზური კაუჩუკები ნავთობის, ბუნებრივი აირების და სპირტებისაგან მიიღებიან. მათი ნედლეულებია: ბუტადიენი, ბუთილი, იზოპრენი და სხვა. მიღებული კაუჩუკები კი შემდეგი სახელწოდებით არიან ცნობილი: ბუტადიენური, ქლოროპრენული, ბუთილის, კაუბადორგანული და სხვა.

სინთეზური კაუჩუკები ისეთივე დიელექტრიკული და უფრო მაღალი სითბური თვისებებით ხასიათდებიან როგორც ბუნებრივი კაუჩუკები. ამასთანავე გაცილებით დაბალი თვითღირებულების არიან. ამის გამო დღეისათვის ელასტომები ძირითადად სინთეზური კაუჩუკებიდან მზადდებიან.

ძირითადი მასალა, რომელიც კაუჩუკების ვულკანიზაციისას მიიღება რეზინებია.

ვულკანიზაცია არის კაუჩუკის თერმული და მუშავებით მასში ატომური გოგირდის ან სხვა კომპონენტების (საღებავები, შემავსებლები) შეყვანა. გოგირდის $1\div 3\%$ შემცველობისას ე.წ. რბილი რეზინები, ხოლო $30\div 40\%$ შემცველობისა, მაგარი რეზინები - ებონიტები მიიღება.

რბილი რეზინები ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში მასიურად გამოიყენება. მისგან მზადდება ელასტიური იზოლირებული გამტარები, კაბელები, რეზინის დამცავი ხელთათმანები, მაიზოლირებელი ბოტები, დამცავი კომბინიზონები და სხვა. რბილი რეზინების დიელექტრიკული მახასიათებლები შედარებით დაბალია ($\epsilon_r = 3 \div 7$; $\rho = 10^{10}$ [ომი.მ]; $\text{tg}\delta = 0,03$; $E_{\text{გამ}} = 20 \div 30$ კე/მმ), მაგრამ ამ მაჩვენებლებითაც საკმარის კარგ ელექტროსაიზოლაციო მასალად ითვლებიან, რაც შეეხება კაუბადორგანულ რეზინებს, მათ მაღალი სითბომედეგობა ($200\div 250^{\circ}\text{C}$) აქვთ. რეზინების ნაკლოვანი თვისებებია სითბური დაძველების მკვირვ დრო და მაღალი ძაბვის დანადგარებში ნაწილობრივი განმუხტვის შემოქმედებით ინტენსიური დესტრუ-

ქცია. გარდა ამისა რეზინში შემავალი გოგირდი სპილენძის კოროზიას იწვევს.

ეზონიტები საკმაოდ მაღალი დიელექტრიკული, სითბური და მექანიკური თვისებების მქონე საიზოლაციო მასალებია. მისგან როგორც დაბალი, ასევე მაღალი ძაბვის კონსტრუქციული საიზოლაციო დეტალები და ნაკეთობები მზადდება.

§ 5-17 ელექტროტექნიკური მინები

მინები არაორგანული, ამორფული ნივთიერებებია და მინაწარმომქნელი ქანგეულების რთულ ნაერთებს წარმოადგენენ. ელექტროსაიზოლაციო ნაკეთობების დასამზადებლად ალუმობოროსილიკატური მინა გამოიყენება, რომლის ელექტრული თვისებები კერძოდ კუთრი წინააღმდეგობა ტუტე მეტალთა ქანგეულების (R_2O) შემცველობითაა განპირობებული.

მინის ბოჭკოს ქსოვილები, ბადეები და ლენტები უტუტო ($R_2O < 0,7\%$) მინებისაგან მზადდება, ხოლო საიზოლაციო ნაკეთობანი და მინის იზოლატორები ტუტეშემცველი მინებისაგან მიიღება ($R_2O > 5\%$).

მინის მიღება შემდეგ ეტაპებს მოიცავს: კაზმის მომზადება, მინის ხარშვა და ნაკეთობის დამზადება.

კაზმი უწვრილეს ნაწილაკებად დაქუცმაცებულ სანედლეულო კომპონენტების მექანიკურ ნარევს წარმოადგენს. მისი ძირითადი კომპონენტებია: კვარცის ქვიშა - SiO_2 , სოდა - Na_2CO_3 , პოტაში - K_2CO_3 , კირქვა - $CaCO_3$, ნატრიუმის სულფატი - Na_2SO_4 , ბორის მუაყა - H_3BO_3 , მინდერის შპატი და სხვა.

კარგად არეული კაზმი აბაზანური ტიპის სადნობ ღუმელში ჩაიტვირთება, იწყება ღუმლის ტემპერატურის თანდათან ზრდა, რის შედეგადაც კომპონენტები დნება და აქროლადი ნივთიერებები H_2O , CO , CO_2 გამოიყოფა.

როდესაც ტემპერატურა $1550 \pm 1590^{\circ}\text{C}$ მიაღწევს ღუმელში მინამასა წარმოიქმნება. მისი ერთგვაროვნობის მიღწევა აბაზანის ქვედა ნაწილიდან ჰაერის წნევით შებერვის - ბარბიტერების საშუალებით ხდება.

ერთგვაროვანი და გარკვეული სიბლანტის მინამასა აბაზანიდან გამოედინება და სპეციალური ავტომატების საშუალებით მისგან ბურთულების მიღება ხდება. ბურთულებს სწრაფად აცივებენ, რადგან ელექტროტექნიკური ნაწარმის დასამზადებლად ამორფული მინა გამოიყენება, ხოლო ნელი გაცივებით მიღებული კრისტალური მინა პრაქტიკულად გამოუსადეგარია.

ქიმიური შემადგენლობა და თვისებები ელექტროსაიზოლაციო ნაკეთობათა დანიშნულების და გამოყენების მიხედვით განისაზღვრება, რომლებიც საკმაოდ დიდ ფარგლებში იცვლებიან.

ელექტროტექნიკური მინის შემდეგი პარამეტრია აღსანიშნავი.

სიმკვრივე - D_{20} ----- $2,0 \div 8,1 \text{ კგ/მ}^3$
 დარბილები ტემპერატურა ----- $400 \div 1600^{\circ}\text{C}$
 დიელექტრიკული შეღწევადობა - ϵ_r ----- $3,8 \div 16,0$
 კუთრი წინაღობა - ρ ----- $10^8 \div 10^{16} \text{ ომი.მ}$
 დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი $\text{tg}\delta$ - $0,0002 \div 0,05$
 ელექტრული სიმტკიცე - $E_{გამ}$ ----- $100 \div 500 \text{ კვ/მმ}$

მინამასის გადამუშავების შემდეგ მინის სხვადასხვა სახეობა მიიღება, რომელთაგან აღსანიშნავია: საკონდენსატორო, დასაყენებელი (საიზოლატორო), ელექტროვაკუუმური, ფხენილისებური, მინაბოჭკოს დასამზადებელი მინა და სიტალები.

საკონდენსატორო მინა კონდენსატორების დასამზადებელ დიელექტრიკად გამოიყენება. საკონდენსატორო მინას დიელექტრიკული შეღწევადობის დიდი მნიშვნელობა ($\epsilon_r = 10 \div 16$), ძალიან მცირე დიელექტრიკული დანაკარგები ($\text{tg}\delta < 0,001$) და რაც შეიძლება მაღალი ელექტრული სიმტკიცე ($E_{გამ} > 300 \text{ კვ/მმ}$) უნდა ახასიათებ-

დეს. ის მაღალი ძაბვის სხვადასხვა ტიპის კონდენსატორების დასამზადებლად გამოიყენება.

დასაყენებელი მინებისაგან, როგორც დაბალი, ასევე მაღალი ძაბვის იზოლატორები მზადდება. მინის ეს სახე მაღალი დიელექტრიკული და მექანიკური თვისებებით ხასიათდება. აგრეთვე მდგრადია თერმოდარტყმების მიმართ. დასაყენებლად გამოიყენებიან პირექსის №1 და №13 მარკის მინები. უკანასკნელ წლებში მინის იზოლატორებმა თითქმის შეცვალეს ფაიფურის იზოლატორები.

ელექტროვაკუუმური მინები ელექტრონული, ელექტრონულ - სხივური, განათების და ლუმინესცენციური ნათურების, რადიომილაკების და ვაკუუმის პირობებში მომუშავე ელექტრონული ხელსაწყოების დასამზადებლად გამოიყენებიან. მინათა ეს სახე ლითონებთან კარგი შედნობის უნარით ხასიათდება. მათი მარკებია: კვარცის - C5-1, ვოლფრამის - C37-1, C41-1, მოლიბდენის - C47, C48, C49, C50, ტიტანის - C66, C72, პლატინის და სხვა.

ფხვნილისებური მინები ელექტროვაკუუმურ და ელექტროსაიზოლაციო ტექნიკაში მინასარჩილის, მინამინანაქრის და მინაშემავსებლის სახით გამოიყენებიან.

მინასარჩილი ფხვნილისებურ მინას წარმოადგენს, რომელიც მინის, კერამიკის, ქარსის დეტალების ლითონის დეტალებთან რჩილვის საშუალებით დასაკავშირებლად გამოიყენება. ასეთ მინებს დარბილების დაბალი ტემპერატურა ($300\pm 400^{\circ}\text{C}$) და დასაკავშირებელ დეტალებთან კარგი ადგეზია ახასიათებს.

მინამინანქარი კერამიკის ან ლითონის დეტალის ზედაპირზე დასმულ $0.1 - 0.2\text{მმ}$ სისქის სპეციალურ ფენას წარმოადგენს, რომელიც ზედაპირს ტენის, კოროზიის და ქიმიურად აქტიური გარემოს ზემოქმედებისაგან იცავს, ხოლო ლითონის ზედაპირზე კი ელექტრულ იზოლაციას ქმნის, მაგალითად სპილენძის მინანქარ მავთული. მინანქრის დაფენა ანუ ზედაპირის მოჭიქურება მინამინანქრის და წყლის სუსპენზიის დეტალის ზედაპირზე შესხურებით, ხოლო შემდეგ თერმული დამუშავებით ხდება.

მინაბოჭკო მინის უწვრილესი (4-7 მკმ) ძაფების ნაგრეხს წარმოადგენს, რომელსაც მაღალი ელასტიურობა ახასიათებს. მინის ძაფები სპეციალურ მინის ძაფმომღებ დანადგარში მზადდება, სადაც მინამასის ბურთულების დნობისას დანადგარის ფსკერის ნახერყტებიდან მინის ძაფების ნაკადი გამოედინება. ისინი სწრაფად ცივდებიან და ერთმანეთში იგრიხებიან. საბოლოოდ სხვადასხვა დიამეტრის მინის ბოჭკო მიიღება. მინაბოჭკოსაგან მინის ქსოვილები იქსოვება, რომლებიც მაღალი სითბომედეგი ელექტროსაიზოლაციო ნაკეთობათა დასამზადებლად გამოიყენება.

მინაბოჭკო აგრეთვე შუქგამტარების დასამზადებლად გამოიყენება. ისინი კავშირგაბმულობაში სიგნალის გადაცემის თანამედროვე საშუალებას წარმოადგენენ.

სიტალები მინათა განსაკუთრებული სახეობაა. ისინი სპეციალური მინამასის კრისტალიზაციით მიიღება. სიტალები მინებისა და კერამიკის შუალედური თვისებებით ხასიათდებიან. ამის გამო მათ ზოგჯერ მინაკერამიკებსაც უწოდებენ.

§ 5-18 ელექტროტექნიკური კერამიკების მიღება

კერამიკები რთული შემადგენლობის არაორგანულ ნივთიერებებს ეწოდება. კერამიკული ნაკეთობანი ფართოდ გამოიყენებიან ელექტროტექნიკაში, რადიოტექნიკაში, ელექტრონიკაში და მათ ელექტროკერამიკებს, ანუ კერამიკულ მასალებს უწოდებენ. ისინი დიელექტრიკულ, ნახევარგამტარულ, მაგნიტურ, ლითონოკერამიკული და სხვა თვისებებს ავლენენ.

ნებისმიერი ელექტროკერამიკული ნაკეთობა გარკვეული ქიმიური შემადგენლობის საფორმო მასისაგან მიიღება. ის მრავალფაზური შემადგენლობისაა და კრისტალურ, ამორფულ და აირად ფაზებს შეიცავს.

ელექტროკერამიკებიდან ყველზე უფრო გავრ-

ცვლელის ფაიფურის ანუ ელექტროფაიფურის ნაკეთობანი. მათ სხვადასხვა ძაბვის და სიხშირის იზოლატორები, დაბალსიხშირული და მაღალსიხშირული საკონსტრუქციო ფაიფურის ნაკეთობანი, თერმორკალმედეგი დეტალები, რკალმქრობი კამერები და სხვა მიეკუთვნებიან. ამ ნაკეთობათა მასა რამოდენიმე გრამიდან ასეულ კილოგრამამდე, გაბარებები კი რამოდენიმე მილიმეტრიდან რამოდენიმე მეტრამდე. მუშა ძაბვა - 1000 კილოვოლტს, ხოლო მუშა ტემპერატურები 300°C - მდეა.

ელექტროფაიფურის ნაკეთობათა დამზადების პროცესი შემდეგ ძირითად ეტაპებს მოიცავს:

1. საწყისი კერამიკული საფორმო მასის მომზადება;
2. ნაკეთობის ფორმირება;
3. ნაკეთობის გაშრობა;
4. ნაკეთობის მოჭიქურება;
5. ნაკეთობის გამოწვა;
6. ნაკეთობის გაფორმება და არმირება.

ძირითადი ამოსავალი მასალა, რომლისგანაც ფაიფურის ნებისმიერი ელექტროსაიზოლაციო ნაკეთობა მზადდება საფორმო მასა ანუ შლიკერია. ის ცომისებური მასა, რომელიც შემდეგი კომპონენტებისაგან შეიცავს:

1. პლასტიკური - 40÷43% (კაოლინები, თიხები, თაბაშირი და პირიტი);
2. ქვისებური - 15÷17% (კვარცის ქვიშა, ფაიფურის ნამსხვრევი);
3. მინაწარმოქმნელი - 41÷45% (მინდერის შპატი, პეგმატიტები და სხვა).

ზემოთ ჩამოთვლილი კომპონენტები წინასწარ იფქვება. შემდეგ კი გარკვეული კონცენტრაციით ერთმანეთში აირევა და ბოლოს ვიბრაციულ შემრევებში წყალთან ერთად სუსპენზიას წარმოქმნიან, რომელსაც შლიკერს უწოდებენ. შლიკერში წყლის შემადგენლობა 50-60% - ია. საფორმო (ცომისებური) პლასტიკური მასის მიღებისათვის შლიკერში წყლის შემცველობა ფილტრ-

წინეში გატარებით 20%-ამდე მცირდება.

ფაიფურის ნაკეთობის ფორმირებისათვის საფაიფურე მასას სპეციალურ ფორმებში - ყალიბებში ჩამოასხამენ, შეშრობის შემდეგ ფორმებიდან ამოღებული ნახევარფაბრიკატი დასამზადებელი ნაკეთობის ზუსტ სახეს იმეორებს. მცირე ზომის ნაკეთობის დამზადებისას ჩამოსხმა თვითღინებით, ხოლო დიდი ზომებისას კი დაწნევით ხდება.

ფორმირებულ ფაიფურის ნაკეთობებს საშრობ კამერებში ეტაპობრივად გამოაშრობენ, ზედაპირის ხორკლიანობას ასწორებენ და აშრობენ, რის შემდეგ ნაკეთობის ტენიანობა 1,0% - მდე მცირდება.

შემდეგი ეტაპია მშრალი ფაიფურის ნახევარფაბრიკატის მოჭიქურება ანუ მისი ზედაპირის მინამასის სუსპენზიით დაფარვა. მოჭიქურების დანიშნულებაა, ფაიფურის კრიალა, ტენშეულწვეადი ზედაპირის მიღება, რაც განსაკუთრებით ღია ატმოსფეროში მომუშავე იზოლატორებისათვისაა აუცილებელი.

მოსაჭიქურებელი მინამინანქრის წყლიანი სუსპენზიის მიღება იგივე ტექნოლოგიით ხდება, როგორც საფაიფურე მასის, მაგრამ მინამინანქარში მინაწარმოქმნილი კომპონენტები 60%-ს შეადგენს, დანარჩენი კი პლასტიკური თიხებია. მინამასის წყლიან სუსპენზიას მოსამინანქრებელ ზედაპირზე ფუნჯით ან მფრქვევანათი შეასხურებენ, შემდეგ კი აშრობენ.

ფაიფურის ნაკეთობის დამზადების მთავარი ეტაპი გამოწვის პროცესია. გამოსაწვავ ნაკეთობებს ალის პირდაპირი ზემოქმედებისაგან დასაცავად ცეცხლმედებ მასალისგან დამზადებულ ცილინდრებში ათავსებენ, შემდეგ ღუმელში გადააქვთ.

ელექტროფაიფურის წარმოებაში უწყვეტი მოქმედების ე.წ. გვირაბული ღრმულები გამოიყენება, რომელშიც გარკვეული სიჩქარით გამოსაწვაეი ნაკეთობით დატვირთული რკინის ურიკები მოძრაობენ. გვირაბული ღრმულის სიგრძე 130 მეტრამდეა. მის ყოველ მონაკვეთზე გამოწვის ეტაპების შესაბამისი ტემპერატურაა. გამოწვის

პროცესი 50÷65 საათს გრძელდება და ექვს ეტაპს მოიცავს.

პირველი ეტაპი 3-5 საათი გრძელდება და ტემპერატურა 150°C აღწევს. ამ ეტაპზე ნაკეთობიდან წყალი მაქსიმალურად გამოდის. მეორე ეტაპი 6-8 საათი გრძელდება და ტემპერატურა 150°C - დან 920°C - მდე იზრდება. ამ ეტაპზე მუანგავი გარემო იქმნება, იშლება თიხები და გამოიყოფა ქიმიურად დაკავშირებული წყალი. მესამე ეტაპზე ტემპერატურა 1020°C აღწევს, იწყება შემადგენელი კომპონენტების დაშლა და აქროლადი ნივთიერებების ინტენსიური გამოყოფა. ეს ეტაპი 12-14 საათი გრძელდება. მეოთხე და მეხუთე ეტაპზე გამოწვის ტემპერატურა 1320°C-მდე იზრდება. რის შედეგადაც ამორფული ფაზა - მინა და კრისტალური ფაზა - მულიტი წარმოიქმნება. ამ ეტაპების ხანგრძლივობა 9-12 საათია და მისი დამთავრების შემდეგ ფაქტიურად ფაიფურის ნაწარმი მიღებულია.

გაცივების შემდეგ (25სთ) მიღებული ნაკეთობა კაფსელებიდან გადმოიტირთება და დახარისხდება.

ფაიფურის ნაკეთობის დაშლადების ბოლო ეტაპი ფაიფურის ტანზე ლითონის არმატურის დამაგრება (არმირება) და იზოლატორის საბოლოო სახის მიცემაა.

ზემოთ აღწერილი შემადგენლობის და დამზადების ტექნოლოგიით მიღებული ელექტროტექნიკური ფაიფური შემდეგი ძირითადი მაჩვენებლებით ხასიათდება:

1. სიმკვრივე - D_{20} ----- -2300÷2500 კგ/მ³
2. სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე ----- 400÷700 მპა
3. სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე ----- 40÷70 მპა
4. დიელექტრიკული შეღწევადობა - ϵ_r ----- -6÷8
5. კუთრი წინაღობა - ρ ----- - $10^{12} \div 10^{13}$ ომი.მ
6. დიელექტრიკული დანაკარგები $\epsilon \delta$ ----- - 0,015÷0,025
7. ელექტრული სიმტკიცე - $E_{გაზა}$ ----- -10÷35 კე/მმ

§ 5-19 ქარსი და ქარსშემცველი მასალები

ბუნებრივი მასალებიდან ქარსი ერთ - ერთი საუკეთესო დიელექტრიკული მასალაა. მას მთელი რიგი შესანიშნავი მახასიათებელი გააჩნია, როგორცაა საუკეთესო დიელექტრიკული, სითბური და მექანიკური თვისებები. ის ფართოდ გამოიყენება მაღალი ძაბვის და დიდი სიმძლავრის ელექტრული მანქანების, რადიო-ელექტრული, ვაკუუმური და სხვა ხელსაწყოების დასამზადებლად. ელექტროვაკუუმურ ხელსაწყოებში ქარსი, როგორც საიზოლაციო ასევე კონსტრუქციული დანიშნულებით გამოიყენება.

ქარსის ელექტრული მახასიათებლები

ცხრ. 5-3

პარამეტრები	მუსკოვიტი	ფლოგოპიტი
დიელექტრიკული შელწევადობა - ϵ_r	6-8	5-7
კუთრი წინააღმდეგობა ρ ომი.მ	10^{10} - 10^{12}	10^{11} - 10^{12}
დიელექტრიკული დანაკარგები $\text{tg}\delta$	0,0003-0,015	0,0015-0,05
ელექტრული სიმტკიცე $E_{\text{გარ}}$ კვ/მმ	150-300	70-100

ქარსი სასარგებლო წიაღისეულის სახით ისეთ მინერალებთან ერთად მოიპოვება, როგორებიცაა კვარცი და მინდერის შპატი. მრავალი სახეობის ქარსებიდან ელექტრული იზოლაციის დასამზადებლად მხოლოდ ორი გამოიყენება. მუსკოვიტი - $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. უფრო, მოწითალო ან მომწვანო ფერის და ფლოგოპიტი - $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. მუქი ყავისფერი ან ოქროსფერი მინერალი.

სანგრევიდან ამოღებული ქარსის მადანი გარკვეული ზომის ნაჭრებად გადაირჩევა, იხლიჩება 0.01 - დან 0.045 მმ სისქის ფირებად და ასეთს ნახლენ ქარსს უწოდებენ. გამოყენებამდე ნახლენი ქარსის ფირები ფართისა და სისქის მიხედვით ხარისხდება.

მუსკოვიტის ქარსს უფრო მაღალი დიელექტრი-

კული თვისებები გააჩნია ვიდრე - ფლოგოპიტისას (კხრ. 5-3). გარდა ამისა, მუსკოვიტი მექანიკურად უფორ მტკიცე, დრეკადი, მოქნილი და ნაკლებად ცვეთადია. ქარსის ორივე სახეს მაღალი სითბური თვისებები აქვთ. სითბომედეგობის ზღვრით კი C კლასის საიზოლაციო მასალებს მიეკუთვნებიან.

მაღალი დიელექტრიკული თვისებები ქარსის ფართო გამოყენებას განაპირობებს. მაგალითად, უმაღლესი ხარისხის ნახლენი მუსკოვიტი მარკით CO - ქარსიანი ეტალონური კონდენსატორების დასამზადებლად გამოიყენება.

ქარსის დიელექტრიკული მახასიათებლები პრაქტიკულად უცვლელია ტემპერატურისა და სიხშირის დიდ დიაპაზონში ($t=-200-300^{\circ}\text{C}$), $f=100\text{მგჰერცამდე}$).

ქარსისაგან კომპოზიციურ ელექტროსაიზოლაციო მასალებს - მიკანიტებს ამზადებენ, რომელიც ელექტრომანქანათმშენებლობის ერთ - ერთ ძირითად საიზოლაციო მასალას წარმოადგენენ. მიკანიტი (mica ლათ. ქარსი) ფურცლოვანი ან რულონური მასალაა, რომელიც ქარსის ფურცლების ერთმანეთთან შემწებავი ლაქის შეწებით მიიღება. ზოგჯერ მექანიკური თვისებების გაზრდის მიზნით ქარსის ფურცლებს ორგანული და არაორგანული წარმოშობის ქაღალდზე ან ქსოვილზე აწებებენ.

დანიშნულებისა და შემადგენლობის მიხედვით მიკანიტების შემდეგი სახე არსებობს.

საკოლექტორო მიკანიტი დაწნეხილ მასალას წარმოადგენს. მიიღება ფლოგოპიტის ფურცლების ერთმანეთთან შელლაქის ან გლიფთალის ლაქის შეწებით. ის ელექტრული მანქანის კოლექტორის ფირფიტების ერთმანეთისაგან იზოლირებისათვის გამოიყენება. მისი მუშა ტემპერატურა 160°C - ია.

საფორმო მიკანიტი ერთმანეთთან შეწებებულ მუსკოვიტის ან ფლოგოპიტის ფურცლებს წარმოადგენს. შემწებავად გლიფთალის, პოლიეთერის ან კაუბადორგანული ლაქები გამოიყენებიან. საფორმო მიკანიტი ნორ-

მაღურ ტემპერატურაზე მყარია, გახურებისას კი რბილდება და შესაძლებელია დაწნეხვით სხვადასხვა სახის ფორმა მიიღოს, რომელსაც გაიცვივების შემდეგ ინარჩუნებს. საფორმო მიკანიტებისაგან ელექტრული მანქანებისა და აპარატების ელექტროსაიზოლაციო დეტალები მზადდება.

საფორმო მიკანიტებში ქარსის შემცველობა 80-95% - ია. მისი განსაკუთრებული სახეობა მიკაფოლია, რომელიც მინაქსოვილზე ან მინაბადეზე შემწებაებით დაკავშირებულ მუსკოვიტის ან ფლოგოპიტის ფურცლებს წარმოადგენს. მასში ქარსის შემცველობა 45-50% - ს არ აღემატება. მიკაფოლისაგან მაღალი ძაბვის მანქანების ღუზის გრაგნილების იზოლაცია მზადდება.

ღრეკადი მიკანიტები ქალაღზე, მინაქსოვილზე ან მინაბადეზე ნახლქი ქარსის დიდი ზომის ფურცლების შეწების გზით მიიღებიან. მათი ნაირსახეობაა მიკალენტა. მისგან ელექტრული მანქანების სტატორის და როტორის გრაგნილთა ღრმულების იზოლაცია მზადდება.

თერმომდეგი მიკანიტები სითბომდეგი ფლოგოპიტის ფურცლების ფოსფორმჟავა ამონიუმის ხსნარით შეწებებით და შემდგომი თერმული დამუშავებით მზადდებიან. შემწებავად ადვილად დნობადი მინაც გამოიყენება, ასეთი მიკანიტები იმ ელექტროტექნიკურ ხელსაწყოებში გამოიყენებიან, სადაც მუშა ტემპერატურები რამოდენიმე ასეულ გრადუსს აღწევს.

სიძვირისა და ძნელად მოპოვების გამო, ქარსის ნარჩენებიდან ქარსის შემცველ მასალებს ამზადებენ. ისინი ქარსიტების და ქარსპლასტების სახელით არიან ცნობილი.

ქარსიტები მუსკოვიტის დაქუცმაცებული ნარჩენების 900°C ტემპერატურაზე თერმოდამუშავებით მიიღება. ამ დროს მუსკოვიტიდან წყალი გამოიყოფა, ხოლო დანარჩენი მასა ძლიერ ფუედება, რომელიც ჯერ ტუტის, შემდეგ მუავის ხსნარებით მუშავდება და ბოლოს წყლით ირეცხება. მიღებული პულპებისაგან ქალაღის საკეთე-

ბელი მანქანით ქარსის ქაღალდი - ქარსიტი მიიღება.

მშრალი ქარსიტი მაღალი დიელექტრიკული თვისებებით ხასიათდება, მაგრამ წყლის შეხებისას იშლება, ამიტომ მას გამჟღენთ ლაქებს შეურევენ და ორივე მხარეს მინა ქსოვილის ლენტით ფარავენ. შედეგად, საკილექტორო, საფორმო და დრეკადი ქარსიტის ლენტები მიიღება. ამ ლენტების დიელექტრიკული მექანიკური და თბური თვისებები ოდნავ ჩამორჩებიან მიკანიტებს თვისებებს.

აქტიური დიელექტრიკები

დიელექტრიკებს რომელთა თვისებების ცვლილება ფუნქციონალური დანიშნულების შესასრულებლად გამოიყენება აქტიურ (მართვად) დიელექტრიკებს უწოდებენ.

პასიურ დიელექტრიკებს გარეშე (ენერგეტიკული) ზემოქმედებით ელექტრული პარამეტრების სტაბილურობა მოეთხოვება, ხოლო აქტიურ დიელექტრიკებს კი პირიქით, ელექტრული პარამეტრები დიდ დიაპაზონში ეცვლება. რაც მეტია ეს ცვლილება მით მეტად მგრძობიარეა დიელექტრიკი და მეტად კარგად ასრულებს აქტიური დიელექტრიკის ფუნქციას.

აქტიურ დიელექტრიკზე გარეშე ენერგეტიკული ზემოქმედების როლში როგორც ელექტრული (ელექტრული ან მაგნიტური ველი, სიხშირე), ასევე არაელექტრული ფაქტორები (წნევა, ტენიანობა, მექანიკური დაძაბულობა, ტემპერატურა, სიჩქარე, აჩქარება და სხვა) გვევლინება, ისინი აქტიური დიელექტრიკის წინააღმდეგობას, დიელექტრიკულ შეღწევადობას, მაგნიტურ თვისებებს ან პოლარიზაციის ვექტორის მიმართულებას, გარკვეული კანონზომიერებით ცვლიან, ამასთან ერთად შესაძლებელია ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივებაც. ერთი სიტყვით აქტიურ დიელექტრიკზე ზემოქმედება გარკვეული კანონზომიერებით ელექტრულ სიგნალად გარდაიქმნება. ე.ი. აქტიური დიელექტრიკი გარეშე ზემოქმედების შემგრძობი ელემენტის (sensor - ინგ. გადამწოდის) როლს ასრულებს. ამასთანავე აქტიური დიელექტრიკების ბაზაზე დამზადებული გადამწოდები გაცილებით მცირე სიდიდის ენერგიას მოითხოვენ, ვიდრე ნახევრად გამტარებით ან გამტარი მასალებით შექმნილი ანალოგიური ხელსაწყოები.

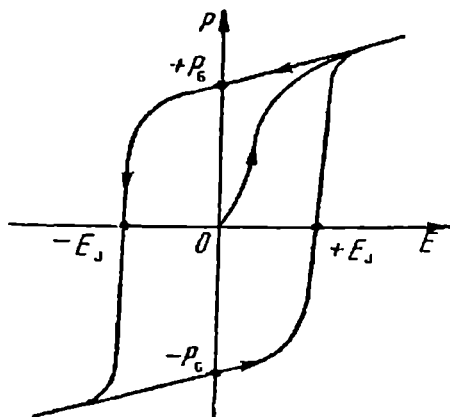
როგორც წესი აქტიურ დიელექტრიკებზე გარეშე ზემოქმედება ერთდროულად რამოდენიმე თვისების ცვლილებას იწვევს. ეს კი საშუალებას გვაძლევს აქტი-

ური დიელექტრიკი მრავალფუნქციონალური დანიშნულებით გამოიყენოთ.

აქტიური დიელექტრიკებიდან პრაქტიკაში სეგნეტოელექტრიკები, პიესოელექტრიკები, პიროელექტრიკები, ელექტრეტები, კვანტური ელექტრონიკის მასალები, და თხევადი კრისტალები გამოიყენებიან.

§ 6-1 სეგნეტოელექტრიკები

სეგნეტოელექტრიკები ეწოდებათ ნივთიერებებს, რომლებშიც ელექტრული ველის მოქმედების გარეშე



ნახ. 6-1. იდეალური სეგნეტოელექტრიკის დიელექტრიკული პისტერეზისი

სპონტანური (თავისთავადი) პოლარიზაცია არსებობს. მისი მიმართულების შეცვლა გარე ზემოქმედებით ხდება და ϵ_r - ის სიდიდე ძლიერ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. აღნიშნული თვისებები პირველად სეგნეტას მარილში (NaK , $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_6$, $4\text{H}_2\text{O}$) აღმოაჩინეს და შემდგომ ნივთიერებათა იმ ჯგუფს, რომლებსაც მსგავსი თვისებები აღმოაჩნდათ (700 - მდე

ნივთიერება) სეგნეტოდიელექტრიკები უწოდეს.

განსხვავებით ჩვეულებრივი დიელექტრიკებისა სეგნეტოდიელექტრიკებში გარეშე ველის დაძაბულობის ცვლილებით პოლარიზაციის ვექტორი (\bar{P}) სწორხაზოვნად არ იცვლება. ამ დამოკიდებულებას $\bar{P} = f(E)$,

ზოგადად ჰისტერეზისის (ბერძ. *hysterzesis* - ჩამორსენა) მარყუვის ფორმა აქვს (ნახ. 6-1).

სეგნეტოდიელექტრიკების მიკრომოცულობის ყველა ელემენტალური უჯრედის პოლარიზაციის ვექტორს ერთი მიმართულება გააჩნია. ე.ი. წარმოქმნიან პოლარიზებულ მოცულობას - დომენებს. მოსაზღვრე დომენების პოლარიზაციის ვექტორები ერთმანეთის მიმართ 180° - ით არიან დაპრული (ნახ. 6-2) (განსხვავებით მაგნიტური დომენებისა, რომლებიც ქაოსურად არიან ორიენტირებული.) რის გამოც პოლარიზაციის მთლიანი ჯამური ვექტორი ნულის ტოლია ($P = 0$).

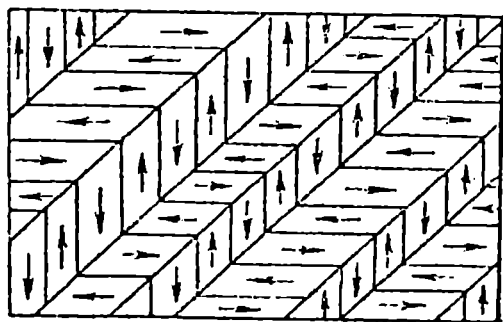
მიკრომოცულობის სპონტანური პოლარიზაცია და დომენური სტრუქტურის აღნიშნული ორიენტაცია სეგნეტოდიელექტრიკის მოლეკულაში მიმდინარე შინაგანი პროცესებით არის განპირობებული და გარეგანი ფაქტორების გარეშე მიმდინარეობს.

დომენების გეომეტრიული ზომები $10^{-3} \pm 1 \mu\text{მ}$ - ს არ აღემატება. ამ ზომების მეტად გაზრდა გარეგანი ზემო-

ქმედების გარეშე შეუძლებელია.

სეგნეტოდიელექტრიკზე გარეშე ველის მოქმედებით ($E \neq 0$) დომენების პოლარიზაციის ვექტორები ველის გასწვრივ ორიენტაციას იწყებენ, ნახ. 6-1 რის გამოც ($p = f(E)$) და-

მოკიდებულებას



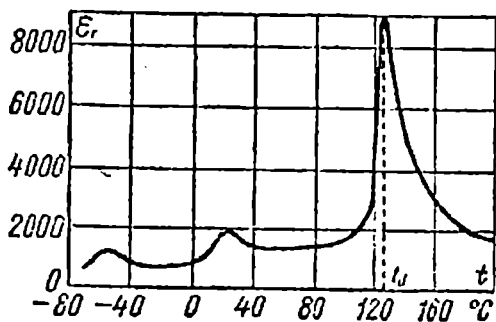
ნახ. 6-2. სეგნეტოდიელექტრიკში დომენების სქემატური განლაგება

არაწრფივი სახე აქვს, როდესაც ყველა დომენი ორიენტირებულია ველის გასწვრივ, მაშინ მათ შორის გარკვეული ურთიერთქმედება მყარდება, რის გამოც E-ს შემცირებით მრუდი თავის თავს არ იმეორებს და როდესაც

$E=0$ ადგილი აქვს ნარჩენ პოლარიზაციას (P_r). იმისათვის, რომ პოლარიზაციის ვექტორი ნულის ტოლი გახდეს აუცილებელია ელექტრული ველს მიმართულება შეიცვალოს და ვიმოქმედოთ $E=-E_p$. E_p -ს კოპერციულ (ლათ. *coherentis* - შემაკავებელ) ველის დაძაბულობას უწოდებენ.

E_p - სიდიდის მიხედვით სეგნეტოელექტრიკების კლასიფიკაციას ახდენენ. კერძოდ თუ $E_p < 0,1$ კვ/მმ სეგნეტოელექტრიკებს სეგნეტურბილებს უწოდებენ. ასეთი სეგნეტოელექტრიკები ადვილად სამართავეები არიან და ტემპერატურის გაზრდით სეგნეტოელექტრულ თვისებებს კარგავენ, ხოლო სეგნეტოხისტი მასალებისათვის $E_p > 1$ კვ/მმ, მათი მართვა დაბალ ტემპერატურაზე გაძნელებულია და მაღალტემპერატურული ხელსაწყოების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

როგორც წესი სეგნეტოელექტრიკები ϵ_r - ის დიდი მნიშვნელობით



ნახ. 6-3. ბარიუმის ტიტანისათვის ϵ_r -ის დამოკიდებულება t -ზე

ხასიათდებიან, მისი სიდიდე 100 - დან - 25000 - მდე იცვლება, ხოლო თხელი ფირებსთვის კი ϵ_r 150000 - მდე აღწევს. განსხვავებით სხვა სახის დიელექტრიკებისა სეგნეტოელექტრიკებისათვის ϵ_r -ის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე რთული სახე

აქვს და ველის დაძაბულობის მიხედვით იცვლება.

ნახ. 6-3 - ზე მოყვანილია ბარიუმის ტიტანატისათვის ($BaTiO_3$) ϵ_r - ის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე სუსტ ელექტრულ ველში, საიდანაც ჩანს, რომ გარკვეულ

ტემპერატურაზე ϵ_r - ის სიდიდე საგრძნობლად იზრდება. ამ ტემპერატურას კიურის ტემპერატურას უწოდებენ (t_k). თუ ტემპერატურა t_k - ზე ნაკლებია მაშინ სეგნეტოელექტრიკი სეგნეტოელექტრიკულ თვისებებს ამჟღავნებს, მაგრამ თუ $t > t_k$, მაშინ სეგნეტოელექტრიკული თვისებები ქრება და სეგნეტოელექტრიკი ჩვეულებრივი დიელექტრიკის თვისებებს იძენს. ტემპერატურის შემცირებით კი სეგნეტოელექტრიკული თვისებები ისევ აღდგება. ეს მოვლენა სეგნეტოელექტრიკის ელემენტალურ უჯრედში ტემპერატურის მოქმედებით გამოწვეულ ცვლილებებს უკავშირდება.

ზოგიერთი სახის სეგნეტოელექტრიკებს, როგორც დიელექტრიკული ასევე მაგნიტური დომენური სტრუქტურა გააჩნია. მათ ერთდროულად ახასიათებთ როგორც დიელექტრიკული შეღწევადობის ასევე მაგნიტური განვლადობის დიდი მნიშვნელობა და ერთდროულად აქვთ, როგორც დიელექტრიკული ასევე მაგნიტური განვლადობის კიურის წერტილი. ასეთ მასალებს *სეგნეტომანეტიკებს* უწოდებენ და დღეისათვის ფართოდ გამოიყენებიან.

საინტერესო თვისებები გააჩნიათ *სეგნეტონახევრად* გამტარებს, რომლებსაც სეგნეტოელექტრიკულ თვისებებთან ერთად ნახევრად გამტარის თვისებები ახასიათებს.

ზოგიერთი სახის სეგნეტოელექტრიკებს მართკუთხა ფორმის ჰისტირეზისის მარყუჟი აქვს, პოლარიზდებიან გარეშე ველის მცირე დაძაბულობაზე და პოლარიზებულ მდგომარეობას ($-P_6$ ან $+P_6$) ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ინარჩუნებენ. მათი ეს თვისება ფართოდ გამოიყენება სწრაფმომქმედი მცირე ზომის მახსოვრობის ელემენტების შესაქმნელად. კერძოდ $+P_6$ მდგომარეობა "1" შეესაბამება, ხოლო $-P_6$ კი "0" - ს. ინფორმაციის შეყვანა ან წაშლა ელექტრული ველის ან სინათლის სხივის საშუალებით ხდება. ერთ კვადრატულ მილიმეტრ ფართობზე შესაძლებელია $4 \cdot 10^4$ დამმახსოვრებელი უჯრე-

დის შექმნა, რომელთა მდგომარეობის შეცვლის დრო 10-11 წმ - ზე ნაკლებია.

უმეტესი სეგნეტოელექტრიკების ϵ , არაწრფივად და დამოკიდებული გარეშე ველის ან ტემპერატურის სიდიდეზე. ეს კი საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ არაწრფივი ტევადობის კონდენსატორი ვარიკონდი, რომლის ტევადობა გარეშე ველის დაძაბულობის (ელექტრომგრძნობიარე ვარიკონდი) ან ტემპერატურის მიხედვით იცვლება (თერმო მგრძნობიარე ვარიკონდი). ვარიკონდები ავტომატიკისა და ზემდალ სიხშირეებზე მომუშავე აპარატებში თერმოკომპენსაციური სისტემების შესაქმნელად გამოიყენებიან.

სეგნეტოელექტრიკების გარკვეული ჯგუფი ტემპერატურის -50°C - დან $+80^{\circ}\text{C}$ - მდე ინტერვალში ϵ , - ის ტემპერატურაზე სუსტად დამოკიდებულებით ხასიათდება, ეს კი საშუალებას იძლევა სეგნეტოელექტრიკებისაგან შევქმნათ მკირე გეომეტრიული ზომის და დიდი ელექტრული ტევადობის მქონე კონდენსატორი. ამისათვის კერამიკული სეგნეტოელექტრიკები გამოიყენება, რომელთა ϵ , - ის სიდიდე 600-დან 1200-მდე იცვლება.

§ 6-2 პიეზოელექტრიკები

მექანიკური ზემოქმედებით დიელექტრიკის პოლარიზაციას, რის შედეგადაც ზედაპირზე მიუხტების დაგროვდება ხდება პირდაპირ პიეზოეფექტს, ხოლო ველის მოქმედებით პოლარიზაციისას დიელექტრიკის გეომეტრიული ზომების შეცვლას შებრუნებულ პიეზოეფექტს უწოდებენ. ის დიელექტრიკები რომლებშიც პიეზოეფექტური მოვლენები ძლიერ გამოხატულია პიეზოელექტრიკების სახელითაა ცნობილი. პიეზოეფექტური მოვლენები თითქმის ყველა დიელექტრიკში იჩენს თავს (მათ შორის თხევადშიც), მაგრამ ძლიერადაა გა-

მოხატული იმ დიელექტრიკებში, რომლებსაც ϵ_r - ის დიდი მნიშვნელობა აქვს და კრისტალურ სტრუქტურაში სიმეტრიის ცენტრი არ გააჩნია.

პიესოფექტის ადვილად გამოვავლენთ, თუ პიესოელექტრიკს მეტალის ორ ფირფიტას შორის მოვათავსებთ და მასზე გარკვეული სიდიდის ძალით ვიმოქმედებთ, მაშინ ფირფიტებს შორის პოტენციალთა სხვაობა წარმოიქმნება, რომლის სიდიდე მექანიკური დაძაბულობის პროპორციულია, ამასთანავე მნიშვნელობა არ აქვს მექანიკური დაძაბულობის მიმართულებას (შეკუმშვა თუ გაჭიმვა), მნიშვნელოვანია მისი სიდიდე, მაგრამ მექანიკური დაძაბულობის მიმართულების შეცვლით პოტენციალთა სხვაობის ნიშანი იცვლება.

შებრუნებული პიესოფექტისას, კერძოდ ცვლადი გარეშე ველის მოქმედებით პიესოელექტრიკის გეომეტრიული ზომების ცვლა იმავე სიხშირით ხდება რა სიხშირის ელექტრული ველიც მოქმედებს დიელექტრიკზე.

პიესოელექტრული მოვლენები თითქმის 1000 - მდე დიელექტრიკშია აღმოჩენილი, მათ შორის ყველა სეგნო-დიელექტრიკში, მაგრამ პიესოელექტრული ხელსაწყოების შესაქმნელად მცირე მათგანი გამოიყენება, ისიც მონოკრისტალების სახით, რომელთაგან აღსანიშნავია მთის ბროლი - კვარცის (SiO_2) მონოკრისტალური სახეობაა. გამოიყენება როგორც ბუნებრივი ასევე ხელოვნური მონოკრისტალები, რომლებისგან ცენტრალური ოპტიკური ღერძის პერპენდიკულარულად თხელ ფირფიტებს ჭრიან. მონოკრისტალური კვარცი რხევით კონტურებში ეტალონური სიხშირეების მისაღებად გამოიყენება. კერძოდ რადიოგადამცემებში, ლოკატორებში, ელექტრონულ საათებში და სხვა დანადგარებში.

სეგნეტოდიელექტრიკებში იზოტროპიულობის გამო პიესოფექტი სუსტად არის გამოხატული, მაგრამ თუ სეგმენტოელექტრიკებს მაღალ ტემპერატურაზე ძლიერ ელექტრულ ველში მოვათავსებთ და ველის მოქმედებით გავაცვივებთ, მაშინ ის ანიზოტროპიული გახდება ე.ი.

მიიღება პიეზოელექტრიკად გამოსაყენებელი წინასწარ პოლარიზებული სეგნეტოელექტრიკი, რომელსაც *პიეზოკერამიკას* უწოდებენ. ამ მიზნით ძირითადად ტყვიის ცირკონატის ($PbZrO_3$) და ტყვიის ტიტანატის ($PbTiO_3$) - მყარი ხსნარი გამოიყენება.

პიეზოელექტრიკებისგან ამზადებენ: მექანიკური ენერჯიის ელექტრულ ენერჯიად გარდაქმნელ ხელსაწყოებს, ულტრაბერით გამომსხივებლებს, ჰიდროაკუსტიკურ ხელსაწყოებს, დეფექტოსკოპებს, მცირეგაბარიტიან მიკროფონებს, ტელეფონებს, სასმენ აპარატებს, დეტონატორებს, იმპულსურ ამფეთქებლებს და სხვა.

უკანასკნელ წლებში ფართო გამოყენება ჰპოვა მცირე სიმძლავრის, მაღალი ძაბვის პიეზოელექტრულმა ტრანსფორმატორებმა, რომლებსაც მაგნეტოგამტარი არ გააჩნია (ნახ. 6-4). ასეთი ტრანსფორმატორი პიეზოელექტრიკის ფირფიტას წარმოადგენს, რომლის ერთი ნაწილი (რხევების აღმზნები) წინასწარ პოლარიზდება სისქის გასწვრივ (ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ანალოგი), ხოლო მეორე ნაწილი (გენერატორი) ასევე წინასწარ სიგრძეზე პოლარიზდება (მაღალი ძაბვის გრაგნილი). აღმზნებზე მოქმედი ცვლადი ელექტრული ველი პიეზოელექტრიკის ფირფიტაში გრძივ მექანიკურ რხევებს წარმოქმნის, რის გამოც გენერატორულ ნაწილში

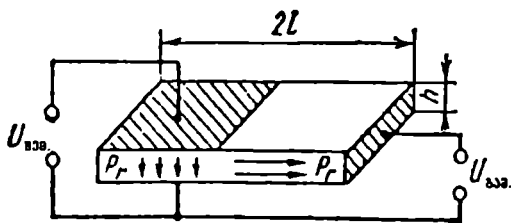
იმავე სიხშირის

პოტენციალთა სხვაობა აღიძვრება.

ტრანსფორმაციის

კოეფიციენტი $\frac{2l}{h}$

სიდიდის პროპორციულია და რამოდენიმე ასეულს აღწევს. ასეთი



ნახ. 6-4. პიეზოელექტრული მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორი

ტრანსფორმატორები 10-500 კილოჰერც სიხშირის დიაპა-

ზონში მუშაობენ, ხასიათდებიან მარტივი ტექნოლოგიით, საიმედოობით, ძალიან იაფები არიან და გამოიყენებიან მცირე სიმძალერის წრედებში, როგორცაა ელექტრო - სხივური და აირგანმუხტვადი ხელსაწყოების კვება, მიკრო ნაწილაკების მთელელები და სხვა.

§ 6-3 პიროელექტრიკები

ტემპერატურის მოქმედებით დიელექტრიკის პოლარიზაციას, როდესაც მაზე ელექტრული ველი არ მოქმედებს პიროელექტრული ეფექტი ეწოდება (ბერძ. $\rho\gamma r$ - ცეცხლი), ხოლო იმ დიელექტრიკებს, რომლებშიც აღნიშნული მოვლენა მკვეთრადაა გამოხატული პიროელექტრიკებს უწოდებენ.

პიროელექტრიკული ეფექტის წარმოშობის ორი მექანიზმი არსებობს. პირველი ტემპერატურის შეცვლით დიელექტრიკის გეომეტრიული ზომების ცვლილების შედეგად თავს პიეზოეფექტი იჩენს, ხოლო მეორე ტემპერატურის შეცვლა ელემენტალური დიპოლური მომენტების მოწესრიგებულ მდგომარეობას არღვევს, რის შედეგად დიელექტრიკში არაკომპენსირებული მუხტი წარმოიშობა.

პიროეფექტის დასახასიათებლად გაერთიანებული პარამეტრი R_p შემოჰყავთ, რომელიც პიროეფექტის კოეფიციენტს (P), დიელექტრიკის კუთრ სითბოტევადობას (C) და ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას (ϵ_r) ითვალისწინებს.

$$R_p = \frac{P}{\epsilon_r \cdot C} \quad (6-1)$$

ერთიდაიმავე რაოდენობის სითბოს მოქმედებისას რაც მეტია R_p - ის მნიშვნელობა მით მეტი პოტენციალთა სხვაობა აღიძვრება პიროელექტრიკში ე.ი. მით ძლიერად გამოხატულია პიროეფექტი.

სუპრატონული ელექტრიკებში პიროელექტრული ეფექტი მაქსიმალურად კიურის წერტილის მახლობლად გამოვლინდება. მაგალითად თუ ნორმალურ ტემპერატურაზე ($LiNbO_3$) - ის 1მმ - ის სისქის მონოკრისტალურ ფირფიტის $1^{\circ}C$ - ით გათბობისას მის ორ გვერდს შორის 140ვ პოტენციალთა სხვაობა წარმოიშობა, კიურის წერტილის მახლობლად აღნიშნული პოტენციალთა სხვაობა 3000ვ - ს აღწევს. როგორც ვხედავთ პიროელექტრიკები ტემპერატურის მიმართ დიდი მგრძობელობით გამოირჩევიან, ამიტომ ისინი სითბური და სხივური ენერჯიის ელექტრულ ენერჯიად გარდაქმნის ხელსაწყოებში გამოიყენებიან. ისინი ინფრაწითელი დიაპაზონის ასევე ზემადალი სიხშირის ტალღებსაც ელექტრულ სიგნალებად გარდაქმნიან.

პიროელექტრული გადამწოდები სწრაფმომქმედები და მინიატურულები არიან. გამოირჩევიან პარამეტრების დიდი სტაბილურობით, მაგრამ ანალოგიურ ნახევრად გამტარულ გადამწოდებთან შედარებით ნაკლები მგრძობიარობა აქვთ.

უკანასკნელ წლებში პიროელექტრული თვისებები აღმოჩენილი იქნა ორგანული წარმოშობის დიელექტრიკებშიც, კერძოდ პოლივინილდეფთორიდში და პოლივინილდექლორიდში, რომელთა თხელ ფირებს R_3 - პარამეტრის გაცილებით მეტი სიდიდე აქვს ვიდრე არაორგანული წარმოშობის ნებისმიერ პიროელექტრიკებს.

§ 6-4 ელექტრეტი

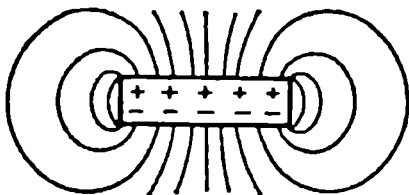
ელექტრეტი ეწოდება დიელექტრიკებს, რომლებიც გარეშე ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ პოლარიზებულ მდგომარეობას დიდი ხნის განმავლობაში ინარჩუნებენ. ამით ისინი მუდმივი მაგნიტების ელექტრულ ანალოგს

წარმოადგენენ. ელექტრეტის სხვადასხვა გვერდს საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტი აქვს (ნახ. 6-5) და პოტენციალთა სხვაობა მათ შორის დიდ მნიშვნელობას აღწევს.

სხვა სახის აქტიურ დიელექტრიკებში პოლარიზაციის გამომწვევი ფაქტორის მოქმედების შეწყვეტიდან დიელექტრიკი საწყის მდგომარეობას მცირე დროის განმავლობაში (10^{-5} - 10^{-8} წმ.) უბრუნდება, ხოლო ელექტრები პოლარიზებულ მდგომარეობას 30-50 წლის განმავლობაში ინარჩუნებენ. დიელექტრიკის ამ თვისებას *ელექტრეტულ ეფექტს* უწოდებენ.

დიდი კუთრი წინააღმდეგობის მქონე დიელექტრიკებში ელექტრეტული მდგომარეობის არსებობის შესაძლებლობა 1892 წელს ო. ჰევისაედმა იწინასწარმეტყველა, ხოლო 1929 წელს იაპონელმა მეცნიერმა მ. ეგუჩიმ პალმის ცვილისა და კანიფოლის გამდნარი ნარევის ძლიერ ელექტრულ ველში გაცივებით ელექტრეტი მიიღო.

გამდნარ მდგომარეობაში დიპოლები მეტად ძვრადები არიან და ადვილად პოლარიზდებიან, ხოლო ველში გაცივებით თითქოს დიპოლები პოლარიზებულ მდგომარეობაში “გაიყინეს”. ამ მეთოდით მიღებულ ელექტრეტებს *თერმოელექტრეტებს* უწოდებენ.



ნახ. 6-5 ელექტრეტის მუხტი და ველის ძალწირები

ელექტრიკს მოვათავსებთ, მაშინ განმუხტვის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრონები ელექტრეტის მოცულობაში გარკვეულ სიღრმემდე აღწევენ და დიელექტრიკის მოლეკულებს უკავშირდებიან. ასეთ ელექტრეტებს *გვირგვინო ელექტრეტებს* უწოდებენ.

დიელექტრიკის ორი ნაჭერის ერთმანეთზე ხახუნის შედეგად ელექტრონები ერთი დიელექტრიკიდან მეორეზე გადადიან, ხოლო განცალკავებისას დიელექტრიკები

თუ მუდმივი ძაბვის მოქმედებით წამოქმნილ გვირგვინისებურ განმუხტვაში დი-

სხვადასხვა მუხტს შეიძენენ ასეთ ელექტრეტებს ტრიბო-ელექტრეტებს უწოდებენ. ელექტრეტების მიღების სხვა მეთოდებიც არსებობს. მაგალითად, დიელექტრიკზე მაიონიზირებელი გამოსხივების მოქმედებით რადი-ელექტრეტი, ხოლო ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მხოლოდ ელექტრული ველის მოქმედებით ელექტროელექტეტი მიიღება.

დიელექტრიკზე სინათლის სხივის მოქმედებით ფოტოელექტრულ ეფექტს აქვს ადგილი და ფოტოელექტრეტი მიიღება. ეს მოვლენა აქტიურად მკვნიარეთა ფოთლებში მიმდინარეობს.

ელექტრული ეფექტი მკვეთრად გამოხატულია ნეიტრალური პოლარიზაციის და დიდი კუთრი წინააღმდეგობის მქონე ($\rho > 10^{15}$ ომ.მ) დიელექტრიკებში, უმეტესად კი პოლიმერებში, რომელთა კლასიკური წარმომადგენელი პოლიტეტრაფთორეთილენი, პოლიკარბონატი და პოლიპროპილენია.

თეორიულად ელექტრეტული მდგომარეობის მიღება ყველა დიელექტრიკშია შესაძლებელი, მაგრამ ელექტრული ეფექტის ხანგრძლივობის დრო ზოგიერთი მათგანისათვის რამოდენიმე საათი, ხოლო ზოგიერთისათვის კი რამოდენიმე ათეული წელია, რა თქმა უნდა ამ უკანასკნელს მეტი პრაქტიკული გამოყენება აქვს.

ელექტრეტის მიერ მუხტის ხანგრძლივი შენარჩუნება მისი დიდი კუთრი წინააღმდეგობით არის განპირობებული. ტემპერატურის გაზრდით გამტარებლობა იზრდება და მუხტის სტაბილურობა მცირდება. აეტორთა მიერ დადგენილია, რომ პოლიტეტრაფთორეთილენის ($\Phi-4$) 10 მკმ - სისქის ფირში 127°C ტემპერატურამდე ზედაპირული მუხტის სიდიდე ტემპერატურაზე არ არის დამოკიდებული და სტაბილურია, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით ზედაპირული მუხტის სიდიდე მცირდება. აღმოჩნდა რომ 127°C - ზე პოლიტეტრაფთორეთილენში სტრუქტურული ცვლილებები მიმდინარეობს.

მუხტის სტაბილურობას და შესაბამისად ელექტრეტული ხელსაწყოების მუშაობის საიმედოობას არამარტო ტემპერატურა, არამედ ელექტრეტის სტრუქტურული დეფექტებიც განაპირობებენ. აღმოჩნდა, რომ თუ ელექტრეტის ზედაპირზე მუხტები თანაბრად არ არიან განაწილებული, მაშინ ელექტრეტის სტაბილურობა დაბალია. ამ განაწილების შესწავლის მიზნით ავტორთა მიერ შექმნილი იყო ხელსაწყო, რომელიც 1 მმ² ფართობზე 16 წერტილში მუხტის სიდიდეს ზედაპირზე შეუხებლად ზომავდა. ხელსაწყოს საშუალებით დადგინდა, რომ მუხტის არათანაბარი განაწილება ელექტრეტის მასალის ტექნოლოგიური დეფექტებით არის განპირობებული. ეს მოვლენა დინამიურ მიკროფონებში გამოყენებული ელექტრეტული თხელი ფირებისათვისაა მნიშვნელოვანი.

დინამიური ელექტრეტული მიკროფონები მცირე ზომებით 2 ÷ 3მმ, მუშაობის დიდი ხანგრძლივობით (10-15 წელი), ენერჯიის მცირე მოთხოვნით და სხვა უპირატესობით გამოირჩევიან.

§ 6-5 ელექტრო-ოპტიკური მასალები

მასალათა ჯგუფს, რომლებშიც ელექტრული ველის მოქმედებით ოპტიკურ მოვლენებს აქვს ადგილი ელექტრო-ოპტიკური მასალები ეწოდებათ. ამ სახის მასალებს თხევად კრისტალები და ლაზერული ტექნიკის მასალები მიეკუთვნებიან.

თხევადი კრისტალები იმ ნივთიერებებს ეწოდებათ, რომლებსაც შუალედური მდგომარეობა უჭირავთ თხევად და მყარ სხეულებს შორის. ერთის მხრივ მათ დენადობა, ზედაპირული დაჭიმულობა და წვეთის მდგომარეობაში ყოფნა ახასიათებთ, მეორეს მხრივ კი მათში მკვეთრად გამოხატულია მყარი სხეულების თვისება-ოპტიკური ანიზოტროპია, რომელიც ძლიერად არის დამოკიდებული,

ტემპერატურაზე, წნევაზე და რაოქმა უნდა ელექტრული ველის დაძაბულობაზე.

თხევად კრისტალური მდგომარეობა ძირითადად გრძივი ფორმის მოლეკულების მქონე ორგანული წარმოშობის ნივთიერებებში არსებობს. ასეთი ნივთიერებები ბენზოლის შემცველი არომატული ნახშირწყალბადები და ორგანული ნახევარ გამტარებია. მათი რაოდენობა დღეისათვის 3000 - ს აღემატება. თუ თხევად კრისტალებს მონო-ქრომატული სინათლის სხივით გაეაშუქებთ, მაშინ უცვლელი კუთხით დაკვირვებისას ტემპერატურის ცვლილებით არეკვლილი სხივის ინტენსივობა შეიცვლება. ეს კი საშუალებას გვაძლევს - 40°C - დან $+250^{\circ}\text{C}$ - მდე ტემპერატურა დიდი სიზუსტით განვსაზღვროთ.

მრავალ კომპონენტიან თხევად კრისტალებში კი ტემპერატურის უმნიშვნელო ცვლილებას ნივთიერების ფერის საგრძნობი ცვლილება შეესაბამება. ეს მოვლენა საშუალებას გვაძლევს ნებისმიერი ტექნიკური ნაკეთობის თბური ველის სურათი ფერად გამოსახულებად გარდაქმნათ. ასეთი მოწყობილობები ფართოდ გამოიყენებიან სამედიცინო და ტექნიკური, დიაგნოსტიკის მოწყობილობებში.

თხევად კრისტალებზე ელექტრული ველის მოქმედებით ელექტროოპტიკურ ეფექტს აქვს ადგილი, რაც არეკვლილი ან გამჭოლი სხივის მიმართულების შეცვლაში გამოიხატება. ეს მოვლენა ფართოდ გამოიყენება ინფორმაციის ასახვის სისტემებში. ამისათვის თხევად კრისტალურ მდგომარეობაში მყოფ ნივთიერებას გამჭვირვალე და მაღალი ელექტროგამტარობის მქონე ორ ელექტროდს შორის ათასებენ. თხევად კრისტალში ელექტრული ველის მოქმედებამდე სინათლის სხივი ყველა მიმართულებით აირეკლება, ხოლო ველის მოქმედებით კი არეკვლას ერთი, რომელიმე მიმართულებით აქვს ადგილი.

თუ ციფრებს, ასოებს ან ეკრანს გარკვეულ სეგმენტებად დავყოფთ და ამ სეგმენტებზე მოქმედი ძაბვის

მართვას მოვახდენთ, მაშინ ეკრანზე გარკვეულ გამოსახულებას მივიღებთ. ფერადი გამოსახულების მისაღებად თხევად კრისტალებს შემფერავებს უმატებენ და მრავალ ფენოვანს ამზადებენ. ისინი ინფორმაციის ასახვის თამანედროვე სისტემებში ფართოდ გამოიყენებიან. ასეთი სისტემები ძალიან მცირე ენერგიას მოითხოვენ.

ლაზერი ერთი მიმართულებით მაღალი სიმკვრივის ოპტიკური კოჰერენტული გამოსხივების წყაროს წარმოადგენს (*Light amplification by stimulated emission of radiation – Lazer*).

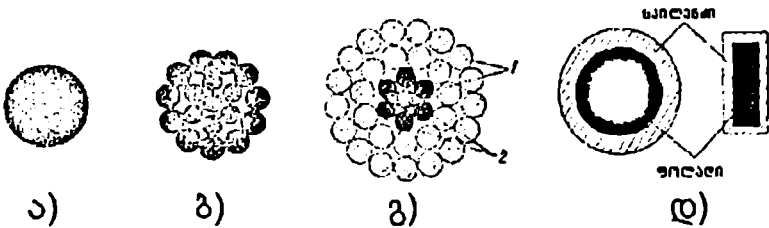
ლაზერის მოქმედების პრინციპი ა. ეინშტენმა აღმოაჩინა, რომლის თანახმადაც ზოგიერთ ნივთიერებებში ძლიერი ველის მოქმედებით იძულებით ოპტიკურ გამოსხივებას აქვს ადგილი. ლაზერის ძირითადი ელემენტი აქტიური გარემოა. მყარტარიან ლაზერებში აქტიურ ელემენტს კრისტალური ან მინისმაგვარი მასალა წარმოადგენს, რომლებშიც აქტიური იონები თანაბრადაა განაწილებული. სწორედ ეს იონები ელექტრულ ენერგიას ოპტიკურ გამოსხივებად გარდაქმნიან. ასეთ ნივთიერებას მინარევეებით წინასწარ ლევირებული სპეციალური ტექნოლოგიით მიღებული ხელოვნური ლალის კრისტალები წარმოადგენენ.

ელექტროტექნიკური ნანარჰი

თანამედროვე ელექტროტექნიკური მრეწველობა რამოდენიმე ათეული ათასი დასახელების პროდუქციას აწარმოებს, რატჰმა უნდა მათი ჩამოთვლაც კი შეუძლებელია. მიუხედავად ამისა განვიხილოთ მცირე მათგანი, რომლებიც ფართოდაა გავრცელებული.

§ 7-1 ელექტრული სადენები

ელექტრული აპარატურის მიერ ფუნქციონალური დანიშნულების შესასრულებლად ან ელექტრული ენერჯის გადასაცემად ელექტრული დენის სადენებს ან მარ-



ნახ. 7-1 არაიზოლირებული სადენების განიკვეთის ფორმები

ტივად სადენებს იყენებენ. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ მაღალი ელექტროგამტარობის გამო ენერჯის გადასაცემად ალუმინის, სპილენძისა და რკინის მავთულებს იყენებენ, რომელთა ზედაპირი ელექტროსაიზოლაციო მასალით არის დაფარული ან იზოლაცია არ გააჩნია. პირველ შემთხვევაში იზოლირებული, ხოლო მეორე შემთხვევაში არაიზოლირებული - “შიშველი” სადენი მიიღება.

ა) არაიზოლირებული ელექტრული სადენები სხვადასხვა ძაბვის საჰაერო ელექტროგამცემ ხაზებში გამოიყენებიან, მიწასთან ელექტრული იზოლაციის შექმნის მიზნით ისინი საყრდენ ან ჩამოსაკიდ იზოლატორებზე მაგრდებიან, ხოლო სადენებს შორის იზოლაციას კი ჰაერი ქმნის. ამ სახის სადენები ერთი ან რამოდენიმე მასალისგან მზადდება ერთი მასალისაგან დამზადებული სადენები შეიძლება იყოს ერთმავთულიანი (ნახ. 7-1) ან მრავალ მავთულიანი. ერთმავთულიანი სადენი (ა) ერთი მავთულისაგან შედგება, ის დაბალი ძაბვის ხაზებში მცირე სიმძლავრეების გადასაცემად გამოიყენება და ძირითადად რკინისაგან მზადდება. მრავალმავთულიანი სადენში (ბ) ერთი მავთულის ირგვლივ ექვსი მავთულია ერთ ფენად დახვეული, შემდგომი მომდენო ფენა კი ექვსით მეტ მავთულს შეიცავს. მეზობელ მავთულებს ურთიერსაწინააღმდეგო მიმართულებით ახვევენ, რაც სადენს მოქნილობასა და მექანიკურ მდგრადობას ანიჭებს. ასეთი სადენების დასამზადებლად 2÷3 მმ დიამეტრის მქონე ალუმინის მავთულები გამოიყენება. სადენის განივეკეთის ფართი გადასაცემი ენერჯიის სიდიდით არის განპირობებული.

ელექტროგადამცემი ხაზის ანძებს შორის მანძილის გაზრდის ან ბუნებრივი დაბრკოლებების დაძლევის (ხეები, მდინარე და სხვა) მიზნით საყრდენებს შორის მანძილს ზრდიან. ამ შემთხვევაში ალუმინის სადენის მექანიკური სიმტკიცის შენარჩუნება გაძნელებულია, ამიტომ სადენს ორ სხვადასხვა მასალის მავთულებისაგან ამზადებენ (გ). ერთი მათგანი მაღალი მექანიკური თვისებების მქონე ფოლადის მავთულები (1) მაღალი მექანიკურ თვისებების უზრუნველყოფს, ხოლო მასზე დახვეული ალუმინის მავთულები (2) კი სადენის მაღალ ელექტროგამტარობას განაპირობებს. გამტარების ასეთ სისტემას *ფოლად - ალუმინის* სადენს უწოდებენ, რადგან ასეთი სადენი რამოდენიმე ათეული კილომეტრი სიგრძისაა, ამიტომ სადენის წინააღმდეგობის სიდიდის 1

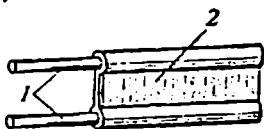
კილომეტრის სიგრძის მავთულისთვის 20°C ტემპერატურაზე საზღვრავენ.

თუ ფოლად ალუმინის სადენი აგრესიულ გარემოში და დიდი მექანიკური ზემოქმედების ქვეშ იმყოფება, მაშინ ფოლადის მავთულებს წინასწარ არწობენ და შემდეგ ცინკის თხელი ფენით ფარავენ.

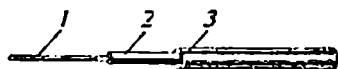
აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისგან დაცვის, გამტარებლობის გაზრდისა და სპილენძის ხარჯის შემცირების მიზნით რკინის ერთმავთულიან სადენს სპილენძის თხელი ფენით ფარავენ (დ). სპილენძის სისქე ერთ მილიმეტრს არ აღემატება. ასეთ სადენს ბიმეტალურ სადენს უწოდებენ.



ა)



ბ)



ბ)

ნახ. 7-2 სამონტაჟო სადენები

მის ზედაპირს საიზოლაციო მასალის უწყვეტი ფენით ფარავენ. ასეთ სადენებს *იზოლირებულ სადენებს* უწოდებენ. მათ დასამზადებლად სპილენძი ან ალუმინი გამოიყენება.

ძრავების გრაგნილების, რელეების და სხვადასხვა სახის ინდუქტივების დასამზადებლად სპილენძის მავთულებს იყენებენ, რომელთა ზედაპირი ელექტრო-

მაღალი ღირებულების გამო არაიზოლირებული სადენების დასამზადებლად სპილენძითი თქმის არ გამოიყენება, ხოლო ალუმინის სადენებს კი 35კე - მდე ძაბვის ელექტროგადამცემ ხაზებში იყენებენ, ხოლო უფრო მეტი ძაბვის გადამცემ ხაზებში (110 - 750კე) ფოლად ალუმინის სადენები გამოიყენება.

ბ) სადენის მთელ სიგრძეზე ელექტრული იზოლაციის შესაქმნელად

საიზოლაციო მინანქრის თხელი ფენითაა დაფარული. ასეთ სადენებს *მომინანქრებულ* სადენს უწოდებენ. როდესაც ასეთი სადენის განივკვეთის ფართი 2,2 მმ² - არ აღემატება, მაშინ განივკვეთს წრიული ფორმა აქვს, ხოლო დიდი ფართის შემთხვევაში კი განივკვეთი ოთხკუთხედის ფორმისაა და გარედან მინაქსოვილის იზოლაციით იფარება.

სქემის დეტალების ერთმანეთთან ელექტრულად დასაკავშირებლად სამონტაჟო სადენებს იყენებენ (ნახ. 7-2), რომლებშიც სპილენძის გამტარის (1) ზედაპირი პოლივილინქლორიდის ან სხვა ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალით (2) არის დაფარული. მას დამცავი ფენა არ გააჩნია 380ე - ძაბვამდე გამოსაყენებლად. გათვალისწინებული სამონტაჟო სადენის დენგამტარი ნაწილი ერთი (ა) ან ერთმანეთისაგან იზოლირებული ორი (ბ) გამტარისაგან შეიძლება შედგებოდეს.

ზოგჯერ ზედაპირული ეფექტის შესამცირებლად და სადენის მოქნილობის გაზრდის მიზნით, სადენს ერთმანეთზე გადაგრეხილი მავთულებისაგან ამზადებენ. აგრეთვე იზოლაციის მექანიკური თვისებების გასაუმჯობესებლად იზოლირებულ სადენს დამატებით დამცავ გარსაცემს (3-გ) უკეთებენ, რაც მუშა ძაბვასაც ადიდებს.

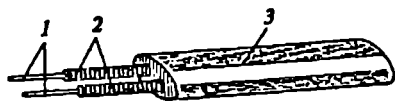
§ 7-2 ელექტრული კაბელები

ელექტრული კაბელი ანუ კაბელი (პოლანდ. *kabel-* ბაგირი, გვარლი) წარმოადგენს ერთ გარსაცემში მოთავსებულ ერთმანეთისაგან იზოლირებულ, ერთი ან რამოდენიმე გამტარებით შექმნილ სადენთა სისტემას, რომელიც ელექტრული ენერჯიის გადასაცემად გამოიყენება. კაბელები დანიშნულების მიხედვით იყოფიან: კავშირგაბმულობის (საქალაქო და ქალაქთაშორის საკაბელო კავშირი), ინფორმაციული, ელექტრული აპარატების

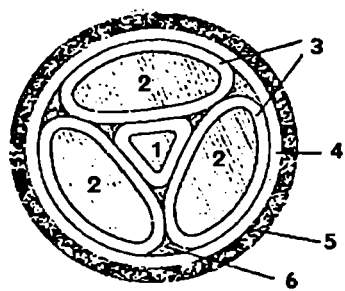
მართვის, სპეციალური დანიშნულების, ძალოვანი და სხვა. გამოყენებული იზოლაციის მიხედვით: მშრალი, სეთით შევსებული, გაჟღენთილი და აირის იზოლაციით.

მუშა ძაბვის მიხედვით: დაბალი (1000ვ - ზე ნაკლები), საშუალო (10კვ - მდუ) მაღალი ძაბვის (10კვ - ზე მეტი ძაბვის) კაბელები, აგრეთვე მუდმივი და ცვლადი ძაბვის. კაბელების მუშა გარემო შეიძლება იყოს: დახურული შენობა, შახტები, ჭაბურღილები, კაბელი შეიძლება ჩაფლული იყოს მიწაში ან მოთავსებული წყალქვეშ.

კაბელის დენგამტარი ნაწილი ალუმინის ან სპილენძის მავთულისგან მზადდება. ძალოვანი კაბელების უმეტესობას სამი ან ოთხი ძარღვი გააჩნია, როგორც წესი ძალოვან კაბელებში მეოთხე ნულოვანი გამტარის განიკვეთის ფართი შედარებით ნაკლებია. თუ კაბელი



ა)



ბ)

ნახ. 7-3 ძალოვანი კაბელების განიკვეთის ჭრილი

აგრესიული გარემოს ზემოქმედებას არ განიცდის, მაშინ მას ტენშეუღწევადი საფარი და ჯავშანი არ აქვს. ასეთი კაბელების ტიპური წარმომადგენელია ორძალვა კაბელი (7-3ა), რომელშიც დენგამტარი ძარღვები (1) ვულკანიზებული რეზინის იზოლაციითაა დაფარული (2), ხოლო გარსაცემი (3) პოლივინილქლორიდისგან მზადდება. ამ სახის ოთხძარღვა ან სამძარღვა კაბელის განიკვეთის წრიული ფორმა აქვს (ბ). ნულოვანი ძარღვი

(1) ან კაბელის ცენტრშია მოთავსებული ან გარკვეულ

სეგმენტს იკავენს. ცალკეული ფაზები ფასათშორის იზოლა(კითხაა განმხოლოებული, რომელიც ან პოლიეთილენის ან რეზინისგან არის დამზადებული. მთლიანად ეს სისტემა განივ-საკორპუსო იზოლაციაშია მოთავსებული (4), რომელსაც დამცავი (5) გარსაცვმი ფარავს. ფაზურ სადენებს შორის თავისუფალ სივრცეს კი შემავსებელი (6) იკავენს.

აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისგან დასაცავად ძველი კონსტრუქციის კაბელების ზედაპირი ტყვიის ტენ-შეუღწევადი ფენით და ფოლადის მექანიკურად დამცავი ჯაფშანით იფარებოდა. დღეისათვის ტენისაგან დაცვის მიზნით მაღალი წნევის პოლიეთილენს იყენებენ.

თუ კაბელის ალუმინის დენგამტარი ძარღვის განივკვეთის ფართი მცირეა, მაშინ ის ერთი მავთულისაგან მზადდება, ხოლო განივკვეთის დიდი ფართის შემთხვევაში მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების მიზნით დენგამტარი ძარღვი მრავალმავთულიან სისტემას წარმოადგენს.

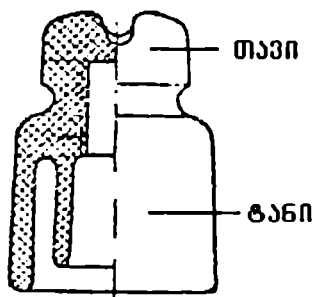
მაღალი ძაბვის ძალოვან კაბელებში საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად ზეთით გაუღენთილი საკაბელო ქაღალდი გამოიყენება რომელიც დენგამტარ ძარღვზეა დახვეული. შექმნილი სისტემა მაღალი წნევის ქვეშ მყოფი ზეთით შევსებულ ფოლადის მილშია მოთავსებული, ასეთ კაბელს ზეთოვან კაბელს უწოდებენ. თუ ზეთის მაგივრად აირია გამოყენებული (ელეგაზი) მაშინ კაბელი აირით შევსებულია.

§ 7-3 ელექტროტექნიკური ფაიფურის ნაკეთობები

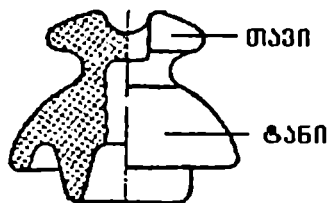
ფაიფურის იზოლატორები და საიზოლაციო ნაკეთობანი დაბალი სიხშირის, დაბალი და მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემ ხაზებში, გამანაწილებელ მოწყობილობებში, მაღალი ძაბვის დანადგარებში და სხვა დანიშნულებით გამოიყენებიან. ანსხვავეებენ იზოლატორე-

ბის შემდეგ ძირითად სახეებს:

დაბალი ძაბვის სახაზო იზოლატორები (ნახ. 7-4) დაბალი ძაბვის ელექტროგადამცემი და სატელეფონო ხაზების შიშველი გამტარების იზოლირებისათვის გამოიყენებიან. გავრცელებული ტიპებია: ШШШ-2 (შტირული სახაზო დაბალი ძაბვის), ТФ - 12, ТФ - 20 (სატელეფონო ფაიფურის) და სხვა. აგრეთვე დაბალი ძაბვის სააპარატო იზოლატორებზე დნობადი მცველების ტანები, შემყვანები, კოჭები და სხვა ნაკეთობანი მიეკუთვნებიან.



ნახ. 7-4 დაბალი ძაბვის სახაზო იზოლატორი



ნახ. 7-5 შტირული იზოლატორი

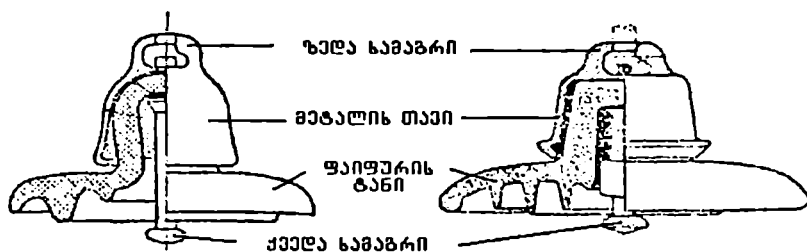
მაღალი ძაბვის იზოლატორები *სახაზო, სასადგურო* და *სააპარატო* იზოლატორებად იყოფიან. სახაზო იზოლატორები მაღალი ძაბვის (1000 ვოლტზე მეტი) ელექტროგადამცემი ხაზების გამტარების იზოლირებისათვის გამოიყენებიან და შტირულ და საკიდ იზოლატორებად იყოფიან.

შტირული იზოლატორები 3-35 კოლოვოლტიანი ელექტროგადამცემ ხაზებზე გამოიყენებიან. მისი უმარტივესი ტიპი ნახ. 7-5 - ზეა ნაჩვენებია.

ისინი გადამცემი ხაზის სარდენზე ლითონის დეროს საშუალებით მაგრდება. გავრცელებული მარკებია: ШЛ - 6, ШС - 10, ШД - 206, ШД - 35 და სხვა. გადამცემი

ძაბვის ზრდასთან ერთად იზოლატორის კონსტრუქცია რთულდება.

საკიდი იზოლატორები 6-დან 750 კილოვოლტიან ელექტროგადამცემ ხაზებზე გამოიყენებიან და ერთმანეთთან მიმდევრობით შეერთებული არიან გირლანდის სახით. ის თეფშის მაგვარია. გადამცემი ხაზის ძაბვის ზრდასთან ერთად გირლანდაში მათი რაოდენობა იზრდება. ასეთი იზოლატორი ნახ. 7-6 -ზეა ნაჩვენები. გავრცელებული მარკებია: ПФ - 6, ПФ - 16, ПФ - 20 და სხვა. სახაზო იზოლატორებად აგრეთვე სახაზო ღეროვანი იზოლატორი გამოიყენება, რომელსაც ტანზე 8 - დან 16 - მდე მაღლი აქვს.



ნორმალური შესრულების

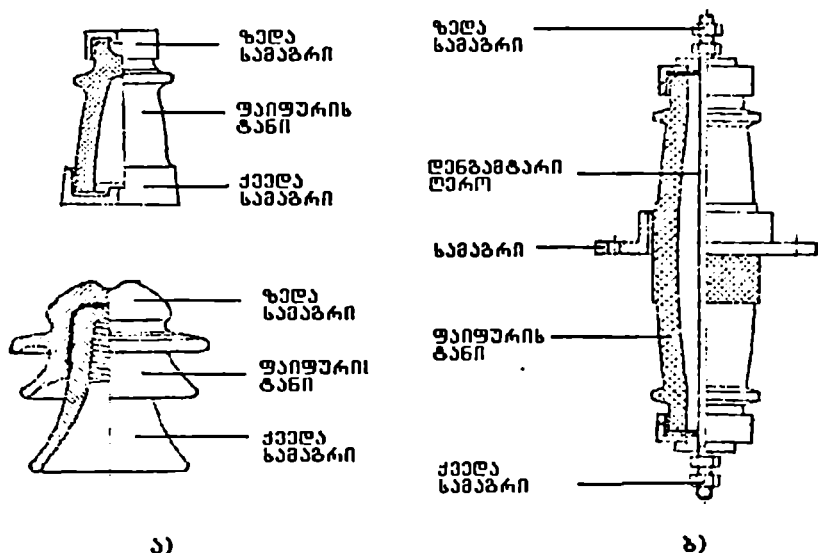
გაუმჯობესებულ გარემოში
სამუშაოდ

ნახ. 7-6 თეფშისებრი სახაზო იზოლატორები

სასადგურო იზოლატორებს საყრდენი, საყრდენ - შტირული და გამავეალი იზოლატორები მიეკუთვნებიან. საყრდენ იზოლატორების მაღალი ძაბვის სალტეების და გამთიშველების იზოლირებისათვის იყენებენ. მისი მარკებია: ОФ, ОА, ОМА, ОНШ, ОНВШ და სხვა. გამავეალი (გამყვანი) იზოლატორები მაღალი ძაბვის დენგამტარის კედელში ან ლითონში გასატარებლად გამოიყენება. ნახ. 7-7 - ზე საყრდენი (ა) და გამავეალი (ბ) იზოლატორის უმარტივესი ტიპებია ნაჩვენები.

მაღალი ძაბვის გამავეალი იზოლატორები ძირითადად მეტალურ კორპუსში (ტრანსფორმატორები,

ამომრთველები და სხვა) დენგამტარი ძარღვის გასატარებლად გამოიყენებიან. ისინი განსაკუთრებით რთული აგებულებისაა. ასეთ იზოლატორებში დენგამტარსა და ფაიფურის კორპუსს შორის ქაღალდის ან ბაკელიტის ტანია მოთავსებული, ხოლო დანარჩენი ნაწილი ტრანსფორმატორის სეთითაა შევსებული. იზოლატორის სიგრძე 2-7 მეტრია, წონა კი რამოდენიმე ასეული კილოგრამია.



ნახ. 7-7 საყრდენი (ა) და გამავეალი (ბ) იზოლატორები.

§ 7-4 რეზისტორები

რეზისტორი (resistor - წინააღმდეგობა) ეწოდება ელექტროტექნიკურ მოწყობილობას, რომელსაც მუდმივი ან ცვლადი სიდიდის აქტიური წინააღმდეგობა გააჩნია და ელექტრული წრედების ცალკეულ კვანძებს შორის დენის ან ძაბვის გასანაწილებლად გამოიყენება.

წინააღმდეგობის ცვლილების ხასიათის მიხედვით

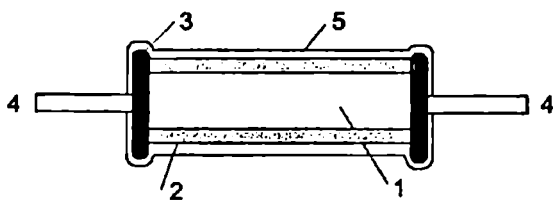
რეზისტორები ცვლადი და მუდმივი წინააღმდეგობის რეზისტორებად იყოფიან.

მუდმივი წინააღმდეგობის მქონე რეზისტორების ნომინალური წინააღმდეგობის სიდიდე თითქმის უცვლელია გარეშე ფაქტორების ზემოქმედებით, ხოლო ცვლადი წინააღმდეგობის რეზისტორებში წინააღმდეგობის სიდიდე მცოცი კონტაქტის გადაადგილებით გარკვეულ დიაპაზონში იცვლება.

თუ რეზისტორის წინააღმდეგობის სიდიდე გარკვეული კანონზომიერებით ტემპერატურის მიხედვით იცვლება მაშინ მას თერმორეზისტორს (თერმოსენსორს) უწოდებენ. ისინი ტემპერატურის გამზომ სისტემებში გამოიყენებიან.

დანიშნულების მიხედვით რეზისტორები იყოფიან საერთო დანიშნულების, პრეციზიული, მაღალსიხშირული, მაღალომიანი, მაღალძაბვიანი, ეტალონური და სხვა სახის რეზისტორებად.

ექსპლუატაციის პირობების მიხედვით რეზისტორები არიან თერმომედეგი, მაღალსიხშირული, ტენმედეგი, მდგრადი ვიბრაციის და რადიაციისადმი და სხვა.



ნახ. 7-8 მუდმივი წინააღმდეგობის რეზისტორის ჭრილი

დენგამტარი ელემენტების მიხედვით რეზისტორები მავთულიან და არა მავთულიან რეზისტორებად იყოფიან. მავთულიან რეზისტორებში გამტარ მასალად კერამიკის მიღზე დახვეული მცირე დიამეტრის მქონე კონსტანტანის ან ნიქრომის მავთულები გამოიყენება იშვიათად მანგანინი. ხოლო არამავთულიან

რეზისტორებში გამტარ მასალას კერამიკაზე სპეციალური ტექნოლოგიით დაფენილი გრაფიტის, ნიკრომის, კონსტანტანის ან კომპოზიციური მასალის თხელი ფენა წარმოადგენს.

მუდმივი წინააღმდეგობის მქონე რეზისტორი (ნახ. 7-8) კერამიკის ცილინდრზე (1) დაფენილი რეზისტორული მასალის ან მავთულის გამტარი ფენისაგან (2) შედგება, რომლის ორივე ბოლოზე საკონტაქტო ელექტროდია (3) მიერთებული, ისინი სპილენძის მოქნილი მავთულის (4) საშუალებით ელექტრულ სქემას უკავშირდება. სქემის დეტალებთან ელექტრული იზოლაციის შექმნის და გარემოს ტენიანობის ზემოქმედებისაგან დაცვის მიზნით რეზისტორის ზედაპირი მინანქრით არის დაფარული (5).

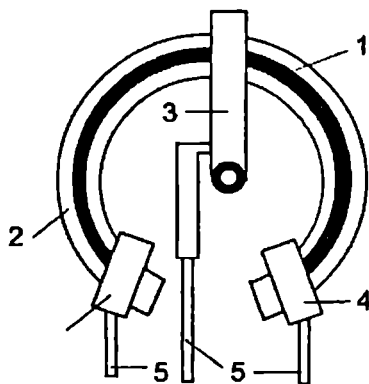
ელექტრული სქემის პარამეტრების რეგულირებისათვის საჭიროა წინააღმდეგობის გარკვეულ დიაპაზონში ცვლილება, ამ მიზნით ცვლადი წინააღმდეგობის მქონე რეზისტორები გამოიყენება. ისინი ღეროვანი ან წრიული ფორმის არიან.

ღეროვან ცვლადი წინააღმდეგობის რეზისტორში რეზისტორულ ფენაზე მესამე ელექტროდი მცოცის საშუალებით სწორხაზოვნად გადაადგილდება. რის გამოც ამ ელექტროდსა და ბოლოებზე მყოფ ელექტროდებს შორის წინააღმდეგობა მცოცის გადაადგილების მიხედვით იცვლება.

წრიული ფორმის მქონე ცვლადი წინააღმდეგობის რეზისტორში (ნახ. 7-9), რეზისტორული ფენა (1) საიზოლაციო მასალის რგოლზეა (2) დატანილი ან დახვეული, რომლის ცენტრში მესამე მცოცი (3) ელექტროდია მოთავსებული, ხოლო რეზისტორული ბოლოები საკონტაქტო ელექტროდების (4) და მოქნილი მავთულების საშუალებით (5) ელექტრულ სქემას უკავშირდება. რეზისტორის ბოლოებს შორის წინააღმდეგობის სიდიდე უცვლელია, ხოლო მცოცსა და ერთ - ერთ ბოლოს შორის წინააღმდეგობის სიდიდე მცოცის მობრუნების კუთხის მიხედვით იცვლება.

რეზისტორების გარკვეულ კლასს მიკრომოდუ-

ლური და ინტეგრალური სქემების რეზისტორები წარმოადგენს, რომელთა გარეშეც წარმოუდგენელია თანამედროვე ელექტრონიკა. მათი დამზადების ტექნოლოგია გაცილებით რთულია და მიკროსქემების ტექნოლოგიის განუყოფელი ნაწილია.



ნახ. 7-9 ცვლადი წინააღმდეგობის მქონე რეზისტორი

როგორც ყველა ელექტროტექნიკურ მოწყობილებას ასევე რეზისტორსაც გარკვეული ელექტრული პარამეტრები ახასიათებს, რომლის ნაწილი, თუ გაბარიტები საშუალებას გვაძლევს რეზისტორებზე აღნიშნული, ნაწილი კი რეზისტორის პასპორტშია მოცემული.

რეზისტორზე შემდეგი პარამეტრებია აღნიშნული: რეზისტორის ტიპი, რომელიც როგორც წესი გარკვეული ასობის და ციფრების საშუალებით გამოიხატება, აქვე ტიპიდან ტირით გამოყოფილი ციფრების საშუალებით აღნიშნულია რეზისტორში გამოყოფილი ის მაქსიმალური სიმძლავრე ვატებში, რომლის გამოყოფისას რეზისტორის პარამეტრები საგრძნობ ცვლილებას არ განიცდის. რეზისტორის ნომინალური წინააღმდეგობის სიდიდე აღნიშნულია ომებში, კილომებში, მეგაომებში ან ტერაომებში. რეზისტორზე აგრეთვე ციფრების და სპეციალური კოდის საშუალებით აღნიშნულია რეალური

წინააღმდეგობის მოსალოდნელი პროცენტული განსხვავება ნორმალურიდან.

დანარჩენი პარამეტრები როგორცაა: მაქსიმალური და მინიმალური მუშა ტემპერატურა, გარემოს ტენიანობა, რეზისტორის საკუთარი ელექტრული ხმაურის დონე, რეზისტორის ინდუქტიუობა, მაქსიმალური მუშა ძაბვის სიდიდე, წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი და სხვა პარამეტრები რეზისტორის პასპორტში ან ცნობარშია მითითებული.

§ 7-5 ელექტრული კონდენსატორები

ელექტრული კონდენსატორი ლითონის ორ ელექტროდისგან შედგება, რომელთა შორის დიელექტრიკია მოთავსებული. ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკი პოლარიზდება ე.ი. ელექტროდებზე ადგილი აქვს ელექტრული მუხტის დაგროვებას. ველის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ კი კონდენსატორი დაგროვილ მუხტს ელექტრული სქემის ელემენტებს გადასცემს.

კონდენსატორის ელექტრული მუხტის ტევადობის (C) განზომილება ფარადია, მაგრამ ეს სიდიდე იმდენად დიდია, რომ პრაქტიკაში მისი მემილიონედი ნაწილი მიკროფარადი (მკფ) ან ამ უკანასკნელის მემილიონედი ნაწილი, პიკოფარადი (პკფ) გამოიყენება ე.ი. $1\text{პკფ}=10^{-6}\text{მკფ}=10^{-12}\text{ფ}$.

კონდენსატორის ელექტრული ტევადობა (C) ელექტროდების ფართის S (სმ²) პირდაპირპროპორციულია და უკუპროპორციულია დიელექტრიკის სისქის d(სმ), რატკმაუნდა რაც მეტია დიელექტრიკის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ_r) მით მეტია კონდენსატორის ელექტრული ტევადობა და ბრტყელი კონდენსატორების ტევადობა შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon_r \cdot S}{d} \text{ პფ.} \quad (7-1)$$

დიელექტრიკის (1) და ელექტროდთა (2) დახვეულ სისტემას ლითონის ან საიზოლაციო მასალის გარსაცემში (5) ათავსებენ (ნახ. 7-10) და ჰერმეტიკულ სახურავს (4) აფარებენ. ლითონის გარსაცემის გამოყენების შემთხვევაში ელექტროდების გამომყვანების იზოლირება მინის იზოლაციის საშუალებით (3) ხდება, ხოლო სექციებად აკრეფილი კონდენსატორი შემკერებელ ქაღალდშია მოთავსებული (7), რომელიც კორპუსიდან მუყაოს (6) საშუალებითაა იზოლირებული.

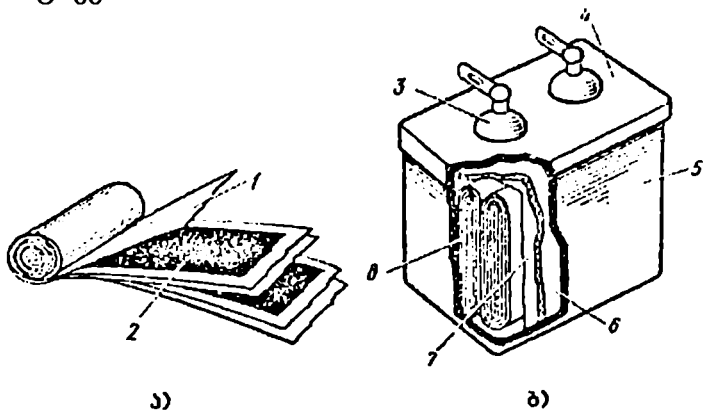
დანიშნულების მიხედვით კონდენსატორები ენერგო მოწყობილობებში (ძალოვანი) და რადიოელექტრულ სისტემებში გამოსაყენებელ კონდენსატორებად იყოფიან, ხოლო გამოყენებული დიელექტრიკის მიხედვით, ვაკუუმურ, ჰაერის, ქაღალდის, ზეთ - ქაღალდის და მყარი იზოლაციანი კონდენსატორებად იყოფიან.

მუშა ძაბვის მიხედვით კი მაღალი და დაბალი ძაბვის კონდენსატორებს არჩევენ. ისინი ცვლად ან მუდმივ ძაბვაზე ან მხოლოდ მუდმივ ძაბვაზე მუშაობენ. ამ უკანასკნელს ოქსიდური (ელექტროლიტური) კონდენსატორები მიეკუთვნებიან.

ენერგეტიკულ დანადგარებში გამოყენებული კონდენსატორების მარკირება მათი ფუნქციონალური დანიშნულების მიხედვით ხდება. კერძოდ მარკის პირველი ასო ამ ფუნქციონალურ დანიშნულებას აღნიშნავს: K - ენერგოდანადგარებში გამოყენებულ ცვლად ძაბვაზე მომუშავე კოსინუსურ კონდენსატორების აღნიშვნა, H - იმპულსურ კონდენსატორებზე მიუთითებს, Φ - კი ფილტრების კონდენსატორების აღნიშვნა, ხოლო D - დემფერულ კონდენსატორს აღნიშნავს.

ყველა ამ სახის კონდენსატორებში ელექტრულ იზოლაციად საკონდენსატორო ქაღალდი გამოიყენება. მაღალ ძაბვაზე მომუშავე ქაღალდი აუცილებლად გაუღენტვას მოითხოვს, ამიტომ კონდენსატორის მარკაში

მეორე ასო გამჟღენთი მასალის აღნიშნავს, კერძოდ C - მიუთითებს, რომ გამოყენებულია სინთეზური გამჟღენთი მასალა, ხოლო M კი გამჟღენთად ნავთობის ზეთის (კონდენსატორის ზეთის) გამოყენებაზე მიუთითებს, ხოლო აბუსალათინის (კასტორის) ზეთის გამოყენებას K ასოთი გამოხატავენ.



ნახ. 7-10 ელექტრული კონდენსატორის ჭრილი

რადიოელექტრონიკაში გამოყენებული კონდენსატორების მარკირება ენერგეტიკაში გამოყენებული კონდენსატორების მარკებისაგან საგრძნობლად განსხვავდება, მაგალითად რადიოელექტრონულ კონდენსატორებში ასო "K" მუდმივი ელექტრული ტევადობის, ხოლო "KC" ცვლადი ტევადობის კონდენსატორის აღნიშვნაა.

ტიპის გარდა ყველა სახის კონდენსატორზე აღნიშნულია მუშა ძაბვის სიდიდე ვოლტებში ან კილოვოლტებში. ამასთანავე აუცილებლად მითითებულია ნომინალური ელექტროტევადობის სიდიდე პიკოფარადებში, ნანოფარადებში ან მიკროფარადებში. ასევე რეალური ტევადობის განსხვავება ნორმალურისაგან პროცენტებში. თუ კონდენსატორის გეომეტრიული ზომები მცირეა მაშინ ეს ინფორმაცია კონდენსატორის კორპუსზე სპეციალური კოდით აღინიშნება.

ნახევრად გამტარი მასალები

ნივთიერებათა ჯგუფს რომელთა კუთრი წინაღობის სიდიდე გამტარებისა და დიელექტრიკების კუთრი წინაღობის სიდიდეების შორის არის მოთავსებული, ნახევრად გამტარები ეწოდებათ, ე.ი. ნახევრად გამტარების კუთრი წინაღობა 10^{-5} - დან 10^8 ომი.მ - მდე იკვლება და განსხვავებით გამტარებისა და დიელექტრიკებისა ძლიერად არის დამოკიდებული გარეშე ენერგეტიკულ ზემოქმედებაზე, როგორცაა სინათლის სხივი, ტემპერატურა, გარეშე ელექტრული ველის სიდიდე, მექანიკური დაძაბულობა და სხვა.

ნახევარ გამტარულ მასალებს ქიმიური ელემენტები და მათი შენაერთები მიეკუთვნებიან. გარკვეულ პირობებში ეს შენაერთები მყარ ხსნარებს წარმოქმნიან, რაც ნახევრად გამტარების რაოდენობას ზრდის (ცხრ.8-1).

განსაკუთრებული თვისებებით გამოირჩევიან ორგანული წარმოშობის ნახევრად გამტარული მასალები, რომელთა ელექტრული პარამეტრები გარეშე ფაქტორებით ადვილად სამართავია და მიღების ტექნოლოგია გაცილებით მარტივია.

1833 წელს მ. ფარადეიმ გოგირდისა და ვერცხლის შენაერთის წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების შესწავლისას აღმოაჩინა, რომ ტემპერატურის ზრდით წინააღმდეგობა მცირდებოდა. ეს მოვლენა ნახევრად გამტარი მასალების ერთ - ერთი მახასიათებელია, ამგვარად მ. ფარადეი ნახევრად გამტარების პირველ აღმომჩენად შეიძლება ჩაითვალოს.

ნახევრად გამტარული მასალები გამოიყენებიან: დიოდების, ტრანზისტორების, ტირისტორების, მიკროსქემების, ფოტოელექტრული ხელსაწყოების, მზის ბატარეების, არაწრფივი ელემენტების, თერმორეზისტორების და სხვათა დასამზადებლად.

ტექნიკური სისუფთავის მასალებში ნახევრად გამტარული თვისებების გამოვლენას მინარევები უშლის ხელს, ამიტომ თანამედროვე ნახევრად გამტარული მასალები მაღალი სისუფთავით გამოირჩევიან. მათში მინარევების კონცენტრაცია (10^{-5} - 10^{-7})% აღწევს. არამარტო მინარევების რაოდენობას აქვს მნიშვნელობა, არამედ მის სახესაც. მაგალითად ქიმიურად სუფთა გერმანიუმში 0.001% დარიშხანის მინარევების შეყვანით გერმანიუმის კუთრი გამტარობა 10000 - ჯერ იზრდება. სხვა სახის მინარევებით მსგავსი ეფექტის მიღწევა შეუძლებელია.

ზოგიერთი სახის მინარევები ნახევრად გამტარებს სასურველ თვისებებს ანიჭებს. ისინი სპეციალურად შეყავთ ნახევრად გამტარში და მათ მალეგირებულ მინარევებს უწოდებენ.

ნახევრად გამტარის თვისებებს მნიშვნელოვნად განაპირობებს აკრძალული ზონის სიდიდე, რომელიც 3 ელექტრონ ვოლტს (ეგ-ს) არ აღემატება, მაგრამ მრავალ ფაქტორებსა და მოკიდებული.

ნახევრად გამტარების თვისებებიდან აღსანიშნავია საკუთარი და მინარეული გამტარობა, ფოტოოპტიკური და ფოტოელექტრული თვისებები, და რათქმა უნდა კონტაქტური მოვლენები ორი ნახევრად გამტარის საზღვარზე.

§ 8-1 ნახევრად გამტარების საკუთარი ელექტროგამტარობა

ლითონებში დენის გადამტანი თავისუფალი ელექტრონების არსებობას ლითონური კავშირი განაპირობებს, მაგრამ ნახევრად გამტარებში დენის მატარებელი ელექტრონების არსებობას ტემპერატურასთან ერთად მინარევების კონცენტრაცია განსაზღვრავს, ამიტომ სისუფთავის მიხედვით ისინი საკუთარი და მინარეული

გამტარობის მქონე ნახევრად გამტარებად იყოფიან.

პირველ რიგში განვიხილოთ ისეთი ნახევრად გამტარი, რომელიც მცირე რაოდენობის მინარევებს შეიცავენ ე.ი. ძალიან

სუფთაა ან მასში არსებული მინარევები

გაველენას ვერ ახდენენ ნახევრად გამტარის

ელექტროგამტარობაზე, მაგალითად

პერიოდული სისტემის მეოთხე ჯგუფის ელემენტი

კაჟბადი (Si), რომელიც მინარევებს არ შეიცავს.

კაჟბადის ატომების გარე სავალენტო შრეზე

მყოფი ოთხივე ელექტრონი კოვალენტურ კავშირშია

დაკავებული, ამიტომ დენის გადამტანი

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

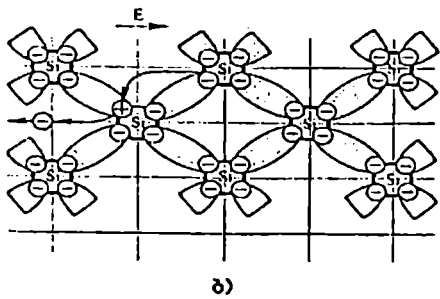
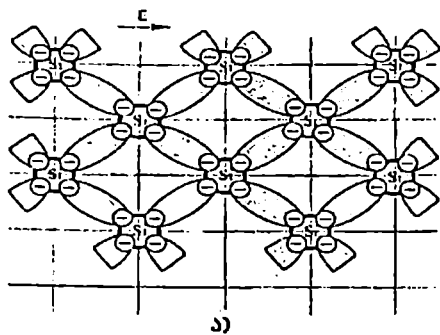
თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის

ზონაშიც ელექტრონების

თავისუფალი ელექტრონი არ გვაქვს

(ნახ. 8-1ა), შესაბამისად გამტარებლობის



ნახ.8-1 კაჟბადის კრისტალური მესრის მოდელი

კონცენტრაციაც ნულის ტოლია (ნახ. 8-2ა).

ასეთ სისტემაში ელექტრონი, რომ თავისუფალი გახდეს ე.ი. მონაწილეობა მიიღოს ელექტროგამტარობაში.

მან გარეშე ფაქტორებით დამატებითი ენერჯია W_p უნდა

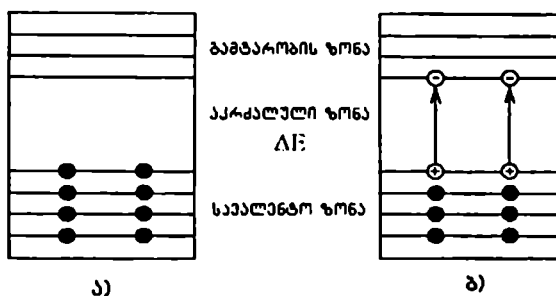
მიიღოს, რომლის სიდიდე აკრძალული ზონის მნიშვნელობაზე მეტი ან ტოლია.

$$W_p \geq \Delta E \quad (8-1)$$

გარეშე ფაქტორების როლში ნებისმიერი ენერჯიის

მქონე უემოქმედება გვევლინება, რომელიც (8-1) პირობას აკმაყოფილებს. ასეთ უემოქმედებას საკუთარი გამტარობის აქტივაციის ენერგიას უწოდებენ.

როდესაც (8-1) პირობა სრულდება, მაშინ ელექტრონი დამატებით ენერგიას იძენს, თუ ჯამური ენერგიის სიდიდე გამტარებლობის ზონას შეესაბამება, მაშინ ელექტრონი ატომს ტოვებს, წყვეტს მასთან კავშირს ე.ი. "თავისუფალი" ხდება. ამ მოვლენას ელექტრონის სავალენტო ზონიდან გამტარებლობის ზონაში გადასვლას უწოდებენ (ნახ. 8-2 ბ).



ნახ. 8-2 საკუთარი ნახევრად გამტარის ენერგეტიკული დიაგრამა.

ელექტრონის დაკარგვის გამო ატომის დადებითი მუხტი დაკომპენსირებული არ არის ე.ი. ატომი დადებითი მუხტის მატარებელია, რასაც ხვრელებს უწოდებენ.

როდესაც ნახევრად გამტარზე გარეშე ელექტრული ველი არ მოქმედებს, მაშინ თავისუფალი ელექტრონები თბურ ქაოსურ მოძრაობას ასრულებენ და ერთი ელემენტალური უჯრედიდან მეორეზე გადადიან, ხოლო ხვრელი, რომელიც ელექტრონდაკარგულ ატომს წარმოადგენს უძრავია, მაგრამ მისი გადაადგილება მეზობელი ატომებიდან ელექტრონის მიზიდვით ხდება. იქმნება შთაბეჭდილება თითქოს ხვრელი გადაადგილდა, სინამდვილეში ადგილი აქვს სავალენტო ზონაში ერთი ატომიდან მეორეზე ელექტრონის გადასვლას.

გამტარობის ზონაში თავისუფალი ელექტრონის და სავალენტო ზონაში დადებითი მუხტის მქონე ხერელების წარმოქმნას ელექტრონ - ხერელის წყვილების გენერაციას უწოდებენ. ნახევრად გამტარში ამ პროცესის პარალელურად შებრუნებული პროცესიც მიმდინარეობს.

ნახევრად გამტარებში დენის მატარებელი ნაწილაკების კონცენტრაცია გამტარებისგან განსხვავებით გაცილებით ნაკლებია ატომების რიცხვზე. მაგალითად კაუბადში ნორმალურ პირობებში დენის მატარებლების კონცენტრაცია $3 \cdot 10^{16} \text{ მ}^{-3}$, ხოლო ატომების რიცხვი $5 \cdot 10^{28} \text{ მ}^{-3}$ -ია. გამტარ მასალებში კი დენის მატარებელი ნაწილაკების რაოდენობა მეტი ან ტოლია ატომების რიცხვის.

რეკომბინაციის და გენერაციის პროცესებს შორის გარკვეული წონასწორობა მყარდება, შესაბამისად ნებისმიერ ტემპერატურაზე საკუთარი გამტარობის მქონე ნახევრად გამტარში ხერელების და ელექტრონების კონცენტრაცია იარსებებს. ელექტრონების წონასწორული კონცენტრაცია (n_{io}) შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$n_{io} = 2N_g e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (8-2)$$

ხოლო ხერელების

$$P_{io} = 2N_p e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (8-3)$$

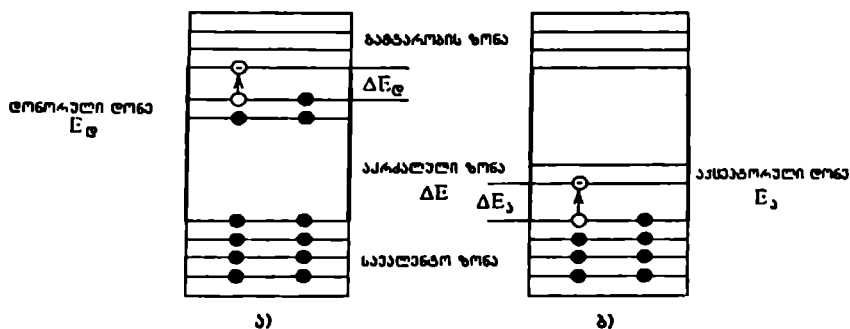
სადაც ΔE ნახევრად გამტარში აკრძალული ზონის სიდიდეა, T აბსოლიტური ტემპერატურა, ხოლო N_g და N_p - მოცულობის ერთეულში ენერგეტიკული დონეების რიცხვია გამტარობის და სავალენტო ზონაში შესაბამისად. რიცხვი 2 გვიჩვენებს რომ, პაულის აკრძალვის პრინციპის თანახმად ერთ დონეზე არ შეიძლება ორზე მეტი ელექტრონის არსებობა.

რადგან ხერელის ეფექტური მასა (m^*_p) ელექტრონის ეფექტურ მასაზე (m^*_n) დიდია და მათზე ერთიდაიგივე ძალა მოქმედებს, ამიტომ ელექტრონის

ქვერადობა უფრო მეტია ვიდრე ხერელის, რის გამოც ნახევრად გამტარის საკუთარ გამტარებლობას სუსტად გამოხატული ელექტრონული ხასიათი აქვს.

§ 8-2 ნახევრად გამტარების მინარეული ელექტროგამტარობა

ნახევრად გამტარში მინარეები ეწოდება ყველა იმ ატომებს ან ქიმიური შემადგენლობის დარღვევას, რომელთა არსებობა ნახევრად გამტარის ელექტრულ თვისებებზე ახდენს გავლენას. მინარეებით განპირობებულ გამტარობას კი მინარეულ გამტარობას უწოდებენ. გამტარებლობის სიდიდეზე აგრეთვე გავლენას კრისტალური სტრუქტურის დეფექტები, დისლოკაციები და ვაკანსიები ახდენენ.

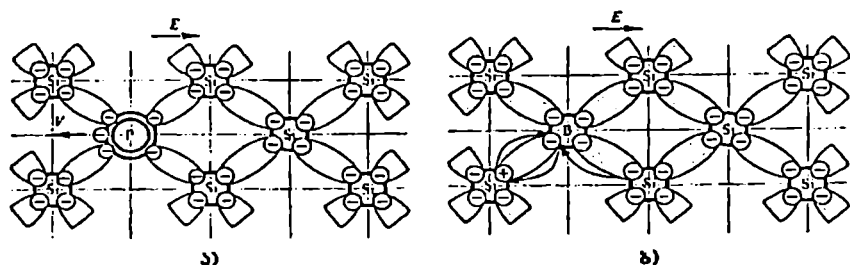


ნახ. 8-3 მინარეული ნახევრად გამტარის ენერგეტიკული დიაგრამა

მინარეები და დეფექტები აკრძალული ზონის შიგნით დამატებით ენერგეტიკულ დონეს წარმოქმნიან, რომელსაც მინარეულ დონეს უწოდებენ. მინარეული დონე შეიძლება მოთავსდეს აკრძალული ზონის სხედასხვა ნაწილში. მინარეული ზონიდან ელექტრონის

გადასვლას გამტარებლობის ზონაში, ან სავალენტო ზონიდან ელექტრონის მინარეულ დონეზე გადასვლად უფრო ნაკლები ენერგია სჭირდება ვიდრე აკრძალული ზონის სიდიდეა.

პირველ შემთხვევაში გამტარებლობის დამატებითი ელექტრონი წარმოიქმნება (ნახ. 8-3ა), ხოლო ელექტრონის სავალენტო ზონიდან მინარეულ დონეზე გადასვლა სავალენტო ზონაში დამატებით ხვრელს წარმოქმნის (ნახ. 8-3ბ). ეს მოვლენა უფრო ფართოდ განვიხილოთ.



ნახ. 8-4 დონორული (ა) და აქცეპტორული (ბ) ნახევრად გამტარის კრისტალური მესრის მოდელი

ვთქვათ კაუბადის (Si) კრისტალურ მესერში მინარეების სახით ფოსფორის (P) ატომი იმყოფება (ნახ. 8-4ა), რომლებსაც გარე სავალენტო შრეზე ხუთი ელექტრონი გააჩნია, აქედან ოთხი ელექტრონი კაუბადის ატომებთან კოვალენტურ კავშირში მონაწილეობს, ხოლო მეხუთე ელექტრონი კი ფოსფორის ატომთან სუსტ კავშირს ამყარებს. ამ ელექტრონის გამტარებლობის ზონაში გადასვლას ძალიან მცირე ენერგია სჭირდება. კერძოდ კაუბადში აკრძალული ზონის სიდიდე $\Delta E = 1,12$ ევ, ხოლო ფოსფორის ატომის მინარეული დონიდან გამტარობის ზონაში გადასვლის ენერგია $\Delta W_{დ} = 0,044$ ევ შეადგენს. გარეშე ფაქტორების არ მოქმედების შემთხვევაში ამ ელექტრონს ფოსფორის ატომის დატოვება არ შეუძლია, ხოლო ელექტრონი ველის მო-

ქმედებით ის ფოსფორის ატომს ტოვებს და გამტარობის ელექტონად იქცევა.

ელექტრონდაკარგული ფოსფორის ატომი დადებითი მუხტის მქონე ხერელს წარმოადგენს. მინარევების მცირე კონცენტრაციის გამო ფოსფორის ატომები ერთმანეთისგან შორს იმყოფებიან. ამის გამო მათ შორის ელექტრონების გადასვლა შეუძლებელია. აქედან გამომდინარე ხერელი უძრავია და გამტარობა მხოლოდ მინარეული ელექტრონების მოძრაობითაა განპირობებული. ამ სახის ნახევრად გამტარში ელექტრონებს დენის ძირითად მატარებლებს, ხოლო ხერელებს არაძირითად მატარებლებს უწოდებენ.

ნახევრად გამტარებს რომლებშიაც დენის ძირითად გადამტანებს ელექტრონები წარმოადგენენ ელექტრონული გამტარობის, ანუ n - ტიპის ნახევრად გამტარებს ეწოდებათ (negative - უარყოფითი), ხოლო მინარევებს, რომლებიც ამ ელექტრონებს წარმოქმნიან დონორულ მინარევებს უწოდებენ. შესაბამისი ენერგეტიკული დონე E_d ყოველთვის აკრძელებული ზონის ზემოთ გამტარობის ზონასთანაა განლაგებული და მათ შორის სხვაობა $\Delta E_d \leq 0,1$ ევ-ს არ აღემატება. (8-3ა).

დავუშვათ, რომ კაუბადის (Si) კრისტალურ მესერში მინარევების სახით ბორის ატომი (B) იმყოფება (ნახ. 8-4ბ), რომელსაც გარე სავალენტო შრეზე სამი ელექტრონი გააჩნია და სამივე კოვალენტური კავშირის წარმოქმნაში მონაწილეობს, მაგრამ ბორის ატომის ელექტრონის ნაკლებობის გამო კაუბადის ერთ - ერთ ატომთან კოვალენტური კავშირს ვერ ამყარებს.

ბორის ატომს ელექტრონის მიღება კაუბადის სხვა ატომისაგან შეუძლია და ამით კოვალენტურ კავშირს კაუბადის ყველა მეზობელ ატომთან ამყარებს. დამატებით ელექტრონის მიღებით ბორის ატომი უარყოფით მუხტს იძენს, ხოლო კაუბადის ელექტრონდაკარგული ატომი ხერელს წარმოადგენს, რომელიც სითბური ენერჯის ფლუქტუაციის გამო მეზობელი კაუბადის ატომიდან

ელექტრონს მიიერთებს, ეს კი მეზობელი ატომისგან ხერელს წარმოქმნის ე.ი. ერთი ხერელის განეიტრალება მეორის წარმოქმნით ხდება.

ნახევრად გამტარზე ელექტრული ველის არ მოქმედების შემთხვევაში ხერელები სითბურ ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან, ხოლო ელექტრული ველის მოქმედებით ხერელები ველის გასწვრივ მოძრაობენ და დენის ძირითად მატარებლებს წარმოადგენენ.

მინარევებს, რომლებიც ნახევრად გამტარში ხერელურ გამტარებლობას წარმოქმნიან აქცეპტორულ მინარევებს, ხოლო გამტარებლობას აქცეპტორულს უწოდებენ. ხერელურ გამტარებლობას და შესაბამისად ნახევრად გამტარს P - ტიპით აღნიშნავენ (positive - დადებითი).

აქცეპტორულ ნახევრად გამტარში მინარეული დონე E_a აკრძელებული ზონის ქვედა ძირზე - სავალენტო ზონის მაღლა განლაგდება (ნახ. 8-3 ბ).

რეალურ ნახევრად გამტარებში ერთდროულად ყოველთვის არსებობს, როგორც დონორული ასევე აქცეპტორული მინარევები, მაგრამ გამტარებლობის ტიპის მინარევები განაპირობებენ, რომელთა მიერ შექმნილი დენის თავისუფალი მატარებლების კონცენტრაცია მეტია.

§ 8-3 ნახევრად გამტარების ელექტროგამტარობა

როდესაც გარეშე ელექტრული ველი არ მოქმედებს მაშინ ნახევრად გამტარში დენის მატარებელი ნაწილაკები ელექტრონები და ხერელები თბურ ქაოსურ მოძრაობას ასრულებენ. გარეშე ელექტრული ველის მოქმედებით აღნიშნული ნაწილაკები დამატებით სიჩქარეს შეიძენენ, რომელიც ველის გასწვრივაა ორიენტირებული, რის გამოც ელექტრონები გარეშე ველის საწინააღმდეგოდ, ხოლო ხერელები ველის გასწვრივ გადაადგილდებიან.

ბიან, ამის შედეგად ნახევრად გამტარში ელექტრული დენი გაივლის.

ოთახის ტემპერატურაზე ნახევრად გამტარში დენის მატარებლების მოძრაობის სიჩქარე 10^5 მ/წმ, ხოლო ელექტრონის თავისუფალი განარბენის სიგრძე $\lambda = 70 \text{ \AA}$, მეტალებში კი $\lambda = 5 \text{ \AA}$. ე.ი. ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობას განსხვავებით მეტალებისა არა თავისუფალი განარბენის სიგრძე, არამედ დენის მატარებლების კონცენტრაცია განსაზღვრავს.

საკუთარი გამტარებლობის მქონე ნახევრად გამტარში დენის გადამტანის როლში ელექტრონები და ხვრელები გვევლინებიან, რომელთა კონცენტრაციები თანაბარია. ასეთ ნახევრად გამტარში ელექტრონების მიერ დროის ერთეულში, ერთეულ ფართზე გადატანილი მუხტის სიმკვრივე (j_n) შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$j_n = e \cdot n \cdot V_n \quad (8-4)$$

სადაც $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ კლ. - ელექტრონის მუხტია; n - ელექტრონების კონცენტრაცია, გამტარებლობის ზონაში, ხოლო V_n - ელექტრონის მოძრაობის სიჩქარე ელექტრულ ველში, რომელიც თავის მხრივ პროპორციულია ელექტრული ველის დაძაბულობისა (E).

$$V_n = u_n E \quad (8-5)$$

პროპორციულობის კოეფიციენტს u_n -ს ელექტრონის ძერადობას უწოდებენ.

ფორმულა (8-4) და (8-5) - ის გათვალისწინებით შეგვიძლია დავწეროთ, რომ

$$j_n = E \cdot \gamma_n = \frac{E}{\rho_n} \quad (8-6)$$

სადაც $\gamma_n = e \cdot n \cdot u_n$ ნახევრად გამტარის ელექტრონებით განპირობებული კუთრი ელექტორგამტარობა, ხოლო $\rho_n = \frac{1}{\gamma_n}$ ნახევრად გამტარი ელექტრონებით განპირობებული კუთრი წინააღმდეგობაა.

ანალოგიურად საკუთარ ნახევრად გამტარში დენის ხერეღური მდგენელი იქნება

$$j_p = e \cdot p \cdot u_p \cdot E \quad (8-7)$$

სადაც p - ხერეღების კონცენტრაციაა სავალენტო ზონაში, ხოლო u_p კი მათი ძერადობა.

საკუთარი გამტარობის მქონე ნახევრად გამტარში ხერეღებით გამოწვეულ გამტარობაც მსგავსი ფორმულით გამოისახება

$$\sigma_p = e \cdot p \cdot u_p \cdot E \quad (8-8)$$

რადგან საკუთარი გამტარობის მქონე ნახევრად გამტარში სრული დენის სიმკერვე ელექტრონული და ხერეღური დენების სიმკერვეს წარმოადგენს, ამიტომ ასეთ ნახევრად გამტარის კუთრი ელექტროგამტარობა შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

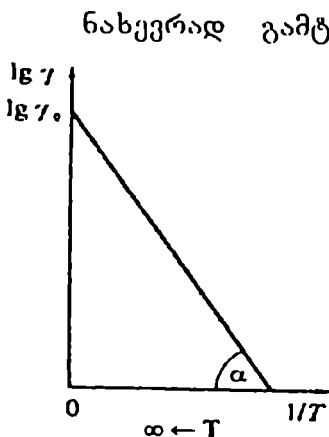
$$\gamma_i = \gamma_n + \gamma_p = e \cdot (n \cdot u_n + p \cdot u_p) \quad (8-9)$$

რადგანაც საკუთარ ნახევრად გამტარში ელექტრონების და ხერეღების კონცენტრაციები და შესაბამისი ძერადობები დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ამიტომ გამტარებლობაც (γ_i) დამოკიდებული იქნება ტემპერატურაზე.

$$\gamma_i = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (8-10)$$

სადაც (ΔE) აკრძალული ზონის სიდიდეა K - ბოლცმანის მუდმივაა, ხოლო T - აბსოლიტური ტემპერატურა. კოეფიციენტი γ_0 გვიჩვენებს იმ გამტარობას, რომელიც ნახევრად გამტარს გააჩნია, როდესაც $T \rightarrow 0^\circ$.

§ 8-4 ნახევრად გამტარების წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება



ნახ. 8-5 საკუთარი ნახევრად გამტარის ელექტროგამტარებლობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობის ანუ გამტარებლობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების შესწავლის მიზნით ხელსაყრელია 8-10 გამოსახულების ორივე მხარე გავალოგარიტმით და ავაგოთ $\lg \gamma$ -ს დამოკიდებულების გრაფიკი $\frac{1}{T}$ -ზე

(ნახ. 8-5), სადაც ჩანს, რომ ტემპერატურის გაზრდით საკუთარი ნახევრად გამტარის გამტარობა იზრდება ანუ წინააღმდეგობა მცირდება. ამ დამოკიდებულების დახრის კუთხის ტანგენსი აკრძალული

ზონის სიდიდის ტოლია. ე.ი.

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta E \quad (8-11)$$

მინარეულ ნახევრად გამტარში ოთახის ტემპერატურაზე ყველა მინარევი იონიზირებულია. ამის გამო ელექტრო გამტარებლობა ელექტრონების და ხვრელების გადაადგილებით არის გამოწვეული ე.ი.

$$\gamma_n = e \cdot n \cdot u_n \quad \text{და} \quad \gamma_p = e \cdot p \cdot u_p \quad (8-12)$$

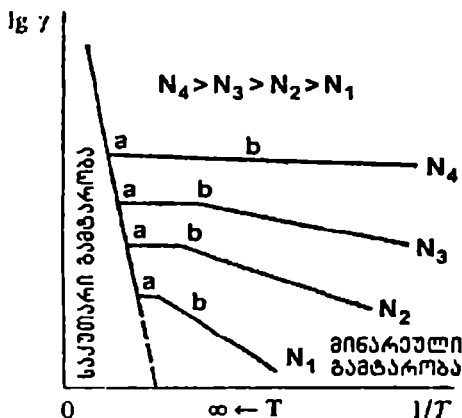
სადაც n და p დენის ძირითადი მატარებლების კონცენტრაციებია.

მინარეული ნახევრად გამტარის სრული ელექტრო გამტარობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე შემდეგი ფორმულით გამოისახება

$$\gamma = \gamma_{no} e^{-\frac{\Delta E}{KT}} + \gamma_{po} e^{-\frac{\Delta W_o}{KT}}, \quad (8-13)$$

სადაც γ_{no} და γ_{po} ანალოგიურია γ_o , ხოლო ΔW_o

მინარეების აქტივაციის ენერგია. ამ დამოკიდებულების გრაფიკული გამოსახვა (ნახ. 8-6) - ზეა მოყვანილი, საიდანაც ჩანს, რომ ტემპერატურის გაზრდით ნახევრად გამტარის გამტარებლობა იზრდება ე.ი. წინააღმდეგობა მცირდება. დაბალ ტემპერატურაზე ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობის ზრდა დენის მატარებლების კონცენტრაციის ზრდითაა განპირობებული.



ნახ. 8-6 მინარეული ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და მინარეების კონცენტრაციაზე

როდესაც მინარეების ყველა ატომი იონიზირებულია, მაშინ ტემპერატურის გაზრდით დენის მატარებლების რიცხვი არ იზრდება და გამტარებლობა ფაქტიურად არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე (a - b უბანი). ამ მოვლენას გაჯერების უბანს უწოდებენ. ტემპერატურის შემდგომი გაზრდით ნახევრად გამტარის საკუთარი გამტარობა იჩენს თავს. ამ უბანზეც (ნახ. 8-6) ტემპერატურის გაზრდით გამტარებლობა იზრდება, ხოლო წინააღმდეგობა მცირდება.

როდესაც ნახევრად გამტარის ტემპერატურა აბსოლიტური ნოლის მახლობლადაა ($T \rightarrow 0$), მაშინ გამ-

ტარებლობის 'სონაში არცერთი ელექტრონი არ იმყოფება და მისი წინააღმდეგობა უსასრულოდ დიდია, ანუ ნახევრად გამტარს დაბალ ტემპერატურაზე დი-ელექტრიკების მსგავსად დიდი წინააღმდეგობა გააჩნია.

თუ ნახევრად გამტარის ტემპერატურა უსასრუ-ლოდ დიდია ($T \rightarrow \infty$), მაშინ გამტარობის 'სონა დენის მატარებელი ნაწილაკებით მთლიანად შეესებულება. ამ შემთხვევაში ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობა ძალიან მცირეა და ნახევრად გამტარი მაღალ ტემპერატურაზე გამტარი მასალების თვისებას ავლენს.

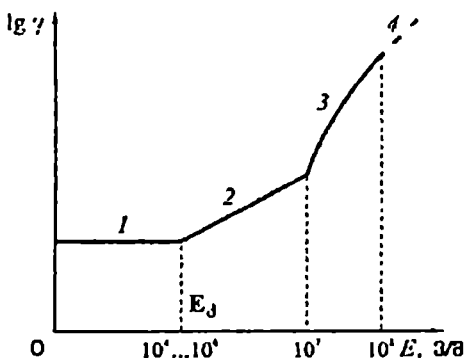
განსხვავებით გამტარი მასალებისა და მსგავსად დიელექტრიკებისა ნახევრად გამტარების კუთრი წი-ნააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი უარყ-ოფითია.

ტემპერატურის მიმართ მდგრადი პარამეტრების მქონე ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების შესაქმნელად ისეთი მასალები უნდა შეირჩეს, რომლებსაც გაჯერების უბანი ხელსაწყოს მუშა დიაპაზონში აქვს. ხოლო თუ მოთხოვნილია ისეთი ხელსაწყოს დამზადება, რომლის პარამეტრები გარკვეული კანონზომიერებით იცვლება, მა-შინ ტემპერატურის მუშა დიაპაზონი მინარეული ან სა-კუთარი გამტარობის დიაპაზონს უნდა შეესაბამებოდეს.

საბოლოოდ შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ნახევრად გამტარის ტემპერატურის გაზრდით კუთრი გამტარობა იზრდება, ხოლო კუთრი წინააღმდეგობა მცირდება. და-ბალ ტემპერატურულ ინტერვალში გამტარებლობას მინარეები განსაზღვრავს, მაღალტემპერატურულ დიაპა-ზონში კი თავს იჩენს საკუთარი გამტარობა.

§ 8-5 ნახევრად გამტარების წინააღმდეგობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე

გარეშე ელექტრული ველის მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში ნახევრად გამტარში გამავალი დენის სიდიდე პროპორციულია ველის დაძაბულობის, ანუ სრულდება ომის კანონი, ე.ი. ნახევრად გამტარის გამტარებლობა არ არის დამოკიდებული ველის დაძაბულობაზე (ნახ. 8-7, 1 უბანი), მაგრამ გარეშე ველის E_0 დაძაბულობაზე თავს იჩენს გამტარებლობის ექსპონენციალური ზრდა, რის შედეგადაც იზრდება დენის სიდიდეც. ველის იმ მინიმალურ დაძაბულობას, რომლის შემთხვევაშიც ადგილი აქვს გამტარებლობის ზრდის დაწყებას *კრიტიკულ დაძაბულობას* უწოდებენ (E_c).



ნახ. 8-7 ნახევრად გამტარის
გამტარებლობის დამოკიდებულება
გარეშე ველის დაძაბულობაზე

გამტარებლობის ზრდა დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვის გადიდების შედეგია, რაც ძლიერი ველის მოქმედებით თერმოელექტრული, ელექტროსტატიკური და დარტყმითი იონიზაციის მექანიზმებით მიმდინარეობს.

თერმოელექტრული იონიზაციას ადგილი აქვს, გა-

რეშე ელექტრული ველის დაძაბულობის შედარებით მცირე მნიშვნელობაზე ($E < 10^7$ ვ/მ), ამიტომ ელექტრონის მიერ ველში შექმნილი დამატებითი ენერგია იონიზაციის მოსახდენად არასაკმარისია, მაგრამ თერმოფლუქტუაციით დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვი იზრდება, შესაბამისად დაძაბულობის გაზრდა გამტარებლობის გაზრდას იწვევს (ნახ. 8-7. 2 უბანი). თუ ველის დაძაბულობის სიდიდე შედარებით დიდია (10^7 ვ/მ $< E < 10^8$ ვ/მ), მაშინ იზრდება ელექტრონზე მოქმედი ძალები, შედეგად ადგილი აქვს სავალენტო ელექტრონის მიერ კოვალენტური კავშირის გაწყვეტას (ელექტროსტატიკური იონიზაცია) და გამტარობის სონაში გადასვლას, რის შედეგადაც გამტარობა მკვეთრად იზრდება (ნახ. 8-7. 3 უბანი). პარალელურად ძლიერი ველის მოქმედებით გამტარებლობის ელექტრონი თავისუფალი განარბენის ($\bar{\lambda}$) სიგრძეზე დამატებით ენერგიას ($\Delta \mathcal{E}_e$) იძენს.

$$\Delta \mathcal{E}_e = e \bar{\lambda} E \quad (8-14)$$

როდესაც ეს ენერგია მეტია ან ტოლია აკრძალული ზონის სიდიდეზე ($\Delta \mathcal{E}_e \geq \Delta E$) და ასეთი ელექტრონი ატომის სავალენტო ელექტრონს ეჯახება, მაშინ სავალენტო ელექტრონი გამტარებლობის სონაში გადადის (დამტყმითი იონიზაცია) და აჩქარებული ელექტრონიც სავალენტო სონაში რჩება. ველის დაძაბულობის გაზრდით დარტყმითი იონიზაციის პროცესი უფრო ინტენსიური ხდება, რასაც საბოლოოდ ნახევრად გამტარის გამტარობის უსასრულოდ ზრდამდე მივყავართ ე.ი. ადგილი აქვს ნახევრად გამტარის ელექტრულ გარღვევას (8.7. 4 უბანი).

გარღვევის მომენტამდე ნახევრად გამტარის გამტარებლობის დამოკიდებულებას გარეშე ველის დაძაბულობაზე შემდეგი სახე აქვს

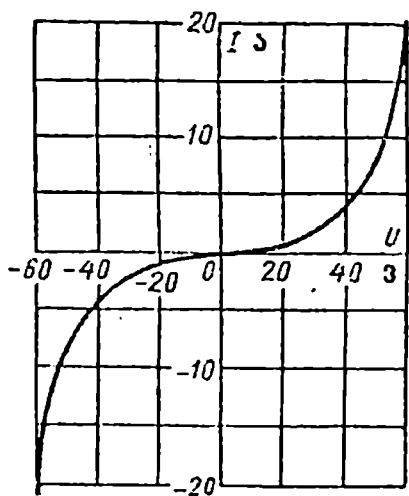
$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\mu \sqrt{E}} \quad (8-15)$$

სადაც γ - ნახევრად გამტარის გამტარობის სიდიდეა, როდესაც ომის კანონი დარღვეული არ არის,

ხოლო E გარეშე ველის დაძაბულობაა ($E \geq E_k$).

უმეტეს ნახევრად გამტარულ ხელსაწყოებში ველის დაძაბულობის სიდიდე ომის კანონს არ არღვევს, მაგრამ ომის კანონიდან გადახრა (კერძოდ არაწრფივი უბანი ზოგიერთი ხელსაწყოების შესაქმნელად გამოიყენება, როგორებიცაა ვარისტორები და ვენტილური განმმუხტველები. ამ ხელსაწყოების მოქმედების პრინციპია ელექტრული წინააღმდეგობის ძლიერი დამოკიდებულება ველის დაძაბულობის სიდიდეზე.

რეზისტორს, რომლის წინააღმდეგობის სიდიდე გარეშე ველის დაძაბულობაზეა დამოკიდებული ვარისტორს უწოდებენ. ვარისტორი ერთმანეთთან დაკავშირებული კაჟბადის კარბიდის (SiC) მარცვლებისგან შედგება. თუ მარცვლების დამაკავშირებლად თიხა ან ფაიფური გამოიყენება, მაშინ მიღებულ მასალას ტირიტს უწოდებენ, ხოლო თუ დამაკავშირებლად თხევადი მინაა გამოიყენება მაშინ ვილიტი მიიღება.



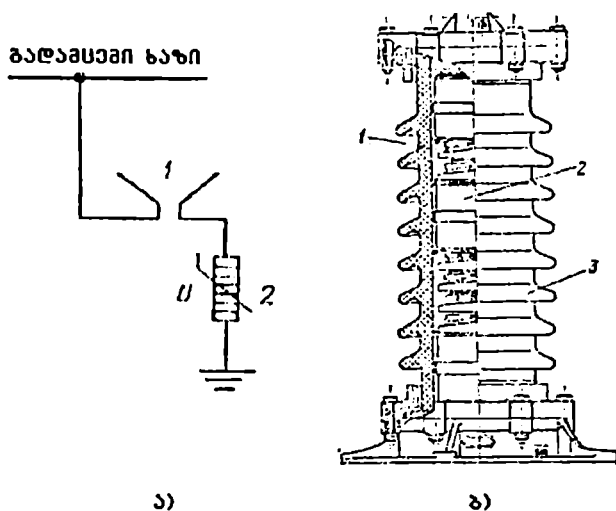
ნახ. 8-8 ვარისტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ცვლად ძაბვაზე.

ელექტრული ველის მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში ვარისტორში დენი პრაქტიკულად არ გადის (ნახ. 8-8) მაგრამ ველის დაძაბულობის გაზრდით SiC -ს მარცვლების გამტარობა იზრდება და ველის მთელი დაძაბულობა დამაკავშირებელი მასალის თხელ ფენაზეა მოდებული, რომელთა ნაწილობრივ გარღვევის შემთხვევაში ადგილი აქვს დენის ზრდას. რადგან ვარისტორში ერთი ტიპის ნახევრად

გამტარი გამოიყენება, ამიტომ დენის სიდიდე პოლარობაზე დამოკიდებული არ არის. ე.ი. ამ ტიპის ვარისტორი ცვლად ძაბვაზეც მუშაობს.

კაუბადის კარბიდიანი ვარისტორის ეს თვისება ფართოდ გამოიყენება ვენტილური განმუხტველების შესაქმნელად, რომელთა დანიშნულებაა დაიცვას ელექტროტექნიკური მოწყობილობები გადამეტაბვის იმპულსის მოქმედებისგან.

ვენელური ეწოდება ისეთ განმუხტველს, რომელსაც ერთი ან რამოდენიმე ვარისტორული წინააღმდეგობა და სანაპერწკლო შუალედი გააჩნია.



ნახ. 8-9 ვენტილიანი განმუხტველის პრინციპული სქემა (ა) და კონსტრუქცია (ბ). 1 - სანაპერწკლო შუალედი; 2 - ვარისტორი; 3 - ფაიფურის კორპუსი

სანაპერწკლო შუალედის (1) და ვარისტორის წინააღმდეგობა (2) ისეა შერჩეული (ნახ. 8-9), რომ ხაზის ნომინალურ ძაბვაზე გამმუხტველში პრაქტიკულად დენი არ გადის. მაგრამ გადამცემ ხაზზე გადამეტაბვის იმპულსის მოქმედებისას, სანაპერწკლო შუალედი გაირღვევა, არაწრფივი ელემენტები (ვარისტორები)

მაღალი ძაბვის მოქმედების ქვეშ აღმოჩნდებიან, რის გამოც მათი წინააღმდეგობა მყისიერად (10^{-6} - 10^{-8} წმ) თითქმის ნოლამდე მცირდება. ამიტომ გადამცემი ხაზი დროის ძალიან მცირე შუალედში დამიწებული აღმოჩნდება, რის გამოც განმუხტველში იმპულსური დენი გაედინება და გადამმეტძაბვის ტალღა მიწაზე დაიცლება.

რადგან სანაპერწკლო შუალედები გარღვეულია და მუშა ძაბვა ვარისტორზე იმოქმედებს, ამიტომ განმუხტველში მუშა ძაბვის მიერ განპირობებული დენი იარსებებს, მაგრამ ცველადი ძაბვის ნულზე გადასვლისას ვარისტორზე და სანაპერწკლო შუალედზე მცირე ხნით ძაბვა არ მოქმედებს, ამ მომენტში ვარისტორი საწყის წინააღმდეგობას აღიდგენს, ხოლო სანაპერწკლო შუალედის დეიონიზაციის შედეგად კი ელექტრული სიმტკიცის აღდგენას ასწრებს. ყოველივე ამის შედეგად ხაზი მიწისგან ელექტრულად იზოლირებულია და განმუხტველი საწყის მდგომარეობას უბრუნდება.

§ 8-6 ნახევრად გამტარების ფოტოელექტრული თვისებები

ნახევრად გამტარებში მიმდინარე პროცესებს შორის ერთ – ერთი მნიშვნელოვანი ფოტოელექტრული მოვლენებია. კერძოდ სინათლის სხვის (ფოტონის) მოქმედებით ნახევრად გამტარის ელექტრული თვისებების ცვლილება.

ნახევრად გამტარის ზედაპირზე დაცემული სინათლის სხვიის ნაწილი აირეკლება, ნაწილი კი გარკვეულ სიღრმეში შეღწევის შემდეგ ელექტრონების ან ატომების მიერ შთაინთქება, რის გამოც მათი ენერგია იზრდება. სავალენტო ელექტრონის მიერ ფოტონის შთანთქმით მიღებული ენერგიის ნაზრდი შეიძლება მეტი ან ნაკლები იყოს აკრძალული ზონის სიდიდეზე.

როდესაც სავალენტო ელექტრონის მიერ

შთანთქმეული ფოტონის ენერგია მეტია ან ტოლია აკრძალული ზონის სიდიდეზე (ΔE) მაშინ ელექტრონი სავალენტო ზონიდან გამტარებლობის ზონაში გადადის ე.ი.

$$h\nu > \Delta E \text{ ანუ } \frac{hc}{\lambda} > \Delta E \quad (8-16)$$

სადაც $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ ევ.წმ - პლანკის მუდმივაა, $C \approx 3 \cdot 10^8$ მ/წმ - სინათლის სიჩქარეა, ხოლო λ - დაკუმული ტალღის სიგრძეა მკმ - ში. ამ სიდიდეების ჩასმით (8-16) ფორმულაში მივიღებთ

$$\frac{1,2,3}{\lambda} \geq \Delta E \text{ ანუ } \lambda \leq \frac{1,2,3}{\Delta E} \quad (8-17)$$

რადგან ნახევრად გამტარის $0,1,2,3 < \Delta E < 3$ ევ ამიტომ ფოტონის ტალღის ის მაქსიმალური სიგრძე რომელიც ნახევრად გამტარში ფოტო ეფექტს იწვევს $0,4$ მკმ - დან 12 მკმ - მდე იცვლება, ანუ მოიცავს მთელ სპექტრს ულტრაიისფერიდან ინფრაწითელი სხივის ჩათვლით (დამატება 1).

გამტარებლობის ზონაში გადასული ელექტრონები, თუ მათზე ელექტრული ველი არ მოქმედებს თბურ ქაოსურ მოძრაობაში იმყოფებიან. ამ მდგომარეობაში მათი ყოფნის ხანგრძლივობა ($10^{-3}-10^{-7}$) წმ - ს ტოლია, მაგრამ თუ ნახევრად გამტარზე გარეშე ელექტრული ველი მოქმედებს მაშინ ისინი დენის დამატებით მატარებელ ნაწილაკებს წარმოქმნიან. ამ მოვლენას ფოტოგამტარებლობას უწოდებენ.

მუდმივ ტემპერატურაზე ფოტონის მოქმედებით გამოწვეული გამტარებლობა ($\gamma_{ფ}$), სინათლისა ($\gamma_{სინ}$) და სიბნელის ($\gamma_{სიბ}$) გამტარებლებს შორის სხვაობის ტოლია.

$$\gamma_{ფ} = \gamma_{სინ} - \gamma_{სიბ} \quad (8-18)$$

ელექტრონული გამტარებლობის ფორმულის მსგავსად შეგვიძლია დავწეროთ

$$\gamma_{სიბ} = e \cdot n \cdot u_n \text{ და } \gamma_{სინ} = e \cdot (n + \Delta n) u_n \quad (8-19)$$

ანუ საბოლოოდ

$$\gamma_{ny} = e \cdot \Delta nu_n. \quad (8-20)$$

მსგავსად ხერხელური გამტარებლობისათვის

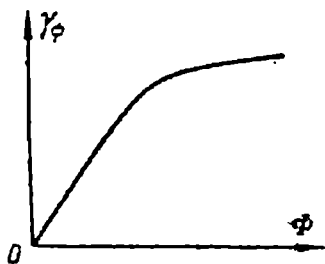
$$\gamma_{py} = e \cdot \Delta Pu_p, \quad (8-21)$$

საბოლოოდ

$$\gamma_{\eta} = e\Delta nu_n + e\Delta Pu_p \quad (8-22)$$

ნახევრად გამტარის ფოტოგამტარებლობა მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული, როგორცაა ფოტონის ტალღის სიგრძე, ინტენსივობა, ნახევრად გამტარის ტემპერატურა და სხვა.

ტალღის სიგრძის შემცირებით ფოტონის ენერგია იზრდება და გარკვეული ტალღის სიგრძისას ფოტოგამტარებლობა სწრაფად იწყებს ზრდას. ეს ტალღის სიგრძეა, რომელიც მოცემულ ტემპერატურაზე (8-16) პირობას აკმაყოფილებს.



ნახ. 8-10 ნახევრად გამტარის ფოტოგამტარობის დამოკიდებულება განათებულობის ინტენსივობაზე

ფოტონების შთანთქმა ნახევრად გამტარში დენის მატარებლების დამატებით არაწონასწორულ კონცენტრაციას წარმოქმნის. სინათლის ინტენსივობის გაზრდით მათი რაოდენობა და შესაბამისად ელექტრო გამტარობა იზრდება (ნახ. 8-10), მაგრამ ადგილი აქვს შებრუნებულ მოვლენასაც – ელექტრონები თავიანთ ჭარბ ენერგიას კვანძებს გადასცემენ და მათი რიცხვი

მცირდება. საბოლოოდ ამ მოვლენებს შორის წონასწორობა მყარდება.

ფოტოგამტარობის დამოკიდებულებას ფოტონის ინტენსივობაზე რთული სახე აქვს, მაგრამ ზოგადად შემდეგი ფორმულით გამოისახება

$$\gamma_{\text{ფ}} = B\phi^X \quad (8-23)$$

სადაც B - კონკრეტული ნახევრად გამტარის მახასიათებელი მუდმივაა, ხოლო $0.5 < X < 1$.

ნახევრად გამტარის გამტარებლობის ცვლილებამ სინათლის სხივის მოქმედებით მეცნიერებს მრავალი სახის ფოტოელექტრული ხელსაწყოების შექმნის შესაძლებლობა მისცა, რომლებშიც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ელექტრულ სიგნალად გარდაიქმნა და გაძლიერება ხდება.

ნახევრად გამტარებს, რომელთა აკრძალული ზონის სიდიდე 1,7ეე - ს აღემატება ელექტრული ველის მოქმედებით ელექტროლუმინისცენციის მოვლენა ახასიათებს, რომლის ძირითადად ორი სახე არსებობს: ინდუქციური და გარღვევისწინა ელექტროლუმინისცენცია. ორივე შემთხვევაში გამოსხივებული ფოტონის ენერგიას ნახევრად გამტარის აკრძალული ზონის სიდიდე განაპირობებს, ხოლო გამოსხივების ინტენსივობას კი ნახევრად გამტარში გამავალი დენი.

ელექტროლუმინისცენციის მოვლენის პირველ სახეს ადგილი აქვს მუდმივი დენის წყაროსთან ნახევრად გამტარული p-n გადასასვლელის პირდაპირი მიმართულებით ჩართვისას. ეს მოვლენა პირველად სილიციუმის კარბიდის შესწავლისას ო.ლოსევიმა (1923წ) აღმოაჩინა და მის საფუძველზე შექმნილია თანამედროვე შუქდიოდები და ნახევრად გამტარული ლაზერები.

თუ დიდი წინააღმდეგობის და ფართო აკრძალული ზონის მქონე ნახევრად გამტარზე ძლიერი ელექტრული ველი მოქმედებს, მაშინ დარტყმითი იონიზაციის საშუალებით ნახევრად გამტარში დენის დამატებითი მატარებლები წარმოიქმნება, რომლებიც ფოტონს გამოასხივებენ.

სხვადასხვა ტალღის სიგრძის მქონე ფოტონების მისაღებად (სხვადასხვა ფერი) განსხვავებული აკრძალული ზონის მქონე ნახევრად გამტარების ფხვნილს დიელექტრიკში ურევენ, შეაცხობენ და შემდეგ გამჭვირვალე

ელექტროდებს შორის ათავსებენ. ამ პრინციპზე მუშაობენ მანათობელი ტაბლოები, ინფორმაციის ასახვის მოწყობილობები, ფერადი ეკრანები და სხვა.

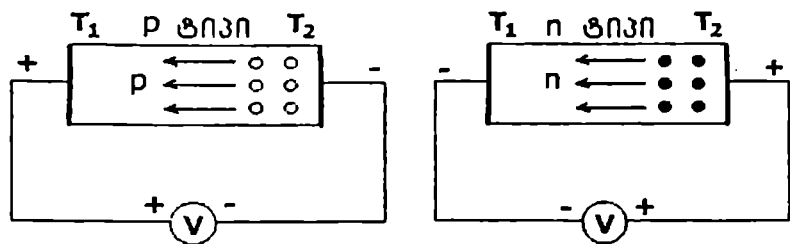
ზოგიერთ ნახევრად გამტარში ელექტროლუმინისცენციის მოვლენისათვის მარტო ელექტრული ველის მოქმედება საკმარისი არ არის, აუცილებელია თუნდაც მცირე ენერგიის მქონე ფოტონის შემოქმედება, რომელიც მოქმედების ადგილებში მინარეული დონიდან გამტარებლობის ზონაში გადასულ ელექტრონებს წარმოქმნიან. შემდეგ ეს ელექტრონები გამტარობის ზონიდან სავალენტო ზონაში გადასვლით მეტი ენერგიის მქონე ფოტონებს გამოასხივებენ. დამატებითი ენერგიის წყაროდ ამ შემთხვევაში ელექტრული ველი გვეკვლინება. ამ პრინციპზე მოქმედებს ღამის მხედველობის ხელსაწყოები, რომლებშიც კარგი ელექტროგამტარობის მქონე ორ გამჭვირვალე ელექტროდს შორის ნახევრად გამტარის ფირფიტაა მოთავსებული. როდესაც ფირფიტის ერთ მხარეს ღამის ნათება ანუ ადამიანის თვალის მიერ შეუგრძნობადი ინფრაწითელი სხივი მოქმედებს, მაშინ ნახევრად გამტარის ფირფიტის მეორე მხარეს შესაბამისი ინტენსივობის თვალისმიერ შეგრძნობადი მწვანე ფერის სხივი გამოესხივება.

ნახევრად გამტარზე სინათლის სხივის მოქმედების ადგილზე ელექტრონების ჭარბი რაოდენობა წარმოიქმნება, რომელიც დიფუზიის გზით საწინააღმდეგო მხარეს გადაადგილდება, ამის გამო ნახევრად გამტარის ორ გვერდს შორის ფოტოელექტრო-მამოძრავებელი ძალა იარსებებს, რაც ფოტო ელემენტების შესაქმნელად გამოიყენება.

§ 8-7 თერმოელექტული და გალვანომაგნიტური მოვლენები ნახევრად გამტარებში

როგორც მეტალის ასევე ნახევრად გამტარის ბოლოებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა თერმო

ელექტრომაგნიტურ ძალას (თერმ) წარმოშობს, რის გამოც ბოლოებს შორის ელექტრულ პოტენციალთა სხვაობა იარსებებს. (ნახ. 8-11).



ნახ. 8-11 ნახევრად გამტარებში თემპ-ს წარმოქმნის მექანიზმი $T_2 > T_1$

განსხვავებით ნახევრად გამტარებისა, მეტალებში ტემპერატურის ზრდა დენის მატარებელი ნაწილაკების ენერჯიას ზრდის, ხოლო მათი კონცენტრაცია არ იცვლება. ნახევრად გამტარებში კი ძირითადად დენის მატარებელი ნაწილაკების კონცენტრაცია იზრდება.

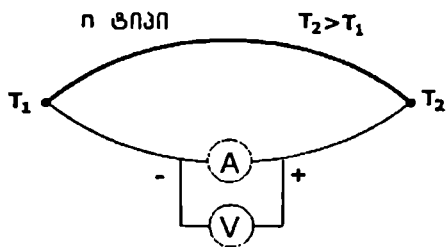
ნახევრად გამტარის ერთერთ ბოლოში ტემპერატურის გაზრდა დენის ძირითადი მატარებლების კონცენტრაციის ზრდას იწვევს, რომლებიც ჭარბი კონცენტრაციის გამო ცხელი ბოლოდან ცივი ბოლოსკენ გადაადგილდებიან. ამის გამო ცხელ ბოლოში ასეთი ნაწილაკების ნაკლებობა იქმნება. ე.ი. ამ ბოლოს აღმოაჩნდება დენის მატარებელი ნაწილაკების საწინააღმდეგო მუხტი, კერძოდ P - ტიპის ნახევრად გამტარის ცხელი ბოლო უარყოფით მუხტს შეიძენს, (ნახ. 8-11ა) ხოლო n - ტიპის კი დადებითს (ნახ. 8-11 ბ). ეს მეთოდი ხშირად ნახევრად გამტარების დენის ძირითადი მატარებლების ტიპის დასადგენად გამოიყენება და ზეეპეკის ეფექტის სახელითაა ცნობილი.

გამტარობლობის ტიპის მიუხედავად ნახევრად გამტარებში თემპ - ს სიდიდე (S_{θ}) შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$U_{\theta} = \alpha_{\theta}(T_2 - T_1) \quad (8-24)$$

სადაც α_{θ} თემი - ს კოეფიციენტია და ნახევრად გამტარებისათვის (0,1 - 10) მ $^{\circ}$ C - ს ტოლია.

თუ ნახევრად გამტარის ცივ და ცხელ ბოლოს მეტალის გამტარით შევაერთებთ მაშინ წრედში გარკვეული სიდიდის დენი გაივლის (ნახ. 8-12), რომლის სიდიდე მეტალის გამტარის წინააღმდეგობის და თემს-თაა განპირობებული.



ნახ. 8-12 ნახევრად გამტარული თერმო წყვილის სქემა.

შექმნილი მოწყობილობებს თერმოელემენტებს უწოდებენ, ისინი მიმდევრობით შეერთებულ სხვადასხვა გამტარებლობის მქონე ნახევრად გამტარების მავთულებს წარმოადგენენ და თბურ ენერგიას ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნიან.

თუ ორი სხვადასხვა ტიპის ნახევრად გამტარის კონტაქტში მუდმივ ელექტრულ დენს გავატარებთ, მაშინ ნახევრად გამტარის ერთი ბოლოდან მეორე ბოლოში დენის ძირითადი მატარებლების საშუალებით ადგილი ექნება სითბოს გადატანას (Q_3), რომელიც დენის სიდიდის (I) და დროის (t) პროპორციულია (პელტიეს ეფექტი)

$$Q_3 = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (8-25)$$

სადაც Π - პელტიეს კოეფიციენტია.

პელტიეს ეფექტი მაღალი საიმედოობის და ეკონომიური ნახევრად გამტარული გამაცივებელი მოწყობილობების (მაცივრების) შესაქმნელად გამოიყენება. თუ

ასეთ მოწყობილობებში დენის მიმართულებას შევცვლით, მაშინ ისინი გამათბობელ მოწყობილობად გარდაიქმნებიან.

ნახევრად გამტარზე მაგნიტური და ელექტრული ველების ერთდროული მოქმედებით წარმოქმნილ მოვლენებს გაღვანომაგნიტურ ეფექტებს უწოდებენ. განვითარების მექანიზმის მიხედვით ისინი განივ და გრძივ ეფექტებად იყოფა.

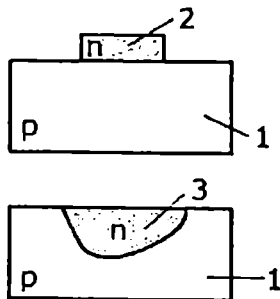
განივი ეფექტი ნახევრად გამტარის ნიმუშის ერთ – ერთ რომელიმე გვერდზე გამოვლინდება, როდესაც მეორე გვერდის და სიგრძის გასწვრივ ელექტრული ან მაგნიტური ველი მოქმედებს. ამ სახის მოვლენებს პოლის და ეთისნსპაუსის ეფექტები მიეკუთვნებიან, ხოლო გრძივ ეფექტს ნახევრად გამტარის წინააღმდეგობის ან ტემპერატურის ცვლილება (ნერსტის ეფექტი) მაგნიტური ველის გასწვრივ მიეკუთვნება. აღნიშნულ ეფექტებს პრაქტიკული გამოყენება აქვს და მათ საფუძველზე მრავალი ნახევრად გამტარული ხელსაწყოებია შექმნილი.

§ 8-8 ელექტრონულ - ხერელური (p-n) გადასასვლელი ნახევრად გამტარებში

ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების ფართო გამოყენება, ორი სხვადასხვა გამტარებლობის მქონე ნახევრად გამტარის კონტაქტის საზღვარზე მიმდინარე მოვლენების შესწავლამ განაპირობა. ასეთ კონტაქტს *ელექტრონულ – ხერელურ გადასასვლელს* უწოდებენ და სიმარტივისათვის p-n გადასასვლელით აღნიშნავენ.

ელექტრონულ – ხერელური გადასასვლელის ორი ნახევრად გამტარის მექანიკური კონტაქტის საშუალებით მიღება შეუძლებელია. ამ მიზნით სხვადასხვა ტექნოლოგიური მეთოდები შეიმუშავეს, რომელთაგან აღსანიშნავია ჩადნობისა და დიფუზიის მეთოდები.

პირველის შემთხვევაში ნახევრად გამტარის (ნახ. 8-13) ნიმუშის ზედაპირზე (1), რომელსაც ვთქვათ P ტიპის გამტარებლობა გააჩნია ისეთ ნივთიერებას (მალეგირებელ) ათავსებენ (2), რომლის ნახევრად გამტარში შეღწევით გამტარებლობის ტიპი შეიცვლება.



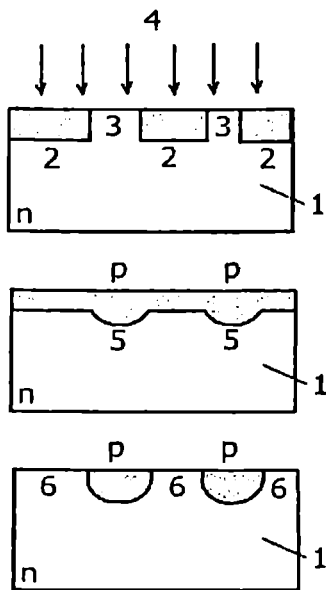
ნახ. 8-13 p-n გადასასვლელის მიღება ჩანობის მეთოდით

მალეგირებელი ნივთიერების გადნობით იწყება მისი დიფუზია ძირითად ნახევრად გამტარში და მასში გარკვეული დროის შემდეგ n - ტიპის მქონე სივრცე (3) მიიღება. ე.ი. ვიღებთ p-n გადასასვლელს. ეს მეთოდი საშუალებას არ გვაძლევს ვარგეულიროთ p-n გადასასვლელების სიღრმე და ფართობი.

დღეისათვის p-n გადასასვლელის მისაღებად სიბრტყით - დიფუზიური მეთოდი გამოიყენება, რომლის არსი შემდეგში მდგომარეობს. ვთქვათ n - ტიპის გამტარებლობის მქონე (ნახ. 8-14) კაუბადის ნიმუშში (1) გვსურს წინასწარ გათვლილი ზომებით, p-n გადასასვლელის მიღება. ამისთვის ნიმუშის ზედაპირზე სპეციალური ტექნოლოგიით კაუბადის ჟანგს (SiO_2) წარმოქმნიან (2), რომელიც პრაქტიკულად გამორიცხავს გარედან დიფუზიას, ხოლო დიფუზიის ადგილები (3) SiO_2 -ს ფენიდან თავისუფალია. ნიმუშს მალეგირებელი ნივთიერების ორთქლის გარემოში (4) ათავსებენ, რის შედეგად გათვლილი დროის, ტემპერატურისა და წნევის პირობებში გარკვეულ სიღრმეზე მალეგირებელი ნივთიერება აღწევს და n - ტიპის კაუბადში p - ტიპის არეს წარმოქმნება (5). ამის შემდეგ ნიმუშს აღმდგენ გარემოში ათავსებენ ე.ი. SiO_2 - ს აღდგენა ხდება (6) და საბოლოოდ რამოდენიმე p-n გადასასვლელს ვიღებთ.

ამ მეთოდით ერთ სმ² ფართობის მქონე ზედაპირზე შესაძლებელია მილიონამდე p-n გადასასვლელის მიღება, რომელთა სიგრძე 10⁻⁵ სმ-ს ტოლია.

n - ტიპის ნახევრად გამტარში (ნახ. 8-15ა) დენის ძირითადი მატარებლები



ნახ. 8-14. სიბრტყითი - დიფუზიური მეთოდით p-n გადასასვლელის მიღება

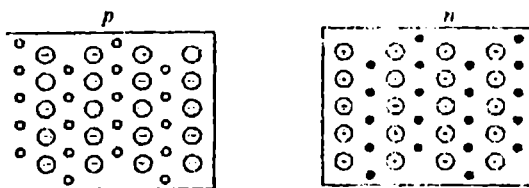
ელექტრონები • ალენიშნოთ, ხოლო დონორული მატარებლების იონიზირებული ატომები კი ⊕ ით.

p - ტიპის ნახევრად გამტარებში დენის ძირითადი მატარებლები o, ხოლო აქცეპტორული მინარევების იონ-

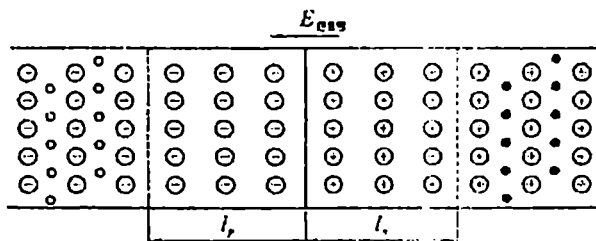
იზირებული ატომები კი o ავლნიშნოთ, ხოლო დენის არაძირითადი მატარებლები მცირე კონცენტრაციის გამო მხედველობაში არ მიიღება.

დავუშვათ, რომ p და n ტიპის ნახევრად გამტარების ნიმუშებს შორის იდეალური კონტაქტი შეიქმნა, რადგან n - ტიპის ნახევრად გამტარში მეტია ელექტრონების, ხოლო p - ტიპის ნახევრად გამტარებში ხერელების კონცენტრაცია,

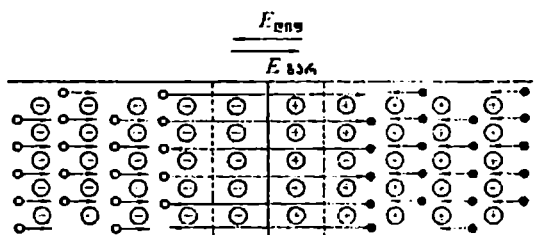
ამიტომ კონცენტრაციათა სხვაობის გამო მათ შორის დენის მატარებლების ინტენსიური გადასვლა დაიწყება. კერძოდ n - ტიპის ნახევრად გამტარიდან ელექტრონები დიფუზიით p - ტიპის ნახევრად გამტარის სასაზღვრო ფენაში გადავლენ და n - ტიპის ნახევრად გამტარში არაკომპენსირებული მოცულობით დადებითი მუხტი დარჩება, რასაც p - ტიპის ნახევრად გამტარიდან დიფუზირებული ხერელები მიემატებიან, ხოლო p - ტიპის



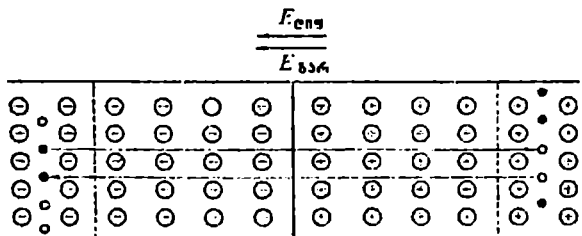
ა)



ბ)



გ)



დ)

ნახ. 8-15. მუხტების განაწილება p-n გადასასვლელში

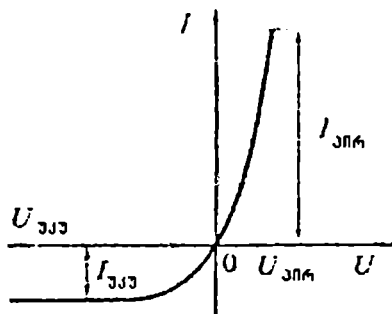
ნახევრად გამტარის სასაზღვრო ფენაში გადავლენ და n - ტიპის ნახევრად გამტარში არაკომპენსირებული მოცულობით დადებითი მუხტი დარჩება, რასაც p - ტიპის ნახევრად გამტარიდან დიფუზირებული ხვრელები მიემატებიან, ეს კი p - ტიპის ნახევრად გამტარის სასაზღვრო ფენაში უარყოფითი მოცულობითი მუხტი წარმოიქმნას გამოიწვევს.

ამდგევარად სხვადასხვა ტიპის გამტარებლობის მქონე ნახევრად გამტარების სასაზღვრო ზონა გაღარიბებულია დენის ძირითადი და გამდიდრებულია არა ძირითადი მატარებლებით. მიუხედავად ამ ფენის მცირე სისქისა ($10^{-6} \div 10^{-8}$ მ) მას გაცილებით მეტი წინააღმდეგობა გააჩნია, ვიდრე ნახევრად გამტარის დანარჩენ ნაწილს.

მოცულობით დადებითი და უარყოფითი მუხტები შინაგან ელექტრულ ველს წარმოქმნიან, რომელსაც

ზოგჯერ დიფუზიის ველსაც უწოდებენ $[E_{დიფ}]$. გარკვეული

სიდიდის შემდეგ ეს ველი დენის მატარებლების შემდგომ დიფუზიას (8-15ბ) ეწინააღმდეგება, თუ ასეთ p -ი გადასასვლელს ორივე მხარეს ლითონის ელექტროდებს გავუკეთებთ, მაშინ შეგვიძლია ის ელექტრულ წრედში ჩავრთოთ.



ნახ. 8-16 p - n გადასასვლელის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი

ვთქვათ p - n გადასასვლელის p - ნაწილი მიერთებულია დენის წყაროს დადებით პოლუსთან, ხოლო n - კი უარყოფითთან (ნახ. 8-15გ) ამ შემთხვევაში გარეშე ველი შინაგანი ველის საწინააღმდეგოდაა მიმართული და თუ $E_{გარ} > E_{დიფ}$, მაშინ გარეშე ველის გავლენით p და n ტიპის ნახევრად გამტარების დენის ძირითადი მახასიათე-

ბლები გადარიბებულ ფენას აღწევენ და ერთმანეთში რეკომბინირდებიან. ე.ი. p-ი გადასასვლელში პირდაპირი მიმართულების დენი (I_{პირ}) გაივლის, p-ი გადასასვლელის დენის წყაროსთან ასეთ ჩართვას პირდაპირ ჩართვას უწოდებენ (ნახ. 8-16).

თუ p-ი გადასასვლელის წრედში ჩართვის პოლარობას შევცვლით (ნახ. 8-15დ) მაშინ გარეშე ველის მიმართულება მოცულობითი მუხტებით შექმნილი ველის მიმართულებას დაემთხვევა, ამის გამო გადარიბებული ფენა გაიზრდება და დენის ძირითად მატარებლებს p-ი გადასასვლელის გადალახვის საშუალება პრაქტიკულად არ ექნება. ე.ი. არ იარსებებს მათ მიერ განპირობებული დენიც. დენის არა ძირითადი მატარებლებისათვის ხელსაყრელი პირობები იქმნება, ისინი ასეთი პოლარობისას თავისუფლად გადალახავენ p-ი გადასასვლელს და წარმოქმნიან ეგრეთწოდებულ უკუდენს (I_{უკ}), რომლის სიდიდე I_{პირ} შედარებით გაცილებით მცირეა. p-ი გადასასვლელის ელექტრულ წრედში ასეთ ჩართვას უკუჩართვას უწოდებენ.

p-ი გადასასვლელის თვისება გაატაროს ერთი მიმართულების დენი, ხოლო პრაქტიკულად არ გაატაროს მეორე მიმართულებით ნახევრად გამტარული დიოდების, ტრანზისტორების და თანამედროვე ელექტრონული ხელსაწყოების შექმნის საფუძველს წარმოადგენს. გასული საუკუნის 50 - იან წლებში პირველი ნახევრად გამტარული დიოდები და ტრანზისტორები შეიქმნა, ხოლო მიკროსქემების წარმოება კი 60 - იან წლებში დაიწყო.

§ 8-9 ნახევრად გამტარების მიღება

როგორი წარმოშობისაც არ უნდა იყოს ნახევრად გამტარული მასალა, მას გარკვეული სისუფთავე და სტრუქტურა ახასიათებს. გამოყენებული ნახევრად გამტარული მასალების უმეტესობა მონოკრისტალურია, მა-

გრამ ზოგიერთ შემთხვევაში პოლიკრისტალური ნახევრად გამტარული მასალების გამოყენებაც ეფექტურია.

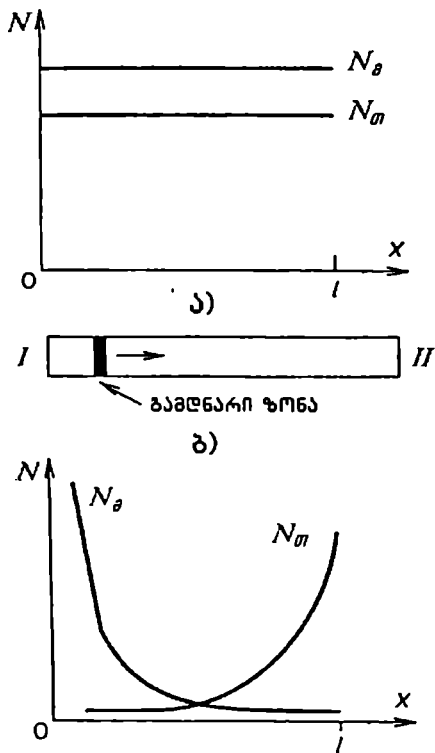
ნახევრად გამტარული მასალების ღრმად გასუფთავება და შემდეგ მონოკრისტალური ნიმუშების მიღება რთული ტექნოლოგიური პროცესია, რომლის პირველ ეტაპზე ტექნიკური სისუფთავის მასალას (1-0,1% მინარევეები) ელექტროლიზით, ცენტრიფუგით, ან ქიმიური გაწმენდის მეთოდით წინასწარ გაასუფთავებენ, ხოლო შემდეგ გასუფთავების დამატებით მეთოდებს მიმართავენ, რომელთა შორის აღსანიშნავია ზონური დნობით გაწმენდა, შთანთქმელების ან ცენტრიფუგის საშუალებით მინარევეების გამოცალკავება და სხვა.

ზონური დნობით მინარევეებისგან გაწმენდა ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს, რომლის არსი შემდგომში მდგომარეობს. გარკვეული სახის მინარევეები გამდნარ ნახევრად გამტარის. გამყარებისას თხევად ნახევრად გამტარში მეტი რაოდენობით. რჩება ვიდრე მყარდება, ზოგი კი პირიქით.

გამდნარ (თხევად) ნახევრად გამტარში მეტად ხსნადი მინარევეების კონცენტრაცია N თ აღენიშნოთ, ხოლო მყარში ხსნადის – N_m .

ვთქვათ საწყის ეტაპზე ნახევრად გამტარის მთელ სისქეზე ყველა მინარევი თანაბრად არის განაწილებული (8-17ა). თუ ასეთ ნახევრად გამტარის ნიმუშის თხელ ფენას მთელ სიგრძეზე სპეციალური მოწყობილობებით გაეადნობთ (ნახ. 8-17ბ) და გამდნარ ზონას I ბოლოდან II – საკენ გადავაადგილებთ, მაშინ გამდნარი ზონის I მხარეს ადგილი ექნება ნახევრად გამტარის გამყარებას და მასთან ერთად ის მინარევეები გამყარდებიან, რომლებიც მყარში მეტად იხსნებიან (N_m), ხოლო გამდნარ ზონას თხევად ნახევრად გამტარში ხსნადი მინარევეები (N) წაყვება. გამდნარი ზონის ნიმუშის ბოლოში გასვლის შემდეგ, მყარში ხსნადი მინარევეები თავს ნიმუშის დასაწყისში, ხოლო თხევადში ხსნადი კი ნიმუშის ბოლოში მოიყრიან.

თუ ერთი მიმართულებით გამდნარ ზონას მრავალჯერ გაატარებთ მაშინ ნიმუშის თავსა და ბოლოში მინარევები დაგროვდება, ხოლო შუა ნაწილი მინარეებისაგან თითქმის თავისუფალი იქნება (ნახ. 8-17ბ), ამ ნაწილს გამოტრიან და მინარევების გათანაბრების მიზნით გამდნარ ზონას ორივე მიმართულებით მრავალჯერ გაატარებენ. ე.ი. ნიმუშის მთელ სიგრძეზე მინარევებს თანაბრად გაანაწილებენ.



(ნახ. 8-17) ზონური დნობით მინარეების განაწილება ნახევრად გამტარში

ამავედროულად მალეგირებულ მინარევებსაც უმატებენ და ისინიც თანაბრად ნაწილდებიან. რაც ნაკლებია გამდნარი ზონის სისქე და მოძრაობის სიჩქარე მით ეფექტურია გაწმენდა.

ზონური გაწმენდის სერიულ დანადგარებში ნახევრად გამტარის ზონური დნობა ინდუქციური გამახურებლებით ვაკუუმის ან ინერტულ გარემოში ხდება. გამდნარი ზონის სისქე 0,5-5მმ - ის ტოლია, ხოლო მოძრაობის სიჩქარე 0,1მმ - დან - 10 მმ - მდეა საათში.

ნახევრად გამტარული მასალების მონოკრისტალების მისაღებად მიმართული კრისტალიზაციის და მ. ჩოხრადსკის მეთოდები გამოიყენება, ხოლო მონოკრისტალური თხელი

ფირების მიღება გამდნარი ნახევრად გამტარიდან ვაკუუმური დაფრქვევის ან სხვა მეთოდით ხდება.

§ 8-10 მარტივი ნახევრად გამტარები

ნახევრად გამტარი მასალების საერთო რაოდენობა ათასამდეა, რომელთაგან აღსანიშნავია ქიმიური ელემენტები, ანუ მარტივი ნახევრად გამტარები, არაორგანული ქიმიური შენაერთები და მათი მყარი ხსნარები. აგრეთვე უკანასკნელ წლებში ღრმა შესწავლის საგნად ქცეული ორგანული წარმოშობის ნახევრად გამტარები.

მარტივი ეწოდება ნახევრად გამტარებს, რომელთა ძირითად შემადგენლობას ერთი ქიმიური ელემენტი წარმოადგენს. ასეთი ნახევრად გამტარების რაოდენობა 12 – ამდეა (ცხრ. 8-1).

ნახევრად გამტარების აპროქალული ზონის სიდიდე (ΔE) $T=300K$

ცხრ. № 8-1

ნახევრად გამტარები	ΔE ევ	ნახევრად გამტარები	ΔE ევ
კაუბადი (Si)	1,12	გალიუმის ფოსფატი (GaP)	2,25
გერმანიუმი (Ge)	0,66	გალიუმის დარიშხანატი (GaAs)	1,43
ბორი (B)	1,1	ინდიუმის ფოსფატი (InP)	1,25
კალა (α -Sn)	0,08	ცინკის სელენიდი (ZnSe)	2,73
ფოსფორი (P)	1,5	გალიუმის ტელურიდი (GaTe)	0,78
დარიშხანი (As)	1,2	კადმიუმის ტელურიდი (CdTe)	1,51
სტიბიუმი (Sb)	0,12	ტყვიის ტელურიდი (PbTe)	0,32
გოგირდი (S)	2,5	ალუმინის ანთიმონიდი (AlSb)	1,58
სელენი (Se)	1,8	გალიუმის ანთიმონიდი (GaSb)	0,72
ტელური (Te)	0,36	$Al_xGa_{1-x}Sb$	0,7-1,6
იოდი (I)	1,25	$Ga_xIn_{1-x}P$	1,3-2,3
ინდიუმი (In)	0,82	$Al_xIn_{1-x}As$	0,4-2,2

გერმანიუმი (Ge) ერთ – ერთი ფართოდ გამოყენებულ და ყოველმხრივ შესწავლილ ნახევრად გამტარ-

რულ მასალას წარმოადგენს. მასში ექსპერიმენტალურად ნახევრად გამტარის მახასიათებელი ყველა თვისება გამოვლინდა, ამიტომ გერმანიუმი კლასიკურ ნახევრად გამტარად არის მიჩნეული.

ბუნებაში სუფთა სახის გერმანიუმი არ მოიპოვება. ის რთული მინერალების შემადგენლობაშია. მისი შემცველობა დედამიწის ქერქში 0,001% - ს შეადგენს.

ნედლეულის გადამუშავების და გაწმენდის შემდეგ ტექნიკური სისუფთავის გერმანიუმის კონცენტრირებული მარილმჟავათი ამუშავებენ, რის შედეგად, ადვილად აქროლადი სითხე გერმანიუმის ტეტრაქლორიდი (GeCl_4) მიიღება. მისი მრავალჯერ გამოხდით მინარევების რაოდენობა 100-1000 - ჯერ მცირდება, შემდეგ GeCl_4 - დეიონიზირებულ წყალში ჰიდროლიზს უტარებენ და GeO_2 იღებენ, რომლის სუფთა წყალბადის გარემოში აღდგენით მაღალი სისუფთავის გერმანიუმის სხმულს იღებენ. სხმულებს ზონური დნობით გაწმენდის რამოდენიმე ციკლს უტარებენ და ნადნობიდან მონოკრისტალურ გერმანიუმს იღებენ.

სუფთა გერმანიუმი მეტალური ბრწყინვალეობით და მაღალი მექანიკური სიმტკიცით გამოირჩევა. მისი ელექტრული მახასიათებლები დამოკიდებულია მინარევების კონცენტრაციაზე და თერმო დამუშავებაზე.

გერმანიუმისათვის ნეიტრალურ მინარევებს ინერტული აირები, აზოტი და პერიოდული სისტემის IV ჯგუფის ელემენტები წარმოადგენენ, დანარჩენი მინარევები კი მის თვისებებზე სხვადასხვაგვარ გავლენას ახდენენ.

გერმანიუმი სხვადასხვა ტიპის დიოდების, ტრანზისტორების, ჰოლის გადამწოდების, ფოტოდოდების, ფოტოტრანზისტორების, სინათლის მოდულატორების, ოპტიკური ფილტრების, ელემენტალური ნაწილაკების მთვლელების და სხვათა დასამზადებლად გამოიყენება. მის ბაზაზე დამზადებული ხელსაწყოების მუშაობის ტემპერატურა -60° - დან $+70^{\circ}$ - მდეა.

კაუბადი (Si) ყველაზე ფაროოდ გავრცელებული ნივთიერებაა ბუნებაში. მისი შემცველობა დედამიწის ქერქში 29% - მდე. სუფთა კაუბადი ბუნებაში არ გვხვდება. მისი მინერალია SiO_2 - რომლის ელექტროროკალურ ღუმელში გრაფიტის ელექტროდებით გადნობისას ტექნიკური სისუფთავის კაუბადი მიიღება და მასში მინარევების რაოდენობა 1% - ზე ნაკლებია. ასეთი კაუბადი ელექტროტექნიკური ფოლადის მისაღებად გამოიყენება, მაგრამ სრულიად გამოუსადეგარია როგორც ნახევრად გამტარი. კაუბადმა ნახევრად გამტარული თვისებები რომ გამოაქვინოს ამისათვის აუცილებელია მასში მინარევების რაოდენობა 10^{-6} %-ს არ აღემატებოდეს.

კაუბადს დნობის მაღალი ტემპერატურა გააჩნია (1412°C), ამიტომ მისი მინარევებისგან გაწმენდა დნობის მეთოდით არაუფექტურია, რადგან გამდნარ მდგომარეობაში ის ყველა იმ ნივთიერებას ხსნის რასაც ეხება. ამიტომ ტექნიკური სისუფთავის კაუბადის მარილმაჟავას ორთქლში დამუშავებით ადვილად აორთქლებად სითხეს SiHCl_3 - ს იღებენ, რომლის დუდილის ტემპერატურა 32°C - ია, ასეთი სითხის მინარევებისაგან გაწმენდა, გამოლექვის, აღსორბციის, გამოხდის ან სხვა ფიზიკური მეთოდებით წარმოებს. მიღებულ სუფთა სითხის სპეციალურ გარემოში დამუშავებით მაღალი სისუფთავის პოლიკრისტალური კაუბადი მიიღება.

პოლიკრისტალური კაუბადიდან მონოკრისტალების მიღება უტიგელო ზონური დნობით ხდება. ამ შემთხვევაში ნიმუში ვერტიკალურადაა განლაგებული და გამდნარი ზონა არაფერს ეხება. მიღებული მონოკრისტალის დიამეტრი 40-100მმ-ია, ხოლო სიგრძე რამოდენიმე მეტრს შეადგენს. კოსმოსში უწონადობის პირობებში კაუბადის მიღებისას აღმოჩნდა, რომ მინარევების რაოდენობის შემცირება უტიგელო ზონური დნობის მეთოდით რამოდენიმე ათასჯერ შეიძლება.

კაუბადში გამტარებლობის ტიპის შესაცვლელად მალეგირებელ ელემენტებად ძირითადად ბორს ან ფოსფორს უმატებენ, რადგან სხვა მინარევები მის ელექტრულ თვისებებზე შედარებით ნაკლებ გავლენას ახდენენ.

გარკვეულ პირობებში ჟანგბადის მოქმედებით ზედაპირზე კაუბადის ჟანგის (SiO_2) თხელი ფენა წარმოიქმნება, რომლის სისქე სხვადასხვა ფაქტორებთან ერთად რეაქციის მიმდინარეობის ხანგრძლივობაზეა დამოკიდებული.

თუ წარმოქმნილი SiO_2 - ის თხელ ფენას წყალბადის გარემოში გავაცხელებთ, მაშინ კრისტალური სტრუქტურის დაურღვეველად ადგილი ექნება კაუბადის აღდგენას. ამ შესანიშნავი თვისების გარდა SiO_2 საუკეთესო დიელექტრიკს წარმოადგენს და მასში მალეგირებელი ნივთიერებების ორთქლის დიფუზიას პრაქტიკულად ადგილი არ აქვს. ყველა ეს თვისებები კაუბადს შეუცვლელ საბაზო მასალად ხდის ინტეგრალური მიკრო სქემების წარმოებაში.

კაუბადის საფუძველზე დამზადებული მიკრო სქემები მცირე ზომებით და რთული კონფიგურაციით გამოირჩევიან. აგრეთვე კაუბადი დისკრეტული ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების დასამზადებლად გამოიყენება, როგორცაა: დიოდები, ტრანზისტორები, სტაბილიტრონები და სხვა. ამასთანვე ის ფართოდ გამოიყენება ფოტოელექტრული ხელსაწყოების, მზის ბატარეების, გამოსხივების დეტექტორების და სხვათა დასამზადებლად.

რადგან კაუბადის აკრძალული ზონის სიდიდე გერმანიუმის აკრძალული ზონის სიდიდეს აღემატება, ამიტომ კაუბადის ბაზაზე დამზადებული ხელსაწყოები უფრო მაღალ ტემპერატურაზე მუშაობს ვიდრე გერმანიუმის. კერძოდ კაუბადიანი ხელსაწყოების მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა $180-200^\circ\text{C}$, ხოლო მინიმალური კი მის 90°C აღწევს.

კაუბადი ნახევრად გამტარული თვისებების მქონე შენაერთებს წარმოქმნის, რომელთაგან კაუბადის კარბიდი (SiC) აღსანიშნავი, ის მაღალი მუშა ტემპერატურით (700°C) ხასიათდება და მდგრადია აგრესიულ გარემოში. ზემოთ განხილულის გარდა SiC არაწრფივი ელემენტების, შუქგამტარების, მაღალტემპერატურული დიოდების და ტრანზისტორების, მაღალი ენერჯის მქონე ნაწილაკების მთვლელების დასამზადებლად გამოიყენება.

§ 8-11 ნახევრად გამტარული შენაერთები და მყარი ხსნარები

მარტივი ნახევრად გამტარები ყოველთვის ვერ აკმაყოფილებენ თანამედროვე ტექნიკის მოთხოვნებს. ამის გამო გასული საუკუნის 60-იანი წლებიდან ფართო გამოყენება ნახევრად გამტარული თვისებების მქონე არაორგანული წარმოშობის ქიმიურმა შენაერთებმა კპოვა (ცხრილი 8-1), რომელთა ზოგადი ფორმულა $A_r^m B_n^y$ სახისაა, სადაც A და B ქიმიური ელემენტის ზოგადი აღნიშვნაა, ხოლო m და n ამ ელემენტის შესაბამისი პერიოდული სისტემის ჯგუფის ნომერია, x და y კი ატომების რიცხვია შენაერთში.

ნახევრად გამტარული თვისებებით გამოირჩევიან პერიოდული სისტემის III და V ჯგუფის ელემენტების შენაერთები, რომელთა ზოგადი აღნიშვნა $A^{III}B^V$ და II და VI ჯგუფის შენაერთების ელემენტების ნაერთები ($A^{II}B^{VI}$). თითოეულ ქვეჯგუფში შენაერთები საერთო კანონზომიერებით და მსგავსი კრისტალური სტრუქტურებით ხასიათდებიან. ასეთ შენაერთებში მინარევების როლში არამარტო სხვა ნივთიერების ატომები, არამედ ძირითადი ნივთიერების ჭარბი ატომებიც გვევლინება, ამის გამო ნახევრად გამტარული ქიმიური შენაერთების მიღების ტექნოლოგია უფრო რთულია ვიდრე მარტივი ნახევრად

გამტარებისა. მიუხედავად ამ სირთულისა ზოგიერთი მათგანი შეუცვლელია და ფართოდ გამოიყენებიან ნახევრად გამტარული ხელსაწყოების შესაქმნელად.

ნახევრად გამტარული ქიმიური შენაერთების ტიპური წარმომადგენელია *გალიუმის არსენიდი* ($GaAs$), რომლის ბაზაზე შექმნილი p-n გასასვლელი მუშა ტემპერატურა $400^{\circ}C$ აღწევს. ის შეუცვლელი მასალაა ნახევრად გამტარული ლაზერების და გვირაბული დიოდების დასამზადებლად. ფართოდ გამოიყენება ზემოაღნიშნული გენერატორების და დაბალტემპერატურული გადამწოდების დასამზადებლად.

გალიუმის ფოსფატი (GaP) მაღალი მუშა ტემპერატურა და დიდი აკრძალული ზონა აქვს, ამის გამო მისგან დამზადებული p-n გასასვლელის გამოსხივების სიხშირე ხილული სპექტრის დიაპაზონშია, რის გამოც, ის შეუცვლელია შუქდიოდების დასამზადებლად, ხოლო რადიაციის და ტემპერატურის მიმართ მაღალი მდგრადობის გამო საუკეთესოა კოსმოსური სისტემების მზის ბატარეების დასამზადებლად.

ინდუმის ანთიმონიდი (ISb) შეუცვლელია ნახევრად გამტარული ფოტოელექტრული გენერატორების, მაცივრების და ინფრაწითელი გამოსხივების დეტექტორების დასამზადებლად. ეს უკანასკნელები ფართოდ გამოიყენებიან ტემპერატურის გამზომ ხელსაწყოებში.

ტექნიკის განვითარებამ ნახევრად გამტარი მასალების ელექტრული პარამეტრების და თვისებების მრავალფეროვნება მოითხოვა. ამის შესაძლებლობას ორ ნახევრად გამტარული შენაერთებს შორის მყარი ხსნარების წარმოქმნა იძლევა (ცხრ. 8-1).

უტყვათ ორი ნახევრად გამტარული შენაერთი AC და BC გვაქვს, თუ მყარ მდგომარეობაში მათ ერთნაირი კრისტალური სტრუქტურა და ელემენტალური უჯრედების ატომთშორის მანძილი მცირედით განსხვავებული აქვთ, ხოლო A და B იონების რადიუსები მიახლოებით

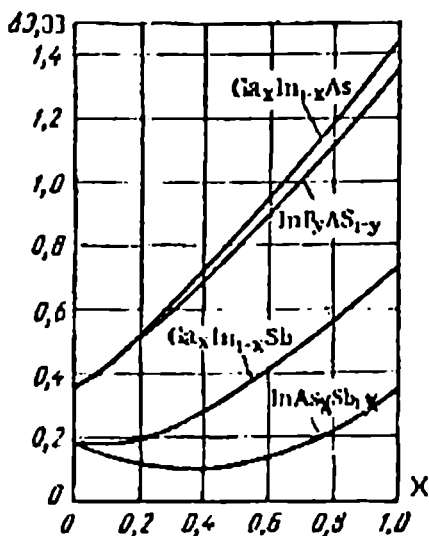
ერთნაირი, მაშინ მათი თხევად მდგომარეობაში ნებისმიერ კონცენტრაციით არევისას და შემდგომი გამყარებისას მიიღება სტრუქტურა, რომელშიაც თითქოს AC და BC შენაერთები ერთმანეთშია გახსნილი. ასეთი მყარი ხსნარების ზოგადი აღნიშვნაა $A_xB_{1-x}C$, სადაც, x არის AC კომპონენტის წილი შენაერთში.

მყარ ხსნარებში ელექტრული პარამეტრები, კერძოდ აკრძალული ზონის სიგანე კონცენტრაციის მიხედვით თითქმის სწორხაზოვნად იცვლება (ნახ. 8-18). ეს კი საშუალებას იძლევა წინასწარ განზრახული თვისებების

მქონე ნახევრად გამტარული მყარი ხსნარი მივიღოთ, მაგრამ მყარი ხსნარის კომპონენტებს შორის ქიმიური შენაერთის წარმოქმნისას აღნიშნული კანონზომიერება ნახტომისებურად ირღვევა.

ნახევრად გამტარული მყარი ხსნარების მიღების ტექნოლოგია გაცილებით რთულია ვიდრე სხვა სახის ნახევრადგამტარების.

იონური კავშირით წარმოქმნილი მეტალთა უანგეულები (Cu_2O , ZnO , TiO_2 , Ni_2O_3 , Fe_2O_3 და სხვა). შედარებით მაღალი ელექტროგამტარობით გამოირჩევიან ვიდრე კლასიკური ნახევრად გამტარები.



ნახ. 8-18. $A^{III}B^V$ ტიპის ნახევრად გამტარებში აკრძალული ზონის სიდიდის დამოკიდებულება კონცენტრაციაზე (X)

ამასთანავე მათი მიღების ტექნოლოგია გაცილებით მარტივია. ისინი ფართოდ გამოიყენებიან ფოტორეზისტორების, თერმორეზისტორების და ისეთი ხელსაწყოების

დასამსაღებლად, რომელთა წინააღმდეგობა ძლიერ დამოკიდებულია მომქმედი ძაბვის სიდიდეზე (ვარისტორები).

ორგანულ შენაერთებში ნახევრად გამტარული თვისებები 1906 წელს იქნა აღმოჩენილი, მაგრამ მათი გამოყენება უკანასკნელი 20-25 წლის წინ დაიწყო, რაც მათი სპეციალური თვისებებითაა განპირობებული. ორგანული ნახევრად გამტარები დარბილების ან დნობის დაბალი ტემპერატურის გამო შეიძლება გაცილებით სუფთა სახით მივიღოთ, ვიდრე ელემენტალური ნახევრად გამტარები, მათი თვისებები თითქმის არ არის დამოკიდებული ვიბრაციაზე და გარეშე მექანიკურ ზემოქმედებაზე.

მაგნიტური მასალები

მცირე აზიის უძველეს ქალაქ მაგნესას მახლობლად ნიადაგში მრავლად მოიპოვებოდა ქვის ნატეხები, რომლებიც ერთმანეთს მიიზიდავდნენ ან განიზიდავდნენ. ამ თვისებას მაგიურ ძალებს მიაწერდნენ და ქვები მრავალ ქვეყანაში გაჰქონდათ (ბერძ. *Magnetis litos* - ქვა მაგნეტიიდან). სახელი მაგნიტი ორი სხეულის მიერ შეუცნობადი ძალებით ურთიერთ მიზიდვას ან განიზიდვას აღნიშნავდა. მოგვიანებით ჩინელებმა მაგნიტისგან კომპასის დამზადება დაიწყეს.

დღეისათვის მაგნიტური მასალების რაოდენობა რამოდენიმე ათასს აღწევს. მათ გარეშე წარმოუდგენელია ელექტრული ენერჯის წარმოება, გადაცემა და განაწილება. მრავალრიცხოვანი ელექტრონული ხელსაწყოები მაგნიტური მასალების გარეშე უბრალოდ არ იარსებებენ. მაგნიტური მასალები შეუცვლელი არიან გენერატორების, ძალოვანი ტრანსფორმატორების, ელექტრონული მახსოვრობის ელემენტების, ელექტროგამზომი ხელსაწყოების და სხვა მრავალრიცხოვანი ელექტრონული მოწყობილობების დასამზადებლად.

§ 9-1 მაგნიტიზმის მოვლენა

მაგნიტურ მასალებს, ანუ მაგნეტიკებს ის ნივთიერებები მიეკუთვნებიან, რომლებიც მაგნიტური ველის მოქმედებით დამატებით მაგნიტურ მომენტს იძენენ. ამ თვალსაზრისით ყველა ნივთიერება მიუხედავად აგრეგატული მდგომარეობისა მაგნეტიკებს მიეკუთვნებიან, მაგრამ ზოგიერთ მასალაში ეს მოვლენა სუსტადაა გამოხატული ზოგში კი ძლიერ. პრაქტიკაში უმეტესად ამ

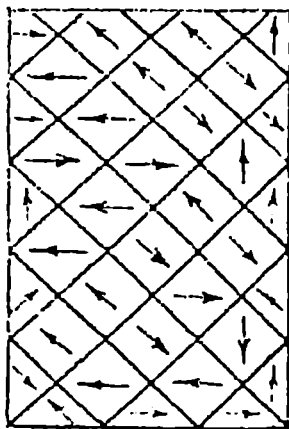
უკანასკნელს იყენებენ და ისინი მაგნიტურბილ, მაგნიტურსალ და სპეციალური დანიშნულების მაგნიტურ მასალებად იყოფიან.

მაგნიტური მასალები ძირითადად ოთხი დანიშნულებით გამოიყენებიან. ესენია: მაგნიტური ნაკადების წყაროები, მაგნიტური ნაკადების შემკრები სისტემები, მაგნიტური ნაკადების გამტარებად და მაგნიტური მახსოვრობის ელემენტები.

მაგნიტური ნაკადების შესაკრებად და გასატარებლად ძირითადად მაგნიტურბილი მასალები გამოიყენებიან, ხოლო მაგნიტური ნაკადების წყაროდ, გამზომი ხელსაწყოების, მახსოვრობის ელემენტების დასამზადებლად მაგნიტურსალ მასალებს იყენებენ.

ნებისმიერ ნივთიერებაში ატომგულის ირგვლივ ორბიტაზე მოძრავი ელექტრონი დენს წარმოქმნის, რომელსაც მაგნიტური მომენტი ახასიათებს. ასევე მაგნიტური მომენტი ახასიათებს ელექტრონის ბრუნვას საკუთარი ღერძის ირგვლივ, რომელსაც ელექტრონის სპინს უწოდებენ. პროტონებსა და ნეიტრონებსაც გააჩნიათ მაგნიტური მომენტი, მაგრამ მისი სიდიდე ელექტრონის მაგნიტურ მომენტთან შედარებით 1000-ჯერ ნაკლებია. ამის გამო ატომის მაგნიტურ თვისებებს მთლიანად ელექტრონები განსაზღვრავენ, კერძოდ, თუ რამდენი ელექტრონი მოძრაობს ატომგულის ირგვლივ და როგორია მათი სპინების მიმართულება, ემთხვევიან ერთმანეთს ან ეწინააღმდეგებიან, თუ ემთხვევიან, მაშინ ატომს გარკვეული სიდიდის მაგნიტური მომენტი აქვს, ხოლო თუ სპინები ეწინააღმდეგებიან ერთმანეთს, მაშინ ატომის მაგნიტური მომენტი ნულის ტოლია. ასევე მოსალოდნელია მეზობელი ატომების მაგნიტური მომენტების ერთი ან სხვადასხვა მიმართულებით ორიენტაცია, შესაბამისად მოლეკულის ან კრისტალის ელემენტალური უჯრედის მაგნიტური მომენტებიც ტოლია ან განსხვავებულია ნოლისგან.

შინაგანი ველის მოქმედებით ნივთიერების ძალიან მცირე მოცულობისათვის (ელემენტალური უჯრედისათვის) ენერგეტიკულად ხელსაყრელია ელექტრონების სპინების პარალელური ორიენტაცია, რის შედეგადაც მაგნიტური ველის მოქმედების გარეშე მოცულობა თავისთავად იძენს მცირე სიდიდის მაგნიტურ მომენტს. ასეთ მოცულობას მაგნიტურ დომენს უწოდებენ, მისი გეომეტრიული ზომები 10^{-7} მეტრიდან 10^{-4} მეტრამდე იცვლება, და ნივთიერების ქიმიურ შემადგენლობაზე და სტრუქტურაზეა დამოკიდებული, ხოლო დომენებს შორის ურთიერთქმედებას სითბური და დომენური ძალები განაპირობებენ.



ნახ. 9-1. დომენური სტრუქტურის სქემა

და მაგნიტურ მომენტს შეიძენს (μ) ე-ი დამაგნიტდება.

ნივთიერების ერთეული მოცულობის მიერ შექმნილი მაგნიტური მომენტის სიდიდეს დამაგნიტებულობა ეწოდება (I_a).

$$I_a = \frac{\mu}{V} \quad (9-1)$$

ეს სიდიდე გარეშე მაგნიტური ველის დაძაბულობასთან შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული:

$$I_a = k_a H \quad (9-2)$$

სადაც, k_a უგანზომილებო სიდიდეა, ახასიათებს მოცემული ნივთიერების უნარს დამაგნიტდეს გარეშე მაგნიტურ ველში და მას მაგნიტურ ამთვისებლობას უწოდებენ.

დამაგნიტებულ ნივთიერებას საკუთარი მაგნიტური ველი აქვს, რომელშიც ან ემთხვევა ან ეწინააღმდეგება გარეშე (აღმკერელი) მაგნიტური ველის მიმართულებას, ამიტომ ჯამური მაგნიტური ინდუქცია შინაგანი და გარეგანი ველების ინდუქციების ჯამს წარმოადენს.

$$B = B_0 + B_g = \mu_0 H + \mu_0 I_g \quad (9-3)$$

სადაც, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰნ/მ – მაგნიტური მუდმივია. (9-2) და (9-3) ფორმულებით შეგვიძლია დავწეროთ

$$B = \mu_0 H(1 + k_a) = \mu_0 \mu_r H \quad (9-4)$$

აქ $\mu_r = 1 + k_a$ – ფარდობით მაგნიტურ შეღწევადობას (ან მარტივად მაგნიტურ შეღწევადობას) უწოდებენ და გვიჩვენებს, თუ მოცემულ მასალაში მაგნიტური ველის ინდუქცია რამდენჯერ მეტია ვაკუუმთან შედარებით.

§ 9-2 ნივთიერებათა კლასიფიკაცია მაგნიტური თვისებების მიხედვით

გარეშე მაგნიტური ველის ზემოქმედებაზე ნივთიერებები სხვადასხვა გვარად რეაგირებენ. ამ რეაგირების მიხედვით ისინი ხუთ ჯგუფად იყოფიან და შესაბამისად მაგნეტიზმის მოვლენის ხუთი სახე არსებობს.

1. *დიამაგნეტიკებს* ისეთი ნივთიერებები მიეკუთვნებიან, რომლებსაც მაგნიტური ამთვისებლობა უარყოფითი აქვთ ($K < 0$) და არ არის დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური ველის სიდიდეზე, ე.ი. მათში აღძრული მაგნიტური ველის მიმართულება გარეშე მაგნიტური ველის მიმართულებას ეწინააღმდეგება, ამიტომ

არაერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებისას დია-
მაგნეტიკები გარეთ გამოიტყორცნებიან.

დიამაგნიზმის მოვლენა მაგნიტურ ველში ატომის
ელექტრონის ორბიტალური სინქარის კუთხური
მდგენელის უმნიშვნელო ცვლილებითაა განპირობებული.
ამის გამო ის ყველა ნივთიერებაში გეხედება ე.ი. წარ-
მოადგენს მაგნიტიზმის მოვლენის უნივერსალურ სახეს,
მაგრამ უმეტეს ნივთიერებაში ის მაგნიტიზმის უფრო
მძლავრი მოვლენებითაა გადაფარული.

დიამაგნეტიკებს მიეკუთვნებიან: ყველა ინერტული
აირები, წყალბადი, აზოტი, წყალი, და ნავთობპროდუ-
ქტები, ზოგიერთი ლითონი: სპილენძი, ცინკი, ოქრო, ვერ-
ცხლი, უმეტესი ნახევრად გამტარები, იონური და კოვა-
ლენტური კავშირით წარმოქმნილი ნივთიერებები და სხვა.
დიამაგნეტიკებს მაგნიტური ამთვისებლობა ძალიან მცი-
რეა, ხოლო მაგნიტური შეღწევადობა უმნიშვნელოდ
ნაკლებია ერთზე ($\mu_r < 1$) და რადგან დიამაგნეტიზმი
ატომში მიმდინარე მოვლენებითაა განპირობებული, ამი-
ტომ μ_r და k_g ფაქტიურად არ არის დამოკიდებული
ტემპერატურაზე.

დიამაგნეტიზმის მოვლენა თავისი ხასიათით დი-
ელექტრიკის ელექტრონულ პოლარიზაციას გვაგონებს.

2. *პარამაგნეტიკებს* ის ნივთიერებები მიე-
კუთვნება, რომელთა მაგნიტური ამთვისებლობა დადებ-
ითია და არ არის დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური
ველის სიდიდეზე. ამ ნივთიერებებში ატომებს ველის მო-
ქმედებამდეც მცირე სიდიდის მაგნიტური მომენტი აქვთ,
მაგრამ სითბური მოძრაობის ქაოსურობის გამო ისინი
სხვადასხვა მიმართულების არიან და ჯამური მაგნიტური
მომენტი ნულის ტოლია. გარეშე ველი ამ მომენტებს
ერთი მიმართულებით მიმართავს, მაგრამ ატომების სით-
ბური ენერგია ამ პროცესს ეწინააღმდეგება. ამიტომ პა-
რამაგნეტიზმის მოვლენა ძლიერად არის დამოკიდებული
ტემპერატურაზე.

პარამაგნეტიკებში მაგნიტური ამთვისებლობა ძალიან მცირეა $k_{\mu} = 10^{-3} \div 10^{-6}$ შესაბამისად μ , უმნიშვნელოდ მეტია ერთზე და რადგან ამ ნივთიერებაში აღძრული მაგნიტური ველი ემთხვევა გარეშე ველის მიმართულებას, ამიტომ, თუ პარამაგნეტიკებს არაერთგავროვან მაგნიტურ ველში მოვათავსებთ, მაშინ ისინი ველში მიიზიდებიან.

პარამაგნეტიკულ ნივთიერებებს: უანგბადი, აზოტის უანგი, ტუტეწარმოქმნილი ლითონები, მათი მარილები, უანგეულები და სხვა მასალები მიეკუთვნებიან.

პარამაგნეტიზმის მოვლენის მიმდინარეობა თავისი მექანიზმით დიელექტრიკების დიპოლურ-რელაქსაციურ პოლარიზაციას ემსგავსება.

3. *ფერომაგნეტიკებს* ის ნივთიერებები მიეკუთვნებიან, რომლებსაც მაგნიტური ამთვისებლობის დიდი მნიშვნელობა აქვს. ის ძლიერ არის დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური ველის სიდიდეზე და ტემპერატურაზე. ასეთი მასალებია: რკინა, კობალტი, ნიკელი, იშვიათი მიწათა ლითონები და მათი შენადნობები. ამ ნივთიერებებში ველის მოქმედებამდე არსებობს პარალელურად ორინტირებული მაგნიტური დომენები, რომლებიც სუსტი მაგნიტური ველის მოქმედებითაც კი ველის მიმართულებით გაჯერებამდე ორიენტირდებიან და ძლიერ მაგნიტურ ველს წარმოქმნიან.

4. *ანტიფერომაგნეტიკებს* ის ნივთიერებები მიეკუთვნება, რომლებშიც რაღაც კრიტიკულ ტემპერატურამდე დომენების მაგნიტური მომენტები სპონტალურად (თავისთავად) ანტიპარალელურ მიმართულებას იღებენ რის გამოც ჯამური დამაგნიტებულება ნულის ტოლია. ასეთ მასალებში მაგნიტური ამთვისებლობა დადებითია, მაგრამ მცირე სიდიდისაა და ძლიერად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე, ანტიფერომაგნეტიკებს მარგანეცი, ქრომი, იშვიათ მიწათა ლითონები და მათი უანგეულები მიეკუთვნებიან.

ფერომაგნეტიზმის და ანტიფერომაგნეტიზმის მიმდინარეობა თავისი ბუნებით სენსეტოლიელექტრიკების პოლარიზაციას წააგავს.

5. *ფერიმაგნეტიკებს* ის ნივთიერებები მიეკუთვნებიან, რომლებშიც არაკომპენსირებული ანტიფერომაგნეტიზმი არსებობს. მსგავსად ფერომაგნეტიკებისა, მათაც მაგნიტური შეღწევადობის დიდი მნიშვნელობა და ძლიერ დამოკიდებულება გარეშე მაგნიტურ ველზე და ტემპერატურაზე ახასიათებთ.

ფერიმაგნეტიკებს რთული ქიმიური შენაერთები და შენადნობები მიეკუთვნება, რომლებშიც უმეტესად რკინა, კობალტი ან ნიკელი შედის. ამ სახის მასალებიდან პრაქტიკაში გამოყენება სხვადასხვა ტიპის ფერიტებს აქვთ.

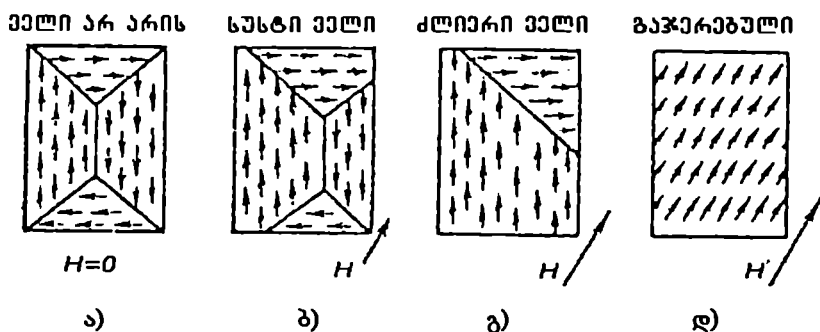
დიამაგნიტურ და პარამაგნიტურ ნივთიერებებში მაგნიტური თვისებები სუსტად არის გამოხატული და გარეშე ფაქტორებით თითქმის უმართავია. ამიტომ მათ სუსტ მაგნიტურ მასალებს უწოდებენ და პრაქტიკაში იშვიათად გამოიყენებიან, ხოლო ფერომაგნეტიკებს, ანტიფერომაგნეტიკებს და ფერიმაგნეტიკებს, ძლიერი მაგნიტური თვისებები აქვთ, მათ ძლიერ მაგნიტურ მასალებს ან მარტივად მაგნიტურ მასალებს უწოდებენ.

§ 9-3 დამაგნიტების პროცესი

თუ მაგნიტურ მასალაზე გარეშე მაგნიტური ველი არ მოქმედებს მაშინ დომენების მაგნიტური მომენტები ქაოსურად არიან ორიენტირებულნი და ჯამური ინდუქცია ნულის ტოლია (ნახ. 9-2ა).

გარეშე სუსტი მაგნიტური ველის მოქმედების შემთხვევაში (ნახ. 9-2ბ) დომენების მცირე ნაწილი ველის გასწვრივ ორიენტირდება და H – ის გაზრდით ინდუქცია სწრაფად იზრდება (ნახ. 9-3, OA უბანი).

ძლიერი ველისას დომენებს შორის ურთიერთქმედების ძალები ირღვევა. დომენების უმეტესობა გარეშე ველის მიმართ რაღაც კუთხითაა ორიენტირებული (ნახ. 9-2ბ) და ინდუქცია მაქსიმუმს უახლოვდება (ნახ. 9-3 A წერტილი). თუ H კიდევ გაიზრდება, მაშინ ყველა დომენი ორიენტირებული იქნება ველის გასწვრივ (ნახ. 9-2დ) და B -ს მაქსიმალური (B_{max}) მნიშვნელობა აქვს (ნახ. 9-3 C წერტილი). H - ის შემდგომი გაზრდით B არ იზრდება, რადგან ყველა დომენი ველის გასწვრივაა ორიენტირებული ე.ი. ადგილი აქვს გაჯერების მოვლენას.

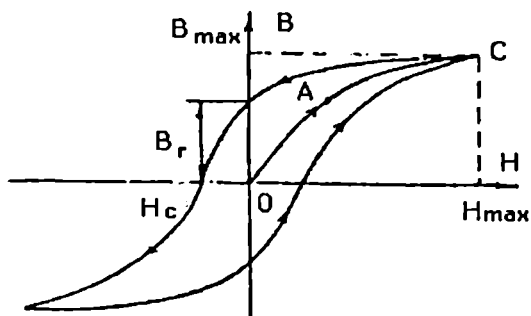


ნახ. 9-2. დამაგნიტების პროცესში დომენების მაგნიტური მომენტების ორიენტაციის სქემა

H - ის შემცირებით $B=f(H)$ დამოკიდებულების მრუდი OAC მრუდს კი არ მიყვება არამედ ზემოთ გაივლის და როდესაც $H=0$, მაშინ B -ს, B_r მნიშვნელობა აქვს. ეს გამოწვეულია იმით, რომ დომენების მიღებული ორიენტაციის დაშლას სითბური და დომენტშორის ურთიერთქმედების ძალები ეწინააღმდეგებიან. ამ ძალების დასაძლევად საჭიროა მაგნიტური ველის მიმართულების შეცვლა და როდესაც მისი სიდიდე H_c -ს გაუტოლდება, მაშინ $B=0$.

ველის დაძაბულობის შემდგომ გაზრდას გაჯერებამდე მიყვავართ H - ის უარყოფითი მნიშვნელობით

და საბოლოოდ $B=f(H)$ დამოკიდებულების მრუდს ჰისტერეზისის (ჩამორჩენის) მარყუჟის ფორმა აქვს. რადგან $B=f(H)$ დამოკიდებულების მრუდს H -ს მატების ან კლების შემთხვევაში გარკვეული ჩამორჩენა ახასიათებს.



ნახ. 9-3. მაგნიტური ჰისტერეზისის მარყუჟი

ზემოთ მოყვანილ სიდიდეებს H_{max} , B_{max} , H_c და B_r პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს და თითოეული მასალისათვის მახასიათებელი სიდიდეებია. კერძოდ, B_r მნიშვნელობას, როდესაც $H=0$ ნარჩენ ინდუქციას უწოდებენ, ხოლო H_c რომელიც საჭიროა საწინააღმდეგო მიმართულებით მოვდოთ მასალაზე, რომ ინდუქცია ნულის ტოლი გახდეს, დამაკავებელ ანუ კოპერციულ ძალას უწოდებენ.

როგორც ვხედავთ $B=f(H)$ დამოკიდებულების მრუდს სწორხაზოვანი ფორმა არ აქვს, ამიტომ მაგნიტურ შეღწევადობას დამაგნიტების მრუდის სხვადასხვა უბანზე სხვადასხვა მნიშვნელობა ექნება. თუ გარეშე მაგნიტური ველის დაძაბულობა ძალიან მცირეა ($H=0,1$ ა/მ), ანუ დამაგნიტების პროცესის საწყის ეტაპზე განვსაზღვრავთ მაგნიტურ შეღწევადობას, მაშინ მას საწყის მაგნიტურ შეღწევადობას (μ) უწოდებენ, ხოლო მაგნიტური შეღწევადობის ის უდიდესი მნიშვნელობა, რომელიც მოცე-

მულ მასალაში მიიღწევა მაქსიმალური მაგნიტური შეღწევადობა ($\mu_{აჟ}$).

ცვლადი მაგნიტური ველების მოქმედებისას მნიშვნელოვანი პარამეტრია დინამიური მაგნიტური შეღწევადობა (μ_{-}), რომელიც მაგნიტური ინდუქციის ამპლიტოდური მნიშვნელობის ($B_{ა}$) გარეშე მაგნიტური ველის ამპლიტუდის სიდიდესთან ($H_{ა}$) შეფარდებაა

$$\mu_{-} = \frac{B_{ა}}{H_{ა}} \quad (9-5)$$

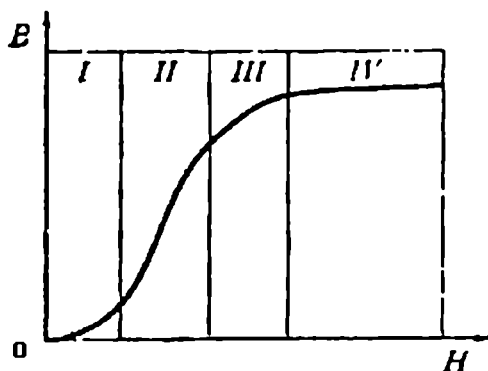
ჰისტერეზისი მარყუჟის OC მონაკვეთს (ნახ. 9-3) დამაგნიტების ძირითად მრუდს უწოდებენ. მისი სხვადასხვა ნაწილი დამაგნიტების პროცესის სხვადასხვა ფიზიკურ მექანიზმს ასახავს, კერძოდ სუსტი ველების უბანზე (ნახ. 9-4 I მონაკვეთი) მაგნიტური შეღწევადობა არ იცვლება, ხოლო მაგნიტური ინდუქციის გაზრდა შექცევადი პროცესით – დომენტშორის საზღვრების ზრდითაა განპირობებული, მეორე მონაკვეთი დომენტების გაერთიანების შეუქცევად პროცესს შეესაბამება. მესამე მონაკვეთზე, რომელიც გაჯერებას უახლოვდება, მაგნიტური ინდუქციის გაზრდა დომენტების ინდუქციის ექტორის მომქმედი მაგნიტური ველის გასწვრივ ორიენტაციით აიხსნება. ამ უბნის დასასრული ტექნიკურ გაჯერებას შეესაბამება. ბოლო მეოთხე უბანზე ინდუქციის სუსტი ზრდა ძლიერი ველის მოქმედებით დომენტების დამაგნიტებულობის ზრდითაა გამოწვეული.

დამაგნიტების პროცესში მასალის გეომეტრიული ზომები მცირედ იცვლება, რასაც მაგნიტოსტრიქციას უწოდებენ. ეს მოვლენა დომენტშორისი საზღვრების ცვლილებისას, ატომთშორის მანძილების უმნიშვნელო ცვლილებითაა გამოწვეული.

მაგნიტოსტრიქცია შეიძლება იყოს მოცულობითი ან ხაზოვანი. პირველ შემთხვევაში მოცულობა იცვლება, ხოლო მეორე შემთხვევაში ერთერთი განზომილება. ასევე მაგნიტოსტრიქცია შეიძლება იყოს დადებითი – ზომები

იზრდება ან უარყოფითი, როდესაც გეომეტრიული ზომები მცირდება.

ცვლად მაგნიტურ ველში დამაგნიტების პროცესს, დომენური სტრუქტურის შეცვლას, მაგნიტოსტრიქციას და სხვა მოვლენებს გარკვეული ენერგია სჭირდება, რომელსაც გარეშე მაგნიტური ველი გასცემს და ეს ენერგია მაგნიტურ მასალაში სითბოს სახით გამოიყოფა. ამ მოვლენას *მაგნიტურ დანაკარგებს* უწოდებენ.



ნახ. 9-4. მაგნიტური მასალების დამაგნიტების ძირითადი მრუდი

ანსხვაევენ მაგნიტურ დანაკარგებს პისტერეზისზე და დინამიურ პროცესებზე. პირველი განპირობებულია მაგნიტურ დომენებში შეუქცევადი პროცესებით, პისტირეზისის მარყუჟის ფორმით და დანაკარგების სიმძლავრე შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

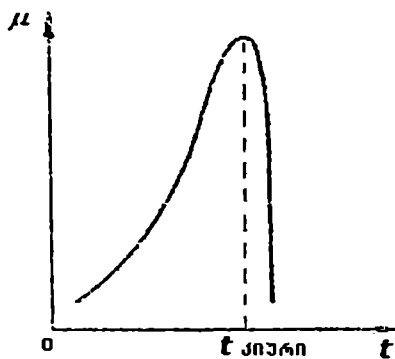
$$P_{\text{ფ}} = \eta \cdot B_{\text{მაქ}}^n \cdot f \cdot V , \quad (9-6)$$

სადაც η - მასალის თვისებებით განპირობებული სიდიდეა; $B_{\text{მაქ}}$ - მაქსიმალური ინდუქცია; $n=1,6 \div 2,0$ და მასალის მიღების ტექნოლოგიის მახასიათებელი კოეფიციენტი, f - გარეშე მაგნიტური ველის სიხშირე, ხოლო V - მასალის მოცულობაა. პისტირეზისზე დანაკარგები მნიშვნელოვანია ძლიერი მაგნიტური ველების შემთხვევაში.

სუსტი ველებისას მნიშვნელოვანია დინამიური დანაკარგები, რომლებიც მაგნიტურ მასალაში გარეშე მაგნიტური ველის მიერ ინდუცირებული გრიგალური დენებითაა გამოწვეული. ეს დენები კი მაგნიტური მასალის ელექტრული წინააღმდეგობითაა განპირობებული და მისი გადიდებით გრიგალური დენები მცირდება, ამიტომ დაბალსიხშირულ ელექტრული აპრატების მაგნიტურ სისტემას დანაკარგების შემცირების მიზნით ერთმანეთისაგან იზოლირებული თხელფურცლოვანი მასალისგან ამზადებენ.

§ 9-4 მაგნიტიზმის მოვლენის დამოკიდებულება გარეშე ფაქტორებზე

მაგნიტურ მასალებში მიმდინარე ყველა პროცესი მეტნაკლებად დამოკიდებულია ქიმიურ შემადგენლობაზე, სტრუქტურაზე, ტემპერატურაზე, გარეშე ველის სიხშირეზე, მექანიკურ ზემოქმედებაზე და სხვა მრავალ ფაქტორებზე.



ნახ. 9-5 მაგნიტური შეღწევადობის ტიპური დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

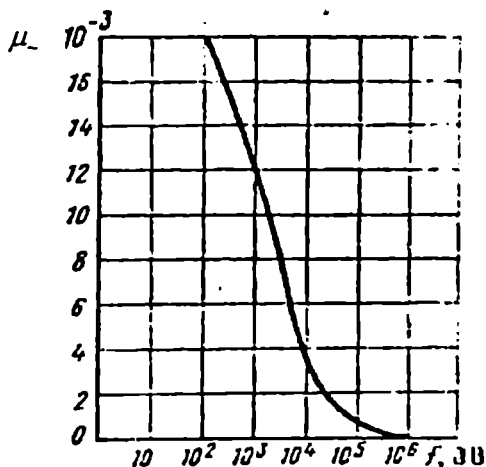
მაგნიტური დომენების ურთიერთქმედების ძალები გარკვეულ წილად დამოკიდებულია ატომების სითბურ ენერჯიაზე, რომლის გაზრდით ურთიერთქმედების ძალა მცირდება, შესაბამისად ადვილია დომენების ველის გასწვრივ ორიენტირება ე.ი. იზრდება მაგნიტური შეღწევადობა, მაგრამ გარკვეული ტემპერატურის (t_c) შემდეგ იმ-

ვრივ ორიენტირება ე.ი. იზრდება მაგნიტური შეღწევადობა, მაგრამ გარკვეული ტემპერატურის (t_c) შემდეგ იმ-

დენად დიდია ატომის სითბური ენერგია, რომ დომენური სტრუქტურა ირღვევა და მასალა მაგნიტურ თვისებებს კარგავს. ე.ი. μ - ს დამოკიდებულების მრუდს ტემპერატურაზე მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმი (ნახ. 9-5) გააჩნია. t_j - ს კიურის ტემპერატურას უწოდებენ. სუფთა რკინისათვის $t_j=768^{\circ}\text{C}$, კობალტისათვის $t=1131^{\circ}\text{C}$, ხოლო ნიკელისათვის კი 358°C . პრაქტიკაში ტემპერატურის იმ დიაპაზონს ირჩევენ, სადაც μ სუსტადაა დამოკიდებული t - ზე, ან დამოკიდებულების ტემპერატურულ კოეფიციენტს ითვალისწინებენ.

დომენების გაფართოება ან ორინტაცია ველის გასწვრივ დროის განმავლობაში მიმდინარეობს, თუ ეს დრო ნაკლებია გარეშე მაგნიტური ველის ცვლილების დროზე მაშინ დომენები ადვილად ახერხებდნენ ორიენტაციას, ხოლო თუ მეტია მაშინ დომენების ორიენტაცია გაძნელებულია, ამის გამო მაგნიტური შეღწევადობა ძლიერად არის დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური ველის სიხშირეზე (ნახ. 9-6). მაღალ სიხშირეებზე ზოგიერთ მასალებში დამაგნიტების პროცესი თითქმის არ მიმდინარეობს.

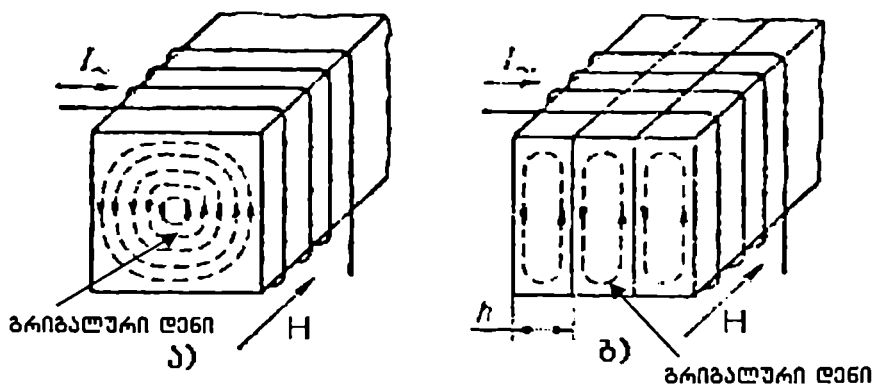
ჯოულ-ლენცის კანონის თანახმად ცვლად მაგნიტურ ველში მყოფ სხეულში ინდუქციის ელექტრომომძრავებელი ძალა აღიძვრება, რომელიც ამავე სხეულში



ნახ. 9-6. პერმალლის დინამიური მაგნიტური შეღწევადობის დამოკიდებულება სიხშირეზე სუსტ ველში ($H=0,8\text{A/მ}$)

გრიგალურ დენებს წარმოშობს (ნახ. 9-7, ა). როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ეს დენები დანაკარგებს განაპირობებს.

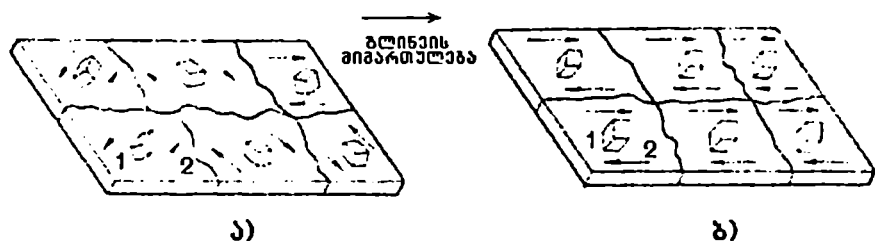
გრიგალური დენებით გამოწვეული დანაკარგების შემცირების მიზნით მაგნიტურ გულარას დიდი ელექტრული წინააღმდეგობის მქონე მაგნიტური მასალისგან ამზადებენ, ან მაგნიტურ გულარას ერთმანეთისგან ელექტრულად იზოლირებული თხელი ფირფიტებისაგან ქმნიან. (ნახ. 9-7 ბ). ასეთი ფურცლები ტრადიციულად გლინვის საშუალებით მიიღება. აღმოჩნდა, რომ გლინვისას მასალის ელემენტალური უჯრედები ერთი მიმართულებით ორიენტირდებიან.



ნახ. 9-7 ფერომაგნიტურ გულარაში გრიგალური დენების განაწილება.
 ა - მთლიანი და ბ- ფურცლოვანი გულარა

სილიციუმისანი ფოლადის ელემენტალური უჯრედი მოცულობაცენტრირებულ კუბს წარმოადგენს, რომლის ადვილადდამაგნიტების მიმართულება წახნაგების მიმართულებას ემთხვევა, ხოლო ძნელადდასამაგნიტებელია დიაგონალთა გასწვრივ. ფურცლოვანი ფოლადის მაღალ ტემპერატურაზე გლინვისას (ცხლად გლინვა) ელემენტალური უჯრედის დიაგონალი გლინვის მიმართულებას ემთხვეოდა (ნახ. 9-8 ა), ამის გამო მას სუსტი მაგნიტური თვისებები აღმოაჩნდა. ცივად გლინვის შემთხვევაში ელემენტალური უჯრედების წახნაგებმა

ველის გასწორივ ორიენტაცია მიიღო (ნახ. 9-8, ბ), რამაც მაგნიტური თვისებები საგრძნობლად გააუმჯობესა.



(ნახ. 9-8) ელემენტალური უჯრედების (1) და დომენების ორიენტაცია ფოლადში. ა - ცხლად და ბ - ცივად ნაგლინი

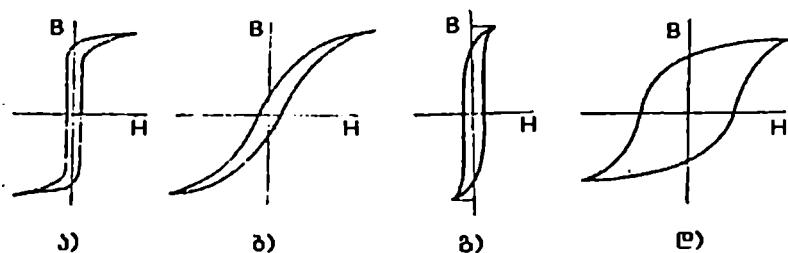
მიღების ტექნოლოგიით წარმოქმნილი მექანიკური დაძაბულობები და გარეშე მექანიკური ზემოქმედება (ძლიერად დაწნეხილი მაგნიტოგამტარი) დომენების ორიენტაციას აფერხებს, თვისებები მცირდება. ეს ფაქტორი მნიშვნელოვანია მაღალი მაგნიტოსტრიქციის მქონე მასალებში. წარმოქმნილი მექანიკური დაძაბულობების შესამცირებლად და თვისებების სტაბილიზაციის მიზნით მაგნიტურ მასალებს თერმულ დამუშავებას უტარებენ.

ქიმიური შემადგენლობა მასალის მაგნიტურ თვისებებს, დომენურ სტრუქტურას და ელემენტალური უჯრედის მაგნიტურ მომენტს განსაზღვრავს. საკმარისია ქიმიური შემადგენლობის უმნიშვნელო ცვლილება, რომ მაგნიტური მახასიათებლები საგრძნობლად შეიცვალოს.

§ 9-5 მაგნიტური მასალების კლასიფიკაცია

დამაგნიტების პროცესის მიმდინარეობის მიხედვით მაგნიტური მასალები მაგნიტურრბილ, მაგნიტურსაღ და სპეციალური დანიშნულების მასალებად იყოფიან. ეს ტერმინი მათ მექანიკურ თვისებებს კი არა, არამედ მათში დამაგნიტების პროცესის მიმდინარეობას ახასიათებს.

კერძოდ: მაგნიტურბილ მასალებში დამაგნიტებისას მაგნიტური დომენების საზღვრების გაერთიანება ადვილად ხდება და გარეშე მაგნიტური ველის დაძაბულობის გაზრდით სწრაფად მიმდინარეობს. ამის გამო მათი ჰისტირეზისის მარყუუს გაცილებით ნაკლები ფართობი აქვს (ნახ. 9-9 ა, ბ და გ), ვიდრე მაგნიტსაღ მასალებს. შესაბამისად კოჰერციული ძალაც ნაკლებია. მაგალითად, თუ მაგნიტურბილი მასალებისათვის კოჰერციული ძალის უმცირესი მნიშვნელობა $H_c=0,4\text{ა/მ}$ - ია მაგნიტურსაღი მასალებისათვის $H_c=800000\text{ა/მ}$ - ს აღწევს.



ნახ. 9-9. ჰისტირეზისის მარყუევი. ა,ბ - მაგნიტურბილი მასალები მომრგვალებული მარყუევით, გ - მაგნიტურბილი მასალები სწორკუთხა მარყუევით და დ - მაგნიტურსაღი მასალები

მაგნიტურსაღ მასალებში დამაგნიტების პროცესი დომენების ორიენტაციით მიმდინარეობს და მათი ჰისტირეზისის მარყუევის ფართობი გაცილებით მეტია (ნახ. 9-9 დ). რაც შეეხება სპეციალური დანიშნულების მაგნიტურ მასალებს მათი გამოყენებისას მნიშვნელობა ერთ რომელიმე თვისებას ექცევა.

მაგნიტურ მასალებს რომლებსაც ჰისტირეზისის მარყუევის მომრგვალებული ფორმა აქვს (ნახ 9-9 - ბ,გ) დაბალსიხშირულ ველებში იყენებენ, ხოლო ის მაგნიტურბილი მასალები, რომლებიც ჰისტერიზაციის მარყუევის სწორკუთხა ფორმით გამოირჩევიან (ნახ. 9-9 - ა) სხვადასხვა სახის მახსოვრობის ელემენტების დასამზადებლად გამოიყენებიან. მათ კოჰერციული ძალის

მკირე მნიშვნელობა ($H_c < 800 \text{ ა/მ}$) გააჩნიათ, ამიტომ ისინი სუსტ მაგნიტურ ველებში გაჯერებამდე მაგნიტდებიან.

მაგნიტურსაღ მასალებს კოჰერციული ძალის დიდი სიდიდე ახასიათებთ ($H_c > 4000 \text{ ა/მ}$), გააჩნიათ ქისტირეზისის მარყუეის დიდი ფართობი (ნახ. 9-9 - დ), ძნელად მაგნიტდებიან, მაგრამ დამაგნიტებულ მდგომარეობას დიდხანს ინარჩუნებენ (30-40 წელი), ამიტომ ისინი სხვადასხვა დანიშნულების მუდმივი მაგნიტების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

§ 9-6 მაგნიტურრბილი მასალები

დანაკარგები მაგნიტურ მასალებში ძლიერად არის დამოკიდებული სიხშირეზე, ამიტომ მაგნიტურრბილი მასალები დაბალსიხშირულ და მაღალსიხშირულ მასალებად იყოფიან. ორივე შემთხვევაში მაგნიტოგამტარი ან დიდი ელექტრული წინააღმდეგობის მქონე მასალებისგან ან ერთმანეთისგან იზოლირებული თხელი ფურცლების საშუალებით მზადდება.

დაბალსიხშირულ მაგნიტურრბილ მასალებს, როგორც წესი რკინა და მისი შენადნობები მიეკუთვნებიან. როგორებიცაა: ტექნიკურად სუფთა, ელექტროლიტური და კარბოლინური რკინა. დაბალნახშირბადიანი ელექტროტექნიკური ფოლადი, კაუბადინი, ელექტროტექნიკური ფოლადი, პერმალლი (რკინა ნიკელის შენადნობი) და სხვა. მათი მაქსიმალური მუშა სიხშირე რამოდენიმე კილოჰერცს არ აღემატება.

მაგნიტოგამტარის ერთიანი სისტემის შექმნის და შევსების კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით ისინი იწნეხებიან, ამიტომ მათი მაგნიტური თვისებები პრაქტიკულად დამოკიდებული არ არის მექანიკურ ზემოქმედებაზე.

ტექნიკურად სუფთა რკინა ანუ სუფთა რკინა 0,05% მინარევებს შეიცავს, გააჩნია გაჯერების ინდუ-

ქციის დიდი მნიშვნელობა და ძალიან მცირე ელექტროწინააღმდეგობა (ცხრ. 8-1), ადვილად მუშავდება. გარეშე ზემოქმედებით თვისებებს არ იცვლის, მაგრამ მცირე ელექტროწინააღმდეგობის გამო ძირითადად ფერომაგნიტური შენადნობების მისაღებად გამოიყენება.

მაგნიტურბილი მასალების ძირითადი პარამეტრები
ცხრილი №9-1

დასახელება	მაგნიტური შეღწევადობა		კომპერციული ძალა Hc, [ა/მ]	კუთრი წინააღმდეგობა ρ, [ომი.მ]
	μ ₀	μ _{max}		
რკინა:	250	4500	40-100	1·10 ⁻⁷
ტექნიკური	200-	3000-8000	10-65	6·10 ⁻⁷
ელ. ტექნიკური	600	21000	6,4	3·10 ⁻⁷
კარბოლინური	3300	3500-4600	90	1·10 ⁻⁷
ფოლადი	200			
პერმალოი:				
მცირე ნიკელიანი	3000	60000	5-32	9·10 ⁻⁷
მაღალ ნიკელიანი	100000	300000	0,65-4	8·10 ⁻⁷

ელექტროლიტური რკინა FeSO₄ და FeCl₂ ელექტროლიზით მიიღება. კათოდზე გამოყოფილი სუფთა ელექტროტექნიკურ რკინას ვაკუუმურ დნობას და თერმულა დამუშავებას უტარებენ. რის შედეგადაც საუკეთესო მაგნიტური თვისებების მქონე მასალა მიიღება, მაგრამ მაღალი ღირებულების გამო ის იშვიათად გამოიყენება.

კარბოლინური რკინა რკინის კარბონატის [Fe(CO)₅] დაშლით მიიღება, მიღებული მასალა ძლიერ ფოროვანია, მაგრამ საუკეთესო თვისებებით გამოირჩევა. მას უმეტესად მაგნიტო დიელექტრიკების დასამზადებლად იყენებენ.

რკინის მაგნიტური თვისებები საგრძნობლად უმჯობესდება მასში მინარევების შედნობით. ამ მიზნით ელექტროტექნიკურ რკინას ძირითადად კაჟბადს უმატებენ, რის შედეგადაც კაჟბადიანი ელექტროტექნიკური

ფოლადი მიიღება, რომელიც რკინაში კაუბადის მყარ ხსნარს წარმოადგენს.

დაბალნახშირბადიან ფოლადში კაუბადის დამატებით ელექტრული წინააღმდეგობა იზრდება, შედეგად საგრძნობლად მცირდება დანაკარგები გრიგალურ დენებზე. კაუბადი რეაქციაში ელექტროტექნიკურ ფოლადში მყოფ უანგბადთან შედის, რის შედეგად კოჰერცული ძალა მცირდება და იზრდება მაგნიტური განვლადობა, მაგრამ თუ კაუბადის რაოდენობა 5% - ს აღემატება, მაშინ მექანიკური თვისებები საგრძნობლად უარესდება, ამიტომ ელექტროტექნიკურ ფოლადში კაუბადის შემცველობა 4,8% - მდეა.

კაუბადიანი ელექტროტექნიკური ფოლადის ცივად გლინვის შედეგად ადვილად დამაგნიტებადი მაგნიტური სტრუქტურა (ტექსტურა) წარმოიქმნება (ნახ. 9-8). რის შედეგად მაგნიტური თვისებები 40% - ით უმჯობესდება. ასეთი ფოლადი ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა სახის ძალოვანი ტრანსფორმატორების მაგნიტოგამტარების დასამზადებლად.

პერმალოები რკინის ნიკელთან (Fe - Ni) ან რკინის ნიკელთან და კობალტთან (Fe - Ni - CO) შენადნობებს წარმოადგენს. თვისებების გაუმჯობესების მიზნით მათ მცირე რაოდენობით მოლიბდენს ან ქრომს უმატებენ. თუ პერმალოიში ნიკელის რაოდენობა 50% - ზე ნაკლებია, მაშინ მას დაბალნიკელიან პერმალოის უწოდებენ, ხოლო მაღალნიკელიან პერმალოიში ნიკელის შემცველობა 80% - ს აღწევს. პერმალოები როგორც წესი მძლავრი მაგნიტური სისტემების შესაქმნელად გამოიყენებიან.

გადამაგნიტების სიხშირის გაზრდით მაგნიტობილ შენადნობებში დანაკარგები გრიგალურ დენებზე ძლიერ იზრდება, ამის გამო მათი მაღალ სიხშირეებზე გამოყენება არაეფექტურია, მაგრამ მაგნიტური ინდუქციის შემცირებით და კუთრი ელექტროწინააღმდეგობის გაზრდით დანაკარგები მცირდება. ასეთი თვისებები

არამეტალურ მაგნიტურ მასალებს აღმოაჩნდათ, როგორც ბიცაა: მაგნიტურბილი ფერიტები და მაგნიტოდი-ელექტრიკები.

მაგნიტურბილი ფერიტები კერამიკული მასალებია. ისინი რკინის ჟანგის (Fe_2O_3)-ის მეტალთა ჟანგეულებთან შეცხოვრებით მიიღებიან. ხასიათდებიან კუთრი წინააღმდეგობის დიდი მნიშვნელობით (10^{14} ომი.მ) და მცირე ინდუქციით. მცირე საწყისი მაგნიტური შეღწევადობით ($\mu = 20 \div 50$), ხოლო მაქსიმალური მაგნი-

ტური შეღწევადობა ($\mu_{\text{max}} = 3500$) აღწევს, გააჩნიათ მცირე დანაკარგები მაღალ სიხშირეებზე ($f = 10^8$ ჰერცი). გამოიყენებიან სხვადასხვა სახის მაღალსიხშირული მაგნიტოგამტარების დასამზადებლად.

მაგნიტოდიელექტრიკები მაგნიტურბილ მასალების ფხვნილების და ორგანული წებოების ნარევეს წარმოადგენს. მაგნიტურ თვისებებს - მაგნიტური ნაწილაკები განაპირობს, ხოლო წებო ამ ნაწილაკების ერთმანეთთან მექანიკურად აკავშირებს და მათ შორის ელექტრულ იზოლაციასაც ქმნის. ისინი მაღალი ელექტრული წინააღმდეგობით ($\rho = 10^{14}$ ომი.მ) და მაგნიტური თვისებების სტაბილურობით ხასიათდებიან. რაც მთავარია ადვილად მისაღები და მცირე ღირებულების არიან.

§ 9-7 მაგნიტურ სალი მასალები

მაგნიტურსალი მასალები სხვადასხვა სახის მუდმივი მაგნიტების, ინფორმაციის ჩაწერისა და შენახვის მოწყობილობების დასამზადებლად გამოიყენებიან (ბგერითი, ციფრული, ვიდეო და სხვა).

მათი ძირითადი მახასიათებელია კოჰერცული ძალის (H_c) და გაცემული მაქსიმალური კუთრი ენერჯის (W_{max}) დიდი მნიშვნელობები, მცირე სიდიდის მაგნიტური შეღწევადობა და ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციის სტაბილურობა დროის მიხედვით.

მუდმივი მაგნიტის მაგნიტური ნაკადი დროთა განმავლობაში მცირდება, ანუ მაგნიტი დაძველებას განიცდის. ანსხეავენ შექცევად და შეუქცევად დაძველებას.

თუ მაგნიტზე მოქმედი ტემპერატურა და მექანიკური დაძაბულობები ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციას უმნიშვნელოდ (5%-მდე) ამცირებს და შემცირება სტრუქტურულ ცვლილებასთან დაკავშირებული არ არის, მაშინ ხელახალი დამაგნიტებისას მუდმივი მაგნიტი საწყის მაგნიტურ თვისებებს აღიდგენს. ასეთ დაძველებას შექცევადს უწოდებენ. შეუქცევადი დაძველება კი სტრუქტურულ ცვლილებასთანაა დაკავშირებული და მისი აღდგენა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

მუდმივი მაგნიტის თვისებების ფორმირებისას მაგნიტურსაღ მასალაზე ერთდროულად ტემპერატურა და გარეშე ძლიერი მაგნიტური ველი მოქმედებს, ხოლო გაცივება მაგნიტური ველის მოქმედებით ხდება.

შემადგენლობისა და მიღების ტექნოლოგიის მიხედვით მაგნიტურსაღი მასალები სხმულ, ფხვნილოვან და სპეციალური ტექნოლოგიით მიღებულ მასალებად იყოფიან.

სხმული მაგნიტური მასალების რკინა - ნიკელი - ალუმინის ($Fe - Ni - Al$) და რკინა - ნიკელი - კობალტის ($Fe - Ni - Co$) შენადნობების სხმულებს წარმოადგენენ. თვისებების გაუმჯობესების მიზნით შენადნობში მცირე რაოდენობით სპილენძს და მაგნიუმს უმატებენ. მაგნიტური სტრუქტურის ჩამოყალიბება $130^{\circ}C$ - დან $500^{\circ}C$ - მდე, ძლიერ მაგნიტურ ველში ($H=200000$ ა/მ) გაცივებისას ხდება.

ფხენილისებური მაგნიტურსალი მასალების დამზადების ტექნოლოგია იმდენად მოქნილია, რომ საშუალებას გვაძლევს რთული ფორმის მაგნიტური დეტალები მივიღოთ. ისინი მეტალოკერამიკულ, მეტალოპლასტმასურ და ოქსიდურ მასალებად იყოფიან. მათი მიღების ტექნოლოგიის ძირითადი არსია: საწყისი მასალის ფხენილის შემწებებლების გარეშე მაღალ ტემპერატურაზე ან შემწებებლებთან ნარევის, შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე წნეხ – ფორმაში დაწნეხვით სასურველი ფორმის მიცემა და ძლიერ მაგნიტურ ველში დამაგნიტება.

განსაკუთრებული მოთხოვნების მქონე მაგნიტურსალი მასალები სპეციალური ტექნოლოგიით მიიღება. ამ სახის მასალებს პლასტიკურდეფორმირებადი მაგნიტურსალი შენადნობები, ელასტიკური მაგნიტები, მაგნიტორეზინები და თხევადი მაგნიტები მიეკუთვნებიან.

პლასტიკურად დეფორმირებად შენადნობებს სპილენძ – ნიკელ – რკინის (Cu – Ni – Fe) და კობალტ-ვანადიუმის (Co – V) შენადნობები მიეკუთვნებიან, ისინი ძირითადად მაგნიტური მავთულების და თხელი ფურცლების დასამზადებლად გამოიყენებიან.

ელასტიკური მაგნიტები და მაგნიტური რეზინი, რეზინში ბარიუმის ფერიტის შეყვანით მიიღება. გამოიყენება მახსოვრობის სისტემის შესაქმნელად.

თხევადი მაგნიტები მაგნიტურსალი მასალის უმცირესი ნაწილაკებით შევსებულ სითხეს წარმოადგენენ. გამოიყენება რთული კონფიგურაციის მქონე მუდმივი მაგნიტების დასამზადებლად.

§ 9-7 სპეციალური დანიშნულების მაგნიტური მასალები

სპეციალური დანიშნულების მაგნიტურ მასალებს, როგორც წესი მაგნიტურ რბილი მასალები მიეკუთვნე-

ბიან. მათში ყურადღება რომელიმე პარამეტრზეა გამახვილებული და მასალაც სპეციალურად ამ მოთხოვნის მიხედვით არის შექმნილი, ასეთებია პისტირეზისის სწორკუთხა მარყუჯის მქონე მაგნიტური მასალები, ზემადალსიხშირული ფერიტები, თერმომაგნიტური და მაგნიტოსტრიქციული მასალები.

პისტირეზისის სწორკუთხა მარყუჯის მქონე მასალების დასახასიათებლად (ნახ. 9-10) სწორკუთხონების კოეფიციენტი (a) შემოაყავთ

$$a = \frac{B_c}{B_{აკს.}} , \quad (9-7)$$

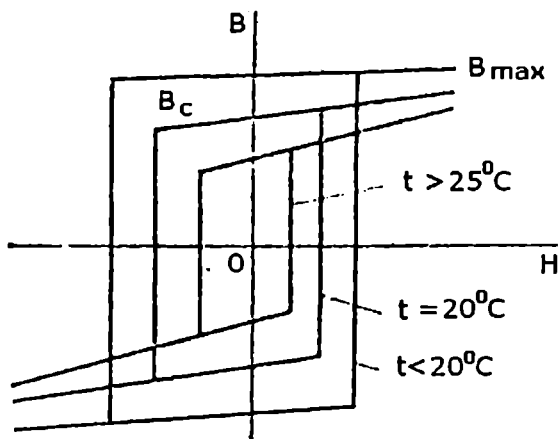
სადაც B_c ნარჩენი, ხოლო $B_{აკს.}$ მაქსიმალური ინდუქციაა. იდეალური მასალებისათვის $a=1$, რეალურებისათვის კი $a=0,85-0,98$.

ასეთი მასალისაგან დამზადებულ გულარას მაგნიტურად ორი მდგრადი მდგომარეობა გააჩნია, რომელიც ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციის დადებით ($+B_c$) და უარყოფით ($-B_c$) მნიშვნელობებს შეესაბამება. ეს კი ინფორმაციის შენახვის მაგნიტურ ელემენტს წარმოადგენს. პირობითად მიღებულია, რომ $+ B_c$ მდგომარეობა "1", ხოლო $- B_c$ კი "0" შეესაბამება.

ზემადალსიხშირული ფერიტები 10^{10} - ჰერც სიხშირემდე ელექტრომაგნიტური ტალღებისათვის გამჭვირვალე გარემოს წარმოადგენენ. ერთდომენიანი სტრუქტურა და დიდი კუთრი წინააღმდეგობა მათ ფაქტიურად უდანაკარგოს ხდის, ხოლო პისტირეზისის სწორკუთხა მარყუჯი მცირე სიმძლავრით მართვადი სწრადმომქმედი მაჩსოვრობის ელემენტების შექმნის შესაძლებლობას იძლევა. ამ სახის მასალებს ნიკელიანი, მაგნიუმიანი, ფერო - მაგნიუმიანი და სხვა ზემადალსიხშირული ფირფიტები მიეკუთვნებიან.

თერმომაგნიტური მასალების მაგნიტური თვისებები ძლიერ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე, ამ დამოკიდებულებას სასურველია გარკვეული ფუნქციონ-

აღური სახე კქონდეს. თერმომაგნიტურ მასალებს კალ-
მალოი, თერმალლი, თერმომაგნიტო კომპენსატორები,
მრავალფენოვანი თერმომაგნიტები და სხვა მიეკუთვნე-
ბიან. ისინი ტემპერატურის კომპენსაციის მაგნიტური
შუნტების და თერმომაგნიტორეზისტორების დასამზადე-



ნახ. 9-10 ჰისტირეზისის სწორკუთხა მარყუვი
სხვადასხვა ტემპერატურაზე

ბლად გამოიყენებიან. რა თქმა უნდა შეუცვლელნი არიან
თერმომაგნიტური რელეების შესაქმნელად და სხვა.

ინფორმაციის მაგნიტური ჩაწერის საუკეთესო
მეთოდს თერმომაგნიტიზმის მოვლენა გეთავაზობს, რომ-
ლის არსი შემდეგშია, თუ მაგნიტურ ველში მოთავსე-
ბული მაგნიტური მასალის ძალიან მცირე ფართობს კი-
ურის წერტილის მახლობელ ტემპერატურამდე ლოკალურ-
ად გავაცხელებთ, მაშინ ეს უბანი მაგნიტურ თვისებებს
დაკარგავს, მაგრამ გარეშე მაგნიტურ ველს შეუძლია თა-
ვიდან დაამაგნიტოს ის და ამ მდგომარეობაში რჩება მაგ-
ნიტურ ზონაში გაცივების შემდეგაც, ამასთანავე მე-
ზობელი უბნების მდგომარეობა არ შეიცვლება.

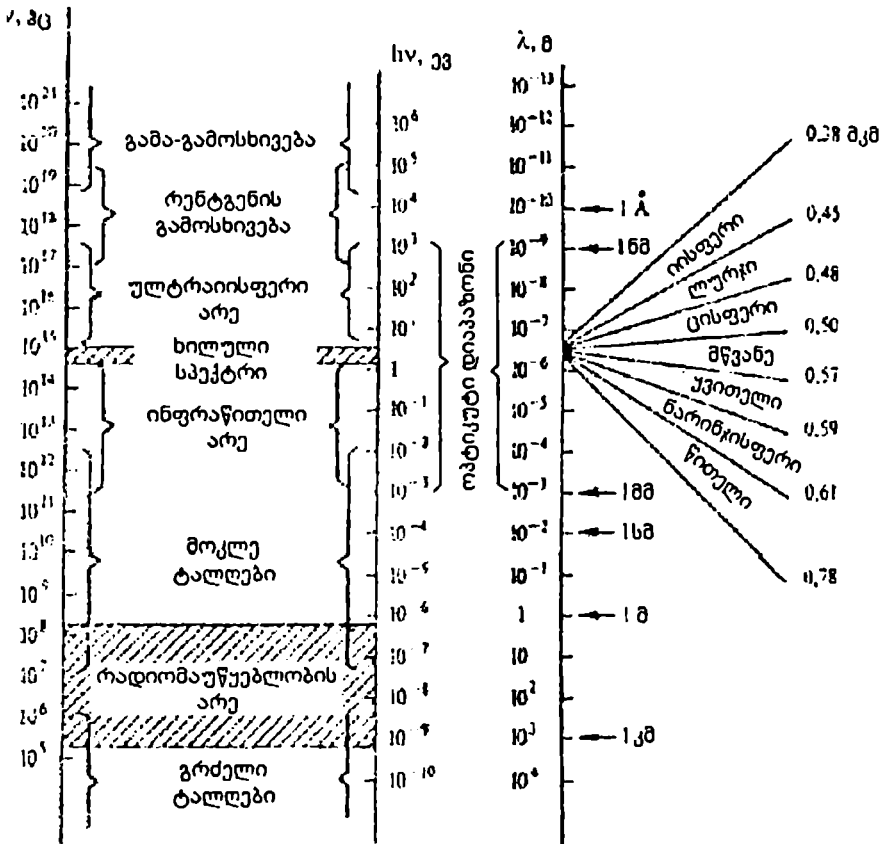
გადამაგნიტებული უბანის ფართობს მომქმედი
თერმოზონდის (ლაზერის სხივი) ფართობი და მასალის

სითბოგამტარობის კოეფიციენტი განსაზღვრავს. დადგინდა რომ თუ თერმოზონდის მოქმედების ხანგრძლივობა 10^{-9} წამს არ აღემატება, მაშინ მაგნიტური მასალა რაც შეიძლება თხელი და ერთგვაროვანი უნდა იყოს. ასეთი მასალა მაგნიუმისა და ბისტმუტის შენაერთის (MnBi) თხელი ფირი აღმოჩნდა.

რომელიც კიურის ტემპერატურაზე მაღლა ($T_c=360^{\circ}\text{C}$) ლოკალური გადახურებით განმაგნიტდება, მაგრამ სუსტი მაგნიტური ველი ამ უბანს თავიდან ამაგნიტებს ე.ი. მას საჭირო ინფორმაციას აწვდის, ხოლო დანარჩენი უბნების მაგნიტური მდგომარეობა არ იცვლება. ასეთი მასალის 1სმ^2 ფართზე მცირე დროის განმავლობაში 10^6 ბაიტი ინფორმაციის ჩაწერა შეიძლება. სწრაფმოქმედი ლაზერული სისტემის გამოყენებით ჩაწერის სიხშირე 10^9 ჰერცის აღემატება.

რეკომენდებული ლიტერატურა

1. იშხნელი ა. დიელექტრიკები (ცვლად ელექტრულ ველში; თბილისი 1977.
2. იშხნელი ა. დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა; თბილისი 1977.
3. იშხნელი ა. დიელექტრიკების გარღვევა; თბილისი 1978.
4. NIKURADSE A. DAS FLUÜSSIGE DIELEKTIKUM, BERLIN 1934.
5. Никурадзе А. Жидкие диэлектрики м 1936.
6. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков. I и II т. м. 1949,1956.
7. Епифанов Г.И. Физика твёрдого тела. м. в-ш. 1977.
8. Киттель Г. В ведение в физику твёрдого тела м. наука 1978
9. Татевский В.М. Строение молекул. м. химия 1977.
10. Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков. л. 1978.
11. Тареев Б.М. Физика диэлектрических матерьялов м. 1982.
12. Богородский Н.П. Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические матерьялы. Л Энергоатомиздат. 1985.
13. Пасынков В.В., Сорокин В.С., Материалы электронной техники м. в-ш. 1986.
14. Пасынков В.В., Материалы электронной техники М, В-Ш. 1980.
15. Журавлева Л.В., Электроматериаловедение, м. 2001.
16. Преображенский А.А., Бишард Е.Г., Магнитные матерьялы и элементы, м. в-ш.1986.
17. Физический энциклопедический словарь. м. сов-эн. 1984
18. Справочник по электротехническим матерьялам I, II, и III том. Л. Энергоатомиздат 1988.
19. Электроника – энциклопедический словарь. м. с.э. 1991.
20. Борисова М.Э, Койков С.Н., Чихладзе Р.Г. Дефектоскопия, электрическое старение и пробой полимерных пленок заряженных в корроном разряде. Электротехника №8, 1991г. 26-28см.
21. ჩიხლაძე რ. ნაცვლიშვილი კ. ელექტრეტების ზედაპირული მუხტის გასაზომი ხელსაწყო: ჟურნალი მეცნიერება და ტექნიკა 1995წ. №540 გვ. 49-51



სარჩევი

წინასიტყვაობა-----	3
უნივერსალური ფიზიკური მუღმიევი-----	6
შესავალი-----	7

I თავი. ნივთიერიბათა აბიპულება

§ 1.1. ატომის აგებულება-----	8
§ 1.2. ქიმიური კაეშირევი-----	10
§ 1.3. ნივთიერებათა აგრეგატული მდგომარეობა-----	15
§ 1.4. მინარევიევი და დეფექტევი-----	20
§ 1.5. ზონური თეორიის ელემენტევი-----	22
§ 1.6. ელექტროტექნიკური მასალევი კლასიფიკაცია-----	25

II თავი. ელექტრობამტარი მასალევი

§ 2.1. ლითონთა ელექტროგამტარობის მოვლენა -----	28
§ 2.2. გამტარი მსალევის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება -----	33
ტემპერატურაზე და მექანიკურ დაძაბულობაზე	
§ 2.3. ზედაპირული და სიახლოეის ეფექტევი გამტარში-----	36
§ 2.4. თერმოელექტრომომოსრავეველი ძალა და თერმო წყეილევი-----	39
§ 2.5. მაღალი გამტარობის გამტარი მასალევი-----	41
§ 2.6. სხედასხევა დანიშნულევის გამტარი მასალევი-----	48
§ 2.7. არამეტალური გამტარი მასალევი-----	52
§ 2.8. დიდი წინააღმდეგობის გამტარი მასალევი-----	53
§ 2.9. პლაზმა-----	56
§ 2.10. ზეგამტარობა-----	59

III თავი. დიელექტრიკევი

§ 3.1. დიელექტრიკევის კლასიფიკაცია და მახასიათებლი სიდიდევი-----	63
§ 3.2. დიელექტრიკევის პოლარიზაცია-----	65
§ 3-3 დიელექტრიკევის პოლარიზაციის სახეევი-----	69
§ 3-4 დიელექტრიკევის პოლარიზაციის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება-----	74
§ 3-5 პოლარიზაციის დამოკიდებულება ელექტრული ველის სიხშირეზე-----	77
§ 3-6 აირევის პოლარიზაცია-----	81
§ 3-7 სითხეევის პოლარიზაცია-----	82

§ 3-8 მყარი დიელექტრიკების პოლარიზაცია	84
§ 3-9 რთული აგებულების დიელექტრიკების პოლარიზაცია	87
§ 3-10 დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა	89
§ 3-11 აირადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა	93
§ 3-12 თხევადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა	95
§ 3-13 მყარი დიელექტრიკების ელექტროგამტარობა	97
§ 3-14 მყარი დიელექტრიკების ზედაპირული ელექტროგამტარობა	99
§ 3-15 დიელექტრიკული დანაკარგები	101
§ 3-16 დიელექტრიკული დანაკარგები აირებში	105
§ 3-17 დიელექტრიკული დანაკარგები სითხეებში	107
§ 3-18 დიელექტრიკული დანაკარგები მყარ დიელექტრიკებში	109
§ 3-19 დიელექტრიკების გარღვევა	111
§ 3-20 აირადი დიელექტრიკების გარღვევა ერთგვაროვან ველში	115
§ 3-21 აირადი დიელექტრიკების გარღვევა არაერთგვაროვან ველში	118
§ 3-22 აირადი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცის დამოკიდებულება გარეშე ფაქტორებზე	119
§ 3-23 თხევადი დიელექტრიკების გარღვევა	122
§ 3-24 მყარი დიელექტრიკების ელექტრული გარღვევა	124
§ 3-25 მყარი დიელექტრიკების ელექტროთბური გარღვევა	126
§ 3-26 მყარი დიელექტრიკების ელექტროქიმიური გარღვევა	129
§ 3-27 მყარი დიელექტრიკების ზედაპირული გარღვევა	130

IV. თაპი დიელექტრიკების არაელექტრული თვისებები

§ 4-1 დიელექტრიკების ტენმედეგობა	133
§ 4-2 დიელექტრიკების სითბური თვისებები	136
§ 4-3 დიელექტრიკების ქიმიური თვისებები და რადიაციის მიმართ მდგრადობა	138

V თაპი. დიელექტრიკული მასალები

§ 5-1 დიელექტრიკული მასალების კლასიფიკაცია	141
§ 5-2 აბროვანი დიელექტრიკული მასალები	142
§ 5-3 ნაეთობის ელექტროსაიზოლაციო ზეთები	145
§ 5-4 სინთეზური და მცენარეული თხევადი დიელექტრიკები	148
§ 5-5 ფისის მაგვარი დიელექტრიკული მასალები	151
§ 5-6 ბუნებრივი ფისები	153
§ 5-7 თერმოპლასტიკური პოლიმერები	154
§ 5-8 თერმორეაქტიული პოლიმერები	158
§ 5-9 ბიტუმიები	160
§ 5-10 ელექტროსაიზოლაციო ლაქები	161
§ 5-11 კომპოზიტები	163
§ 5-12 ბოჭკოვანი ელექტროსაიზოლაციო მასალები	165

§ 5-13 ელექტროსაინჟინერული ქაღალდი, მუყაო და ფიბრა	166
§ 5-14 ლაქქსოვილები	169
§ 5-15 პლასტიკური მასები	170
§ 5-16 ელასტომერები	173
§ 5-17 ელექტროტექნიკური მინები	175
§ 5-18 ელექტროტექნიკური კერამიკების მიღება	178
§ 5-19 ქარსი და ქარსიანი მასალები	182

VI თავი. აპტიური დიელექტრიკები

§ 6-1 სეგნეტოელექტრიკები	187
§ 6-2 პიეზოელექტრიკები	191
§ 6-3 პიროელექტრიკები	194
§ 6-4 ელექტრიტები	195
§ 6-5 ელექტრო-ოპტიკური მასალები	198

VII თავი. ელექტროტექნიკური ნაწარმი

§ 7-1 ელექტრული სადენები	201
§ 7-2 ელექტრული კაბელები	204
§ 7-3 ელექტროტექნიკური ფაიფურის ნაკეთობები	206
§ 7-4 რეზისტორები	209
§ 7-5 ელექტრული კონდენსატორები	213

VIII თავი. ნახევრად გამტარი მასალები

§ 8-1 ნახევრად გამტარების საკუთარი ელექტროგამტარობა	217
§ 8-2 ნახევრად გამტარების მინარეული ელექტროგამტარობა	221
§ 8-3 ნახევრად გამტარების ელექტროგამტარობა	224
§ 8-4 ნახევრად გამტარების წინააღმდეგობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება	227
§ 8-5 ნახევრად გამტარების წინააღმდეგობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე	230
§ 8-6 ნახევრად გამტარების ფოტოელექტრული თვისებები	234
§ 8-7 თერმოელექტული და გალვანომაგნიტური მოვლენები ნახევრად გამტარებში	238
§ 8-8 ელექტრონიულ - ხვრელური (p-n) გადასასვლელი ნახევრად გამტარებში	241
§ 8-9 ნახევრად გამტარების მიღება	246
§ 8-10 მარტივი ნახევრად გამტარები	249
§ 8-11 ნახევრად გამტარული შენაერთები და მყარი ხსნარები	253

IX თავი. მაგნიტური მასალები

§ 9-1 მაგნიტიზმის მოვლენა	257
§ 9-2 ნივთიერებათა კლასიფიკაცია მაგნიტური თვისებების მიხედვით	260
§ 9-3 დამაგნიტების პროცესი	263
§ 9-4 მაგნიტიზმის მოვლენის დამოკიდებულება გარეშე ფაქტორზე	268
§ 9-5 მაგნიტური მასალების კლასიფიკაცია	271
§ 9-6 მაგნიტურბილი მასალები	273
§ 9-7 მაგნიტურ სალი მასალები	276
§ 9-7 სპეციალური დანიშნულების მაგნიტური მასალები	278
რეკომენდებული ლიტერატურა	282
დანართი 1	283

კომპიუტერული უზრუნველყოფა ლევან საჩაღელის
მხატვარი ანა ჩიხლაძე

იბეჭდება ავტორის მიერ
წარმოდგენილი სახით

გადაეცა წარმოებას 17.04.2007. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.04.2007.
ქალაქის ზომა 60X84 1/16. გარნიტურა Acadnusx. პირობითი ნაბეჭდი
თაბახი 18. ტირაჟი 100 ეგზ.

გამომცემლობა “ტექნიკური უნივერსიტეტი”, თბილისი
კოსტაეას 77

