

იური მოღვაძე

მიკროელექტრონიკა

ელექტრონული ხელსაწყოები

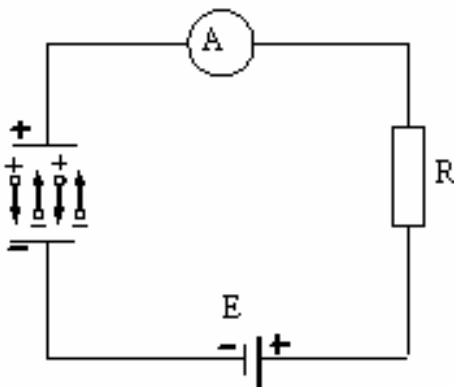
*(I კურსის II სემესტრის ლექციების კონსპექტი)*

თ ბ ი ღ ი ს ი

# თავი I. ვაკუუმური ელექტრონული ხელსაწყოები

## 1.1. ელექტრული დენი გაზში და ვაკუუმში

ნივთიერებაში ელექტრული დენის გავლის აუცილებელი პირობაა მასში არსებობდეს თავისუფალი მუხტები და მასზე მოდებული იყოს პოტენციალთა სხვაობა ანუ ძაბვა. ჩავატაროთ ასეთი ცდა: ავიღოთ ორი ლითონის ფირფიტა (ელექტროდი) და ერთი მივუერთოთ დენის წყაროს უარყოფით მომჭერს, ხოლო მეორე A ამპერმეტრისა და R წინააღობის საშუალებით დადებით მომჭერს (ნახ. 1.1.1). დავინახავთ, რომ ამპერმეტრის ისარი



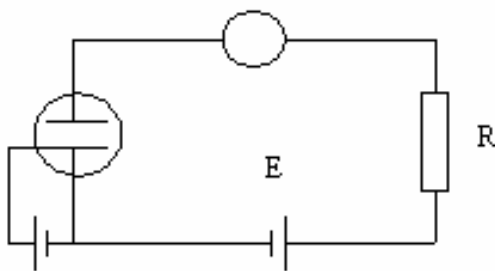
ნახ. 1.1.1

არ გადაიხრება ე.ი. წრედში დენმა არ გაიარა. საკმარისია ლითონის ფირფიტებს შორის შევიტანოთ ანთებული ასანთი წრედში დენი გაივლის (გადაიხრება ამპერმეტრის ისარი). ეს მოვლენა ასე აიხსნება: პირველ შემთხვევაში ფირფიტებს შორის არ არსებობდა დამუხტული ნაწილაკები და ამიტომ წრედში დენმა არ გაიარა, ხოლო მეორე შემთხვევაში ანთებულმა ასანთმა მოახდინა ფირფიტებს შორის მოთავსებული ჰაერის იონიზაცია (წარმოიქმნა დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები), დადებითმა მუხტებმა დაიწყეს მოძრაობა უარყოფითად დამუხტული ფირფიტისაკენ, ხოლო უარყოფითმა მუხტებმა დადებითად დამუხტულ ფირფიტისაკენ. ამის შედეგად შეიკრა წრედი და გაიარა დენმა.

ზემოდ მოყვანილ შემთხვევაში წრედში მაშინაც გაივლის დენი თუ ფირფიტებს შორის შევქმნით დიდ დაძაბულობის ელექტრულ ველს. ეს შესაძლებელია თუ გავზრდით დენის წყაროს E ელექტრომამოძრავებელ ძალას (ე.მ.ძ). ამ შემთხვევაში ჰაერის იონიზაცია მოხდება ელექტრული ველის საშუალებით.

ამრიგად, გაზში რომ გაიაროს დენმა საჭიროა მასზე მოვდოთ ძაბვა და მოვახდინოთ მისი იონიზაცია.

ვაკუუმში დენის გავლის შესასწავლად ჩავატაროდ ასეთი ცდა: ავიღოთ მინის კოლბი, ამოვტუმბოთ ჰაერი (შევქმნათ ვაკუუმი) და ჩავრჩილოთ მასში ორი ელექტროდი. ეს ელექტროდები ზემოთ მოყვანილი ცდის ანალოგიურად მივუერთოდ დენის წყაროს (ნახ. 1.1.2.).



ნახ. 1.1.2

ამ შემთხვევაში წრედში დენი არ გავა. შემდეგ უარყოფითად დამუხტულ ელექტროდს გავუკეთოდ მეორე მომჭერი და ნახ. 1.1.2.-ზე ნაჩვენები სქემის მიხედვით მივუერთოდ E<sub>1</sub> ე.მ.ძ მქონე დენის წყარო. დავინახავთ რომ წრედში ამპერმეტრის ისარი გადაიხრება ე.ი. წრედში

გაიარა დენმა. ეს მოვლენა შემდეგნაირად აიხსნება: პირველ შემთხვევაში ელექტროდებს შორის არ არსებობდა დამუხტული ნაწილაკები და ამიტომ წრედში დენმა არ გაიარა, ხოლო მეორე შემთხვევაში მივაერთედ რა  $E_1$  დენის წყარო უარყოფითად დამუხტულ ელექტროდსიგი გახურდა და მისგან მოხდა ელექტრონების ამოფრქვევა. ამოფრქვეულელექტრონებმადაიწყეს მოძრაობა დადებითი ფირფიტისაკენ, შეიკრა წრედი და გაიარა დენმა.

ნახ. 1.1.2-ზე მოყვანილ წრედში დენი გაივლის იმ შემთხვევაშიც თუ  $E_1$  დენის წყაროს მიერთების მაგივრად შევქმნით უარყოფითი ელექტროდის გარშემო გარკვეული სიდიდის დადებით ელექტრულ ველს. ამ შემთხვევაში ელექტრული ველის გავლენით უარყოფითი ელექტროდიდან მოხდება ელექტრონების ამოფრქვევა.

ამრიგად, იმისათვის, რომ ვაკუუმში გაიაროს დენმა საჭიროა რაიმე საშუალებით მასში შევქმნათ დამუხტული ნაწილაკები (ელექტრონები) და მოვდეთ მასზე ძაბვა.

## 1.2 ელექტრული ემისიის სახეები

სხეულიდან ელექტრონების გამოსვლის პროცესს ელექტრული ემისია ეწოდება. არსებობს ელექტრული ემისიის შემდეგი სახეები: 1. თერმოელექტრული ემისია 2. ფოტოელექტრული ემისია 3. ელექტროსტატიკური ემისია 4. მეორადი ელექტრული ემისია.

სხეულის გახურების შედეგად მისგან ელექტრონების გამოსვლის პროცესს თერმოელექტრული ემისია ეწოდება. ამ შემთხვევაში გამოსული (ამოფრქვეული) ელექტრონების რაოდენობა მით მეტია რაც მეტია სხეულის ტემპერატურა. სხეულზე გახურების შედეგად გადაცემული ენერგია იხარჯება იმ ძალების დასაძლევად, რომლებიც ეწინააღმდეგებიან მისგან ელექტრონების გამოსვლას. ამ ენერგიას გამოსვლის მუშაობა ეწოდება. ლითონის შემთხვევაში ზედაპირის ფართობის ერთეულიდან თერმოელექტრული ემისიით მიღებული დენის სიდიდე განისაზღვრება რიჩარდსონ-დემანის ფორმულით:

$$i = AT^2 e^{-\frac{b_0}{T}}$$

სადაც  $A$  ლითონის გვარობაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი;  $b_0 = \frac{W_0}{K}$  და იგი ნივთიერებიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობის პროპორციულია;  $K$  ბოლცმანის მუდმივაა;  $T$  აბსოლიტური ტემპერატურაა;  $W_0$  ელექტრონის გამოსვლის მუშაობაა.

სხეულზე სინათლის დაცემის შედეგად ელექტრონების ამოფრქვევის მოვლენას ფოტოელექტრული ემისია ეწოდება. ამ დროს სინათლის ფოტონები გადასცემენ თავიანთ ენერგიას ლითონში არსებულ ელექტრონებს და ისინი ამის გამო ტოვებენ სხეულის ზედაპირს. ეს მოვლენა აღიწერება სტოლვეტოვისა და აინშტაინის კანონებით:

$$I = K\phi \text{ და } \frac{mv^2}{2} = hv - W_0$$

სადაც  $I$  არის ფოტოდენი;  $K$  - კოეფიციენტი;  $\phi$  - სინათლის ნაკადი;  $m$  - ნაწილაკის მასა;  $v$  - სიჩქარე;  $h$  - პლანკის მუდმივა;  $\nu$  - სინათლის ტალღის სიგრძე. თუ  $h\nu = W_0$  მაშინ ელექტრონები ლითონიდან გამოვლენ ნულოვანი სიჩქარით, ხოლო თუ  $h\nu > W_0$  მაშინ გამოსულ ელექტრონებს გააჩნიათ გარკვეული სიჩქარე.

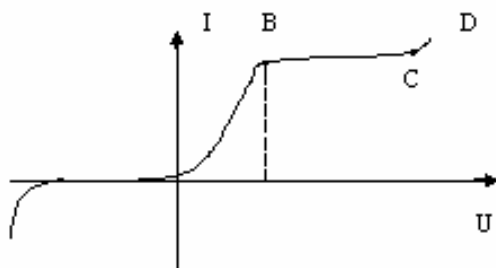
ლითონის ზედაპირთან შექმნილი დიდი დაძაბულობის დადებითი ელექტრული ველის მიერ ამოფრქვეულ ელექტრონების მოვლენას ეწოდება ელექტროსტატიკური ემისია. ამ მოვლენის თეორია დამუშავებულია შოტკის მიერ. დადგენილია, რომ ელექტრული ველის დაძაბულობა არ უნდა იყოს  $10^8$  ვ/მ-ზე ნაკლები.

გარკვეული სიჩქარით მოძრავი ელექტრონების ლითონის ზედაპირზე დაჯახების შედეგად მისგან ახალი ელექტრონების ამოფრქვევის მოვლენას მეორადი ემისია ეწოდება. მეორადი ელექტრული ემისიისათვის საჭიროა, რომ ლითონზე დაჯახებული ელექტრონების ენერგია იყოს  $(10 \div 15)$  ელექტრონვოლტის ტოლი.

### 1.3. ვაკუუმური ელექტრონული მილაკები

ნახ. 1.1.2-ზე მოყვანილ სქემაში თუ შევცვლით ელექტროდებზე მოდებული ძაბვის პოლარობას დავინახავთ, რომ წრედში დენი არ გავა. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ამოფრქვეული ელექტრონები უარყოფითად დამუხტული ფირფიტის მიერ განიზიდებიან, დაბრუნდებიან იმ ფირფიტაზე საიდანაც ამოიფრქვნენ, ამის გამო წრედი არ შეიკვრება და წრედში დენი არ გავა.

ნახ. 1.1.2-ზე მოყვანილ წრედში ჩართულ ხელსაწყოს, რომელიც წარმოადგენს მინის ბალონს, საიდანაც ამოტუმბულია ჰაერი და ჩარჩილულია ელექტროდები, ეწოდება ვაკუუმური დიოდი. იმ ელექტროდს, რომელიც მიერთებულია დენის წყაროს უარყოფით პოლუსს და საიდანაც ამოიფრქვევა ელექტრონები ეწოდება კათოდი, ხოლო მეორეს, რომელიც მიერთებულია დენის წყაროს დადებით მომჭერს, ეწოდება ანოდი. დიოდისათვის დამახასიათებელი თვისებაა დენი გაატაროს მხოლოდ ერთი მიმართულებით ანოდიდან კათოდისაკენ. თუ დიოდზე მოდებული ძაბვის ზრდას დავიწყებთ ნულიდან, მაშინ წრედში ჩართული ამპერმეტრი გვიჩვენებს, რომ დასაწყისში დენი თანდათანობით იზრდება, ხოლო როცა მიაღწევს ძაბვა რაღაც  $U_0$  სიდიდეს შემდგომი ზრდით დენი აღარ გაიზრდება. რეჟიმს როდესაც დიოდში გამავალი დენი აღარ იზრდება გაჯერების რეჟიმი ეწოდება, ხოლო  $U_0$  ძაბვას გაჯერების ძაბვა. ნახ. 1.3.1-ზე ნაჩვენებია დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი. იგი შესდგება 5 უბნისაგან: AB აქტიური რეჟიმი; BC გაჯერების რეჟიმი;



ნახ. 1.3.1



ნახ. 1.3.2

CD კათოდიდან ელექტრონების მეორადი ამოფრქვევის რეჟიმი; AF დიოდის უკუჩართვის რეჟიმი; FK დიოდის უკუგატარების რეჟიმი;

როგორც ნახ.1.3.1 ჩანს, როცა ძაბვა ანოდსა და კათოდს შორის ნულია წრედში დენი მაინც გადის. ეს  $I_0$  დენი გამოწვეულია იმით, რომ კათოდიდან ამოიფრქვევა ზოგიერთი ელექტრონი ისეთი სიჩქარით, რომ იგი მიაღწევს ანოდს და წრედში გავა მცირე დენი. ეს დენი თავისი სიმცირის გამო შეიძლება უგულვებელყოფთ. AB უბანზე ძაბვის თანდათანობითი ზრდა იწვევს დენის თანდათანობით ზრდას, რადგან კათოდიდან ამოფრქვეულ ელექტრონებს გააჩნიათ სხვადასხვა სიჩქარე, ზოგს ნულოვანიც კი. ამიტომ ძაბვის თანდათანობით ზრდით ელექტრონებიც თანდათანობით იძენენ ისეთ სიჩქარეს, რომელიც საკმარისია ანოდამდე მისაღწევად. როცა ძაბვა გაუტოლდება  $U_0$ -ს, მაშინ ყველა ამოფრქვეული ელექტრონი მიაღწევს ანოდს და ძაბვის შემდგომი ზრდა უკვე აღარ იწვევს BC უბანზე დენის ზრდას. CD უბანზე იმდენად დიდია ველის დაძაბულობა, რომ კათოდიდან ადგილი აქვს ელექტრონების მეორად ემისიას. ამის გამო ანოდამდე მისული ელექტრონების რაოდენობა იზრდება და შესაბამისად იზრდება წრედში გამავალი დენიც. AEFK უბანზე ანოდს მიეწოდება უარყოფითი პოტენციალი, ხოლო კათოდს დადებითი. იგი შეესაბამება დიოდის უკუჩართვის რეჟიმს. AEF უბანზე დიოდში დენი არ გადის, რადგან კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები ანოდის მიერ განიზიდებიან და ბრუნდებიან ისევ კათოდზე. AE უბანზე დენი თანდათანობით მცირდება ნულამდე, ხოლო EF უბანზე იგი ნულის ტოლია. FK უბანზე წრედში გადის უკუდენი, რომელიც ძაბვის ზრდით თანდათანობით იზრდება, რადგან ამ შემთხვევაში ისეთი დიდია ველის პოტენციალი, რომ ანოდიდან იწყება ელექტრონების მეორადი ემისია, რომელიც ძაბვის ზრდით (უკუძაბვა) თანდათანობით იზრდება.

ნახ.1.3.2-ზე ნაჩვენებია ვაკუუმური დიოდის სქემატური აღნიშვნა. მესამე ელექტროდი არის ვარვარების ძაფი (ვ.ძ.), რომელშიც გადის ვარვარების დენი, ხურდება და იგი ახურებს კათოდს.

თუ ანოდსა და კათოდს შორის მოვათავსებთ მესამე ელექტროდს (ბადე) და მას მივაწვდით მცირე უარყოფით პოტენციალს, მაშინ ამ პოტენციალის ცვლილებით შეიძლება ვცვალოთ ანოდისაკენ მიმავალი ელექტრონების რიცხვი და შესაბამისად წრედში გამავალი დენიც. ასეთ ვაკუუმურ ელექტრონულ ხელსაწყოს ეწოდება ვაკუუმური ტრიოდი. არსებობს აგრეთვე ოთხელექტროდიანი და ხუთელექტროდიანი ვაკუუმური ხელსაწყოები.

დღეისათვის ვაკუუმური ხელსაწყოები თითქმის არ გამოიყენება (გარდა ელექტრონულ სხივური მილაკისა), რადგან დიდია მათი გაბარიტები, გააჩნია დიდი საკუთარი ხმაურის სიგნალი, ელექტროდებზე საჭიროა მივაწოდოთ დიდი ელექტრული ძაბვები (100 ÷ 500 ვოლტის ფარგლებში), შესაბამისად მოითხოვენ კვების დიდ ენერჯიას და სხვა. ამიტომ მათ გარდა ელექტროსხივური მილაკისა არ განვიხილავთ.

## 14. ელექტრონული მილაკების კათოდები

ელექტრონული მილაკის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ელემენტს წარმოადგენს კათოდი. მისი მუშაობის ხარისხი განისაზღვრება მისი პარამეტრებით. კათოდის პარამეტრებია: 1.კათოდური დენის მაქსიმალური სიმკვრივე; 2.კათოდის ეფექტურობა; 3.მუშა ტემპერატურა; 4.კათოდის მუშაობის ხანგრძლივობა.

კათოდის დენს უწოდებენ კათოდიდან სხვა ელექტროდებისაკენ მიმართულ ელექტრონების ნაკადს. კათოდური დენის მაქსიმალური სიმკვრივე არის კათოდის ზედაპირის ფართის ერთეულიდან ამოფრქვეული ელექტრონებისაგან მიღებული მაქსიმალური დენის სიმკვრივე. თანამედროვე კათოდებს გააჩნიათ (0,1 ÷ 1,0) ა/სმ<sup>2</sup> დენის მაქსიმალური სიმკვრივე.

კათოდის ეფექტურობა არის მილიამპერებში გამოსახული კათოდის ემისიის დენი, რომელიც მიიღება კათოდის გახურებაზე დახარჯული 1ვტ სიმძლავრის დროს.

$$H = \frac{I_{1\max}}{I_3 U_3} \text{ მა/ვტ}$$

სადაც  $I_{1\max}$  არის კათოდის ემისიის მაქსიმალური დენი.  $I_3$  და  $U_3$  არის ვარვარების დენი და ძაბვა. კათოდის ეფექტურობით ფაასდება მისი ეკონომიურობა. რაც უფრო დიდია კათოდის ეფექტურობა მით უფრო მეტი ემისიის დენი მიიღება ვარვარების სიმძლავრის ნაკლები დანახარჯებით. კათოდის ეფექტურობა მოთავსებულია (2 ÷ 100)მა/ვტ ფარგლებში.

კათოდის მუშა ტემპერატურაში იგულისხმება ის მინიმალური ტემპერატურა, რომელიც საჭიროა კათოდის გასახურებლად, რათა მიღებული იქნას ნომინალური კათოდური ემისიის დენი. რაც უფრო მცირეა ეს ტემპერატურა მით უფრო ეფექტურია კათოდი ე.ი. ნაკლები ენერჯია იხარჯება მის გახურებაზე. კათოდის მუშა ტემპერატურას შეადგენს (1000 ÷ 2500)K.

კათოდის ხანგრძლივობა არის ის დრო, რომლის განმავლობაშიც მას შეუძლია უწყვეტი მუშაობა ისე, რომ აკმაყოფილებდეს პარამეტრებზე ნორმალურ მოთხოვნებს.

კათოდი შეიძლება დაეყოს ოთხ ძირითად ჯგუფად: 1. ლითონური; 2. ლითონაფსკური; 3. ნახევარგამტარული; 4. რთული (ლითონნახევარგამტარული და ლითონოკერამიკული). კათოდები შეიძლება იყოს როგორც არაგააქტიურებული ისე გააქტიურებული. გააქტიურებული კათოდების ზედაპირი დაფარულია სპეციალური ფენით, რომელიც ამცირებს კათოდის მუშა ტემპერატურას და მისი მთელი ზედაპირიდან ახდენს თანაბრად ელექტრონების ემისიას.

არაგააქტიურებული ლითონური კათოდები ყველაზე უფრო ნაკლებად ეკონომიურია. ისინი ძირითადად მზადდებიან ვოლფრამისაგან.

ლითონაფსკური კათოდები წარმოადგენენ დადებითად დამუხტული ნივთიერების ზედაპირს, რომელიც დაფარულია ერთ ან რამოდენიმე ლითონის ფენით. ასეთი კათოდების გავრცელებული სახეებია კარბიდული და ბარიუმვოლფრამის კათოდები.

ნახევარგამტარული კათოდები არის მაღალეკონომიური. კათოდის სადფუძველი (კერნი) დაფარულია ელექტრონული ტიპის ელექტროგამტარობის მქონე აქტიური ნივთიერების (20 ÷ 100)მკმ ფენით. მას მიეკუთვნება ოქსიდური და თორიუმ-ოქსიდური კათოდები.

რთული კათოდები წარმოადგენენ ოქსიდურ საფუძველზე დამზადებულ ლითონნახევარგამტარულ ან ლითონოკერამიკულ კათოდებს.

კათოდები კოსტრუქციის მიხედვით იყოფა ორ ჯგუფად: უშუალო ვარვარების და შესათბობი.

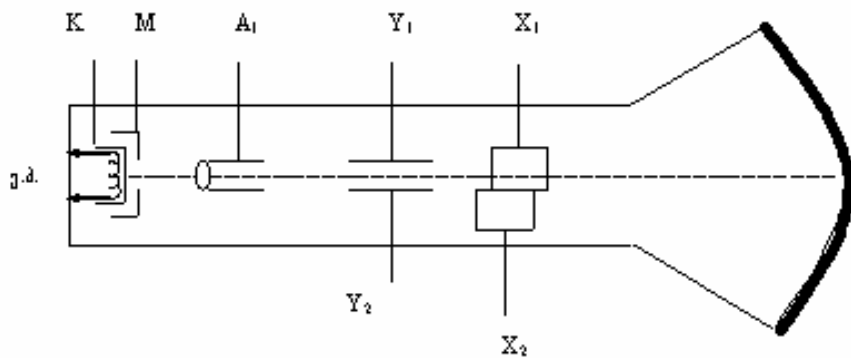
უშუალო ვარვარების კათოდი არის ისეთი კათოდი, რომელიშიც გადის ვარვარების დენი, ხურდება და ამოიფრქვევა ელექტრონები.

შესათბობ კათოდებში ელექტრულად განმხოლოებულია ერთმანეთისაგან ვარვარების ძაფი და ის ზედაპირი საიდანაც ხდება ელექტრონების ემისია. ვარვარების დენის მეშვეობით ხურდება ვარვარების ძაფი და იგი გადასცემს სითბოს (ათბობს, ახურებს) მის გარშემო მყოფ კათოდს, რის შედეგადაც მისგან ამოიფრქვევა ელექტრონები.

## 1.5. ელექტრონულ-სხივური მილაკი

ელექტრონულ ხელსაწყოს, რომელიც გამოიყენება ეკრანზე ელექტრონების მოქმედებით მნათი ხილვადი (ოპტიკური) გამოსახულების მისაღებად ელექტრონულ-სხივური მილაკი ეწოდება. არსებობს ასეთი მილაკების სხვადასხვა სახე: სატელევიზიო, ოსცილოგრაფული, დამამახსოვრებელი და სხვა. განვიხილოთ ელექტრონულ-სხივური მილაკის მუშაობა მიმდები სატელევიზიო (კინესკოპი) მილაკის მაგალითზე.

ნახ.1.5.1-ზე ნაჩვენებია ელექტრონულ-სხივური მილაკის სქემატური აღნიშვნა. იგი წარმოადგენს მინის ბალონს, რომელშიც შექმნილია მაღალი ვაკუუმი ( $10^{-7} \div 10^{-8}$ ) მმ.ვწყ.სვ.



ნახ.1.5.1

ბალონში ჩარჩილულია ელექტროდების სისტემა: ვარვარების ძაფი (გ.ძ.), K კათოდი, M მოდულიატორი, A<sub>1</sub> პირველი ანოდი და ორი წყვილი გადამხრელი ფირფიტები X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub> (ჰორიზონტალური) და Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub> (ვერტიკალური), ბალონის ტორსული ნაწილის შიგა ზედაპირს ეწოდება ეკრანი, რომელიც დაფარულია ლუმინაფორით და მასზე სწრაფად მოძრავი ელექტრონების დაცემა იწვევს მის ნათებას. ელექტრონების ნაკადი (სხივი) ეკრანზე გადაადგილებისას ტოვებს მნათ კვალს. ეკრანის ბალონთან შემაერთებელი ყელი ასრულებს A<sub>2</sub> მეორადი ანოდის როლს.

ელექტრონულ-სხივურ მილაკში გამოიყენება არაპირდაპირი ვარვარების ოქსიდური კათოდი, რომელსაც გააჩნია ცილინდრული ფორმა. მის შიგნით მოთავსებულია ვოლფრამის გამახურებელი ვარვარების ძაფი. კათოდს ათავსებენ ცილინდრული ფორმის მოდულიატორში, რომელსაც მეორე მხარეს გააჩნია ხვრელი. ამ ხვრელში უნდა გავიდეს კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები. მოდულიატორს აწვდიან უარყოფით პოტენციალს, რათა მან კათოდიდან სხვადასხვა მიმართულებით ამოტყორცნილი ელექტრონების შეკრება მოახდინოს ერთ ვიწრო კონად (ელექტრული სხივი). უარყოფითი პოტენციალი ისეთი უნდა იყოს რომ ყველა ამოტყორცნილი ელექტრონი მოძრაობის შეწყვეტის გარეშე შეგროვდეს. ამის გამო მოდულიატორს მცირე უარყოფით პოტენციალს აწვდიან (რამოდენიმე ვოლტს). მცირე ფარგლებში მოდულიატორის პოტენციალის ცვლილებით შეიძლება ვცვალოდ ელექტრონული სხივის ინტენსიობა და შესაბამისად მილაკის ეკრანზე ვცვალოდ მნათი ლაქის სიკაშკაშე. M ცილინდრულ ელექტროდს მოდულიატორს იმიტომ უწოდებენ, რომ იგი ახდენს ელექტრონული სხივის მოდულაციას.

მოდულიატორსა და კათოდს შორის გარკვეული უარყოფითი ძაბვის დროს ელექტრონული სხივის მოძრაობა წყდება და ეკრანზე მნათი ლაქა ქრება. ასეთ ძაბვას მოდულიატორის ჩამკეტი ძაბვა ეწოდება. ეს ძაბვა რამდენიმე ათეულ ვოლტს შეადგენს.

პირველი ანოდი მოდულიატორიდან დაცილებულია გარკვეული მანძილით. იგი ღრუ ცილინდრული ფორმისაა. მასზე კათოდის მიმართ მიეწოდება დადებითი პოტენციალი (რამოდენიმე ასეული ვოლტი). ამ ძაბვის გავლენით ელექტრონული სხივი იძენს დიდ სიჩქარეს და დიდი კინეტიკური ენერგიით ბომბავს ეკრანს.

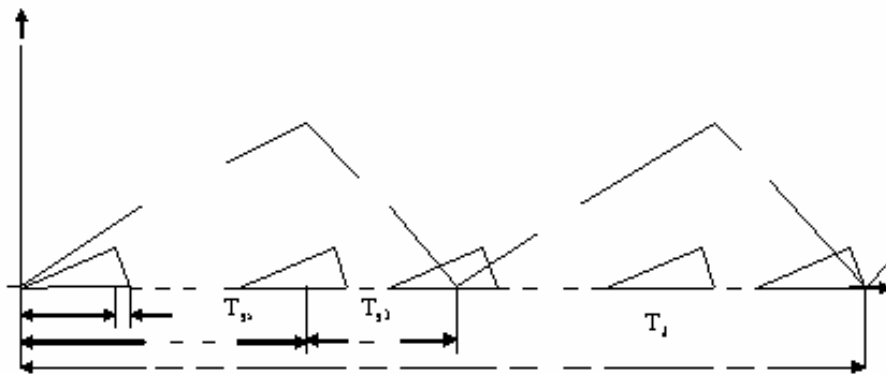
ელექტრონულ-სხიური მილაკის ელექტროდებს შორის სივრცეში იქმნება არაერთგვაროვანი ელექტრული ველი, რომელიც გავლენას ახდენს ელექტრონების მოძრაობის ტრაექტორიაზე და ცდილობს დაუახლოვოს ისინი მილაკის ღერძს. ამრიგად, აღნიშნული ელექტრული ველი ასრულებს მაფოკუსირებელი ლინზის როლს.

ელექტრონულ-სხივურ მილაკში მოთავსებულია ორი გადამხრელი ფირფიტა, ჰორიზონტალური და ვერტიკალური. თითოეული წყვილი გადამხრელი ფირფიტა წარმოადგენს ბრტყელ კონდენსატორს. ჰორიზონტალური გადამხრელი ფირფიტების საშუალებით ეკრანზე სხივი გადაადგილდება მარცხნიდან მარჯვნივ, ხოლო ვერტიკალური გადამხრელი ფირფიტები სხივს ამოძრავებს ეკრანის ზემოდან ქვემოთ. სხივი უკან დაბრუნების დროს (ჰორიზონტალური მიმართულებით მარჯვნიდან მარცხნივ, ხოლო ვერტიკალური მიმართულებით ქვემოდან ზემოდ) ქრება და ეკრანზე კვალს არ ტოვებს.

ეკრანზე სხივი ისე სწრაფად მოძრაობს, რომ ეკრანის ერთი ადგილიდან (წერტილი) მეორეზე გადასვლისას ეკრანის მნათი წერტილი ვერ ასწრებს ჩაქრობას და ჩვენ გვგონია, რომ მთელი ეკრანი არის განათებული. სინამდვილეში კი სხივი მოძრაობს წერტილ-წერტილ და ანათებს ეკრანის იმ ადგილს, რომელზეც იგი ეცემა.

თანამედროვე კინოსკოპებს აქვს მოალუმინირებული ეკრანი სხვადასხვა დიაგონალის სიგრძით და 4/5 გვერდების ფარდობით, ელექტროსტატიკური დაფოკუსირება, სხივის გადახრის მაგნიტური სისტემა  $110^{\circ}$ -მდე გადახრის კუთხით. სხივი ეკრანზე ხაზავს ხაზებს (სტრიქონებს) და თანდათან ჩამოდის ზემოდან ქვემოდ. დროს, რომლის განმავლობაში სხივი მოძრაობს უკიდურესი ზემო მარცხენა წერტილიდან და ბრუნდება იმავე ადგილზე არის ერთი სატელევიზიო კადრის დრო. ხოლო ის დრო, რომელსაც ანდომებს სხივი უკიდურესი მარცხენა წერტილიდან და ბრუნდება უკან არის ერთი სატელევიზიო სტრიქონის დრო.

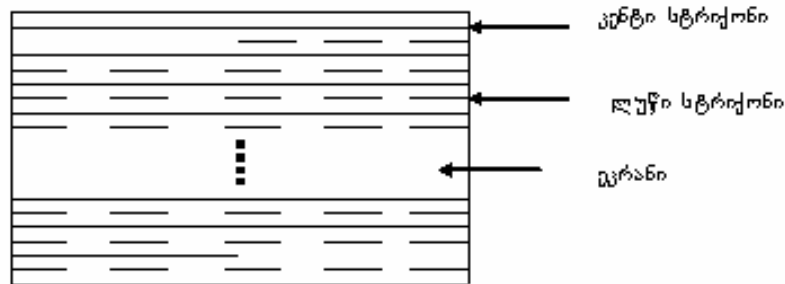
ეკრანზე რასტრის (ეკრანის მთელი ნათება) წარმოსაქმნელად გადამხრელ კოჭებში (ფირფიტები) ატარებენ ხერხისებურ ან უფრო რთული ფორმის დენს. დენის სიხშირე კადრის კოჭებში (ვერტიკალური გადამხრელი ფირფიტები) არის 50 კჰც, ხოლო სტრიქონულში (ჰორიზონტალური გადამხრელი ფირფიტები) არის 15625 კჰც. ამ დენების ფორმა ნაჩვენებია ნახ. 1.5.2-ზე.



ნახ. 1.5.2

ნახ. 1.5.2-ზე  $I_h$  არის სტრიქონის კოჭებში დენი სიდიდე;  $I_v$  - კადრის კოჭებში;  $T_h$  - სტრიქონის დრო;  $T_{hv}$  - სტრიქონის აქტიური დრო (ამ დროის განმავლობაში სხივი ანათებს ეკრანს სტრიქონის გასწვრივ ან რაც იგივეა სხივი ეკრანის მარცხენა მხრიდან მარჯვენამდე ანდომებს  $T_{hv}$  დროს);  $T_{vh}$  - სტრიქონის პასიური დრო (სხივის მოძრაობის დრო ეკრანის მარჯვნიდან მარცხნივ);  $T_{v1}$  - კადრის დრო;  $T_{v2}$  - კადრის აქტიური დრო (სხივი მოძრაობის დრო ეკრანის ზემოდან ქვემოთ);  $T_{v3}$  - კადრის პასიური დრო (სხივის მოძრაობის დრო ეკრანის ქვემოდან ზემოდ).

SEKM სატელევიზიო სტანდარტის მიხედვით  $T_{\Sigma}=64$  მკწმ;  $T_{\Sigma_{\alpha}}=52$  მკწმ;  $T_{\Sigma_{\beta}}=128$  კწმ;  $T_{\beta}=20$  მლწმ;  $T_{\alpha}=16,8$  მლწმ და  $T_{\text{კპ}}=3,2$  მლწმ. კადრში არის 625 სტრიქონი. კადრის აქტიურ ნაწილში 575 და პასიურში 50 სტრიქონია. სატელევიზიო სიგნალის სიხშირის ზოლის შემცირების გამო კადრი შედგება ორი სატელევიზიო ველისაგან და თითოეულში მოთავსებულია 312,5 სტრიქონი. პირველი ველის განმავლობაში ეკრანზე იხაზება კენტი დასახელების სტრიქონები, ხოლო მეორეში ლუწი დასახელების სტრიქონები. ე.ი. პირველში 1,3,5, . . . . ,287 და 289-ის ნახევარი, შემდეგ სხივი ქრება ბრუნდება უკან და იწყებს ლუწი სტრიქონების ხაზვას. მეორე ველი იწყება მეორე სტრიქონის შუა ადგილიდან შემდეგ 4,6,8, . . . ,570, შემდეგ ისევ ქრება ბრუნდება უკან და იწყებს თავიდან მოძრაობას (ნახ.1.5.3).



(ნახ.1.5.3)

ზემოდ მოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე შეიძლება ვთქვათ, რომ თუ დენი არ გადის ვერტიკალურ გადამხრელ კოჭებში, მაშინ ეკრანის ცენტრში მივიღებთ ჰორიზონტალურ მნათ ხაზს, ხოლო თუ არ გადის დენი ჰორიზონტალურ კოჭებში, მაშინ — ვერტიკალურ ხაზს. თუ დენი არ გადის არცერთ გადამხრელ კოჭებში, მაშინ მივიღებთ მნათ წერტილს ეკრანის ცენტრში. თანამედროვე კინესკოპებში აღნიშნულ შემთხვევებში მნათი ხაზები და წერტილები არ ჩანს, რადგან ეს შემთხვევები არის კინესკოპის (ტელევიზორის) არანორმალური მუშაობის (ტელევიზორის დაზიანების) შემთხვევები და ამ დროს რომ არ მოხდეს ეკრანის მნათი ადგილების ამოწვა (რადგან ამ დროს ხშირად და დიდი ინტენსივობით ეცემა ეკრანის ერთი და იგივე ადგილს ელექტრონული სხივი) ელექტრონული სხივი ავტომატურად ქრება.



## თავი 2. ნახევარგამტარი

### 2.1. ნახევარგამტარები. ნახევარგამტარების სტრუქტურა და გამტარობის სახეები

ნივთიერებას, რომლის კუთრი ელექტროწინაღობა ოთახის ტემპერატურაზე მოთავსებულია  $\rho = 10^{-3} \div 10^{-2}$ - დან  $\rho = 10^8 \div 10^9$  ომ.სმ საზღვრებში ნახევარგამტარი ეწოდება. თუ ნივთიერების კუთრი წინაღობა ნაკლებია ( $10^{-6} \div 10^{-4}$ ) ომ.სმ მაშინ იგი არის გამტარი (მეტალი), ხოლო თუ მეტია ( $10^{10} \div 10^{18}$ ) ომ.სმ არის არაგამტარი (დიელექტრიკი). დღეისათვის ცნობილი ნახევარგამტარების რაოდენობა გაცილებით მეტია ვიდრე მეტალებისა და დიელექტრიკებისა. ნახევარგამტარებს მიეკუთვნება: ქიმიური ელემენტები სილიციუმი, გერმანიუმი, სელენი და სხვა; სპილენძის ორჟანგი, ცინკის ჟანგი, ცინკის სულფიდი, კარბიდი და სხვა ქიმიური ნაერთები.

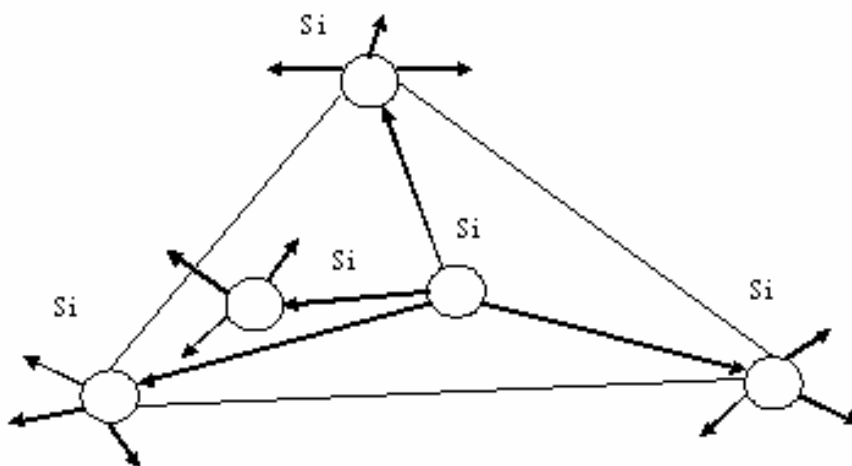
სუფთა მეტალებისაგან განსხვავებით სუფთა ნახევარგამტარების წინააღმდეგობა დიდად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. ტემპერატურის ზრდით წინაღობა კი არ მატულობს არამედ იკლებს.

სუფთა მეტალებში მინარევის დამატება იწვევს მიღებული შენადნობის კუთრი წინაღობის გაზრდას შემდგენების კუთრი წინაღობებთან შედარებით, ხოლო სუფთა ნახევარგამტარებში პირიქით ხდება, კუთრი წინაღობა ძლიერ მცირდება. მაგალითად თუ გერმანიუმს დავუმატებთ  $10^{-5}\%$  დარიშხანს, მაშინ მიღებული ნახევარგამტარის კუთრი წინაღობა 200-ჯერ მცირდება ვიდრე სუფთა ნახევარგამტარისა.

ნახევარგამტარში აღნიშნული თვისებების თავისურებების მიზეზის ახსნა ცხადი გახდება, როდესაც განვიხილავთ ნახევარგამტარების სტრუქტურას და გამტარობის მექანიზმს.

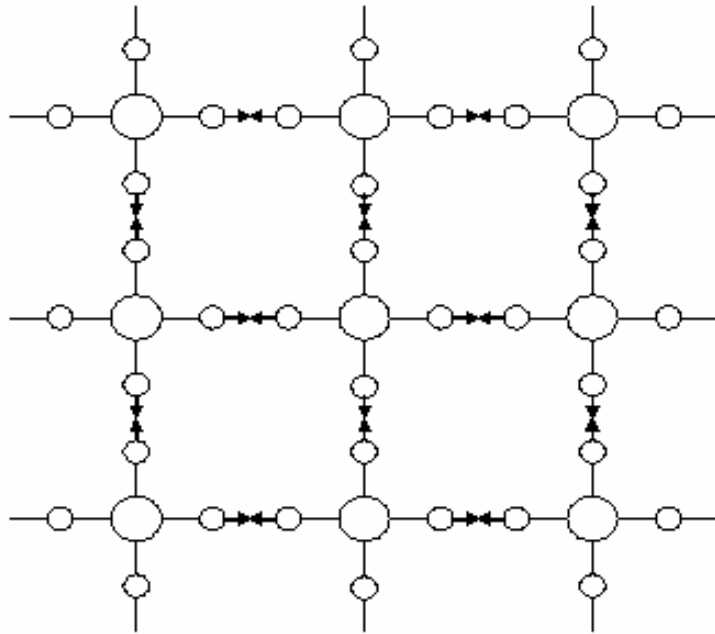
შემდგომში ნახევარგამტარების სახით განვიხილავთ გერმანიუმს და სილიციუმს. ისინი თანამედროვე ნახევარგამტარული ტექნიკის ძირითადი ელემენტებია.

გერმანიუმისა და სილიციუმის კრისტალური მესერი არის ტეტრაედრის ფორმის, რომლის კუთხეებში და ცენტრში მოთავსებულია ატომი (ნახ. 2.1.1). ტეტრაედრული სისტემის დამახასიათებელი თვისებებია ის, რომ მანძილი ცენტრში მოთავსებულ ატომსა და კუთხეებში მოთავსებულ ატომებს შორის არის ერთიდაიგივე. ყველა კუთხის ატომი არის აგრეთვე ცენტრალური სხვა ოთხი ატომისა.



ნახ.2.1.1

კრისტალურ მესერში ატომებს შორის კავშირი ხორციელდება წყვილ-წყვილად გაერთიანებული სავალენტო ელექტრონების საშუალებით. ასეთი გაერთიანების სურათი ნაჩვენებია ნახ. 2.1.2-ზე.



ნახ 2.12

ელექტრონების თითოეული წყვილი შესაბამისად მიეკუთვნება როგორც ერთ ისე მეორე ატომს. ამის გამო ყოველი ატომის გარშემო იქმნება მდგრადი (ნეიტრალური) რვა ელექტრონიანი გარსი. ატომებს შორის ისეთ კავშირს, როდესაც თითოეული მათგანი რჩება ნეიტრალური ეწოდება წყვილელექტრონული ან კოვალენტური ან უბრალოდ ვალენტური.

კრისტალური მესრის აღნიშნულ სტრუქტურას ადგილი აქვს აბსოლიტურ ნულ ტემპერატურაზე. ტემპერატურის ზრდით იზრდება კრისტალურ მესერში ატომების რხევა და ხდება ზოგიერთი სავალენტო კავშირის რღვევა. ამის შედეგად წარმოიქმნება თავისუფალი ელექტრონები (სავალენტო კავშირის რღვევის შედეგად ელექტრონი ტოვებს თავის ადგილს და გადადის სხვაგან), ხოლო მის ადგილას წარმოიქმნება ცარიელი ადგილი, რომელსაც ხვრელი ეწოდება. ხვრელს გააჩნია ისეთივე მუხტი, როგორც ელექტრონს მაგრამ მისი საპირისპირო (დადებითი). ხვრელი ისევე როგორც თავისუფალი ელექტრონი, მოძრაობს ქაოსურად და შემდეგ რეკომბირდება (უერთდება) რომელიმე თავისუფალ ელექტრონთან. ხვრელისა და თავისუფალი ელექტრონის მოძრაობა არის ურთიერთსაწინააღმდეგო. ტემპერატურის ზრდით მათი რაოდენობა იზრდება და ამიტომაც ნახევარგამტარის წინააღმდეგობა მცირდება.

ამგვარად, ნახევარგამტარში არსებობს ორი სახის მუხტები ელექტრონები და ხვრელები. აბსოლიტურად სუფთა და ერთგვაროვანი ნახევარგამტარის გახურების შედეგად ელექტრონები და ხვრელები წყვილ-წყვილად წარმოიქმნებიან. ნახევარგამტარში ხდება მათი როგორც გენერაცია ისე რეკომბინაცია. გამტარობას, რომელიც გამოწვეულია წყვილი (ელექტრონი და ხვრელი) მუხტების საშუალებით ეწოდება საკუთარი გამტარობა და  $i_k = i_n + i_p$  სადაც  $i_k$  -ნახევარგამტარის საკუთარი დენია,  $i_n$  -ხვრელების მიერ გამოწვეული დენია, ხოლო  $i_p$  -ელექტრონების მიერ.

სუფთა ნახევარგამტარში მინარევის შეტანის შემდეგ, ირღვევა კრისტალური მესრის სტრუქტურა და წარმოიქმნებიან დადებითი მუხტის მატარებლები. ამის შედეგად მისი გამტარობა იზრდება და წინააღმდეგობა კი მცირდება. ასეთ ნახევარგამტარს უწოდებენ მინარევიან ნახევარგამტარს. ზოგადად ნახევარგამტარის დენი ტოლია:

$$i = i_n + i_p$$

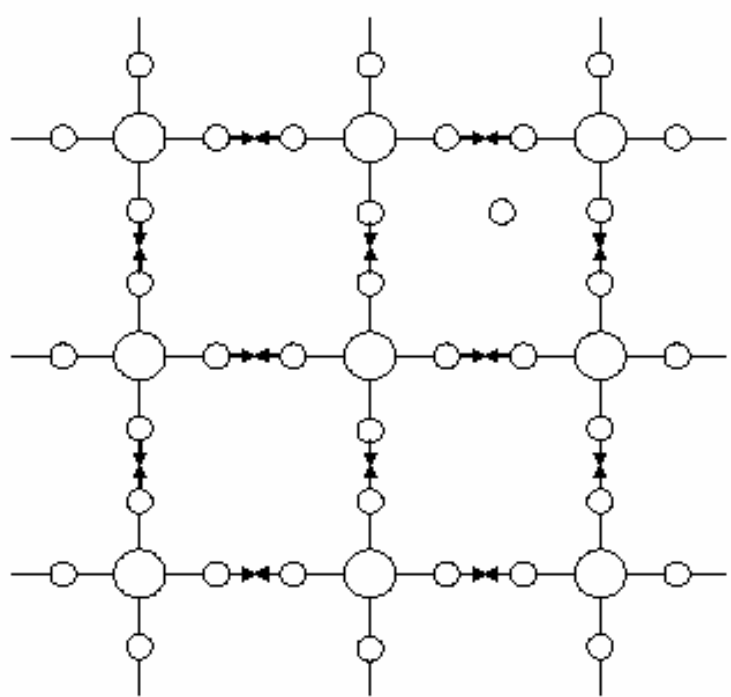
სადაც  $i_p$  -მინარეული გამტარობის დენია.

## 2.2 n და p ტიპის ნახევარგამტარები

მინარევის ატომები სხვადასხვანაირად განლაგდებიან ძირითადი (საკუთარი) ნახევარგამტარის კრისტალურ მესერში. სილიციუმში და გერმანიუმში მინარევის ატომები

ხშირად ჩაენაცვლებიან ძირითად ატომებს კრისტალური მესრის კვანძებში. ასეთი ჩანაცვლების სახე დამოკიდებულია მინარევის ტიპზე.

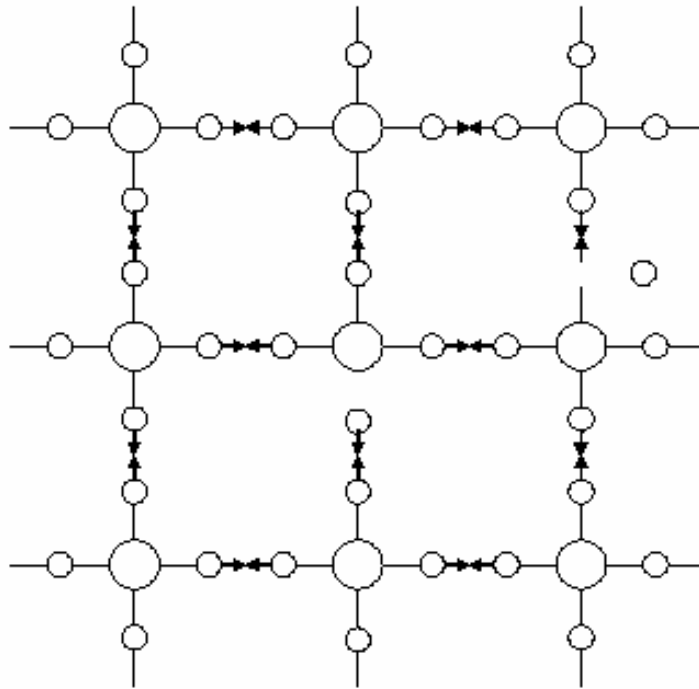
თუ სუფთა სილიციუმში შევიტანთ ხუთ ვალენტიან ფოსფორს, მაშინ ფოსფორის ატომის ოთხი ელექტრონი შევა კავშირში მის მეზობლად განლაგებულ სილიციუმის ატომის ოთხ ელექტრონთან (ნახ. 2.2.1) და წარმოიქმნება რვა ელექტრონიანი მდგრადი გარსი. ამ კომბინაციის მეცხრე ელექტრონი (ფოსფორის ატომის მეხუთე ელექტრონი) ატომის ბირთვთან იქნება სუსტად დაკავშირებული, იგი ადვილად მოწყდება მას და გახდება თავისუფალი ელექტრონი, ხოლო მინარევის ატომი გარდაიქმნება უძრავ დადებით ერთეულოვან მუხტიან იონად. ამ დროს მინარევით გამოწვეული თავისუფალი ელექტრონები დაემატება საკუთარ თავისუფალ ელექტრონებს, რომლებიც თერმოგენერაციით წარმოიქმნებიან. ამის შედეგად ნახევარგამტარის გამტარობა მკვეთრად იზრდება და იგი უპირატესად ხდება ელექტრონული. ასეთ ნახევარგამტარს უწოდებენ ელექტრონულს ან n ტიპისას. მინარევს, რომელიც უზრუნველყოფს ელექტრონულ გამტარობას, უწოდებენ დონორებს (ელექტრონების მიმცემი). სილიციუმისა და გერმანიუმისათვის ფოსფორის გარდა დონორი შეიძლება იყოს დარიშხანი, სტიბიუმი და სხვა ხუთ ვალენტიანი ელემენტი.



ნახ. 2.21

თუ სუფთა სილიციუმში შევიტანთ სამ ვალენტიანი ბორის ატომებს, მაშინ სურათი იქნება სხვა. ბორის ატომმა რომ დაამყაროს მყარი რვა ელექტრონიანი კავშირი მის მეზობლად მყოფ ოთხ სილიციუმის ატომთან მას ესაჭიროება ერთი დამატებითი ელექტრონი. ამიტომ იგი ამ ელექტრონს ართმევს ძირითადი კრისტალური მესრის ატომს (ნახ.2.2.2). ამ შემთხვევაში ბორის ატომი გარდაიქმნება უძრავ უარყოფით იონად. იმ ადგილზე, სადაც ბორის ატომმა მიიღო ელექტრონი, წარმოიქმნება ხვრელი, რომელიც დაემატება თერმოგენერაციით მიღებულ ხვრელებს. ამის შედეგად ნახევარგამტარის ელექტროგამტარობა მკვეთრად იზრდება და ხდება დადებითი ხასიათის. ისეთ ნახევარგამტარებს, რომლის გამტარობა უპირატესად განპირობებულია ხვრელების არსებობით ეწოდება ხვრელური ან p ტიპის. მინარევს, რომელიც უზრუნველყოფს ხვრელურ

გამტარობას, უწოდებენ აქცეპტორებს (ელექტრონების მიმღებს). გერმანიუმისა და სილიციუმისათვის აქცეპტორები ბორის გარდა არის ალუმინი, გალიუმი, ინდიუმი და სხვა სამ ვალენტიანი ელემენტი.



ნახ. 222

რადგან მინარევიან ნახევარგამტარში, ერთი ტიპის მოძრავი მუხტები სჭარბობს მეორეს, ამიტომ მიღებულია ვუწოდოთ იმ მუხტის მატარებელს, რომელიც მეტია ძირითადი, ხოლო რომელიც ნაკლებია არაძირითადი.

ამრიგად  $n$  ტიპის ნახევარგამტარში ძირითადი მუხტის მატარებელია ელექტრონი, ხოლო არაძირითადის ხერელი. ასევე  $p$  ტიპის ნახევარგამტარში ძირითადია ხერელი და არაძირითადია ელექტრონი.

### 2.3 მყარი სხეულის ენერგეტიკული ზონები

ნახევარგამტარის ანალიზის საფუძველი არის მყარი სხეულის ზონური დეორია. როგორც ცნობილია იზოლირებული ატომი ხასიათდება ელექტრონების დასაშვები ენერჯის დისკრეტული სპექტრით. ენერჯის გაზრდით დონეებს შორის მანძილი თანდათანობით მცირდება. ენერგეტიკული სპექტრის ე.წ. ჭერი არის იონიზაციის დონე, რომლიდანაც ელექტრონები ხდება თავისუფალი და მას შეუძლია დატოვოს ატომი. ელექტრონებით შევსებული ატომის დონეები ქმნიან ატომის გარსაცმს, რომელიც აღინიშნება ციფრებით 1, 2, 3, 4 და ა.შ. ან ასოებით K, L, M და ა.შ. გარსაცმები დაწყებული მეორედან იყოფიან ქვეგარსაცმებად  $2s, 2p, 3s, 3p, 3d$  და ა.შ. ელექტრონებით შევსებული გარსაცმებისა და ქვეგარსაცმების რაოდენობა დამოკიდებულია მენდელეევის პერიოდულ სისტემაში ელემენტის რიგით ნომერზე. არააგზნებულ მდგომარეობაში ატომის ზედა დონეები ელექტრონებით ყოველთვის ცარიელია. მყარი სხეული ეს არის უამრავი ატომების ერთობლიობა, რომელთა შორის მანძილი ძალიან მცირეა და ისინი ერთმანეთზე ძლიერ ურთიერთქმედებენ. ამიტომ მყარი სხეულის ნაჭერში ყველა ატომების ერთობლიობა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ერთი მთლიანი გიგანტური მოლეკულა. იგი ხასიათდება იგივე ენერგეტიკული სპექტრით, როგორითაც ატომი. ამ სპექტრის თავისებურება ის არის, რომ იგი შესდგება არა დასაშვები დისკრეტული დონეებისაგან, არამედ დასაშვები დისკრეტული ზონებისაგან. ამის გამო ყოველი მყარი სხეულის კრისტალისათვის არსებობს გარკვეული ზონური დიაგრამა, რომელშიც დასაშვები ზონები მონაცვლეობენ აკრძალული ზონებით. მკაცრად რომ ვთქვათ, დასაშვებ ზონებს აქვთ დისკრეტული სტრუქტურა და შესდგება იმდენი დონისაგან რამდენი ატომიცაა მოცემულ სხეულში.

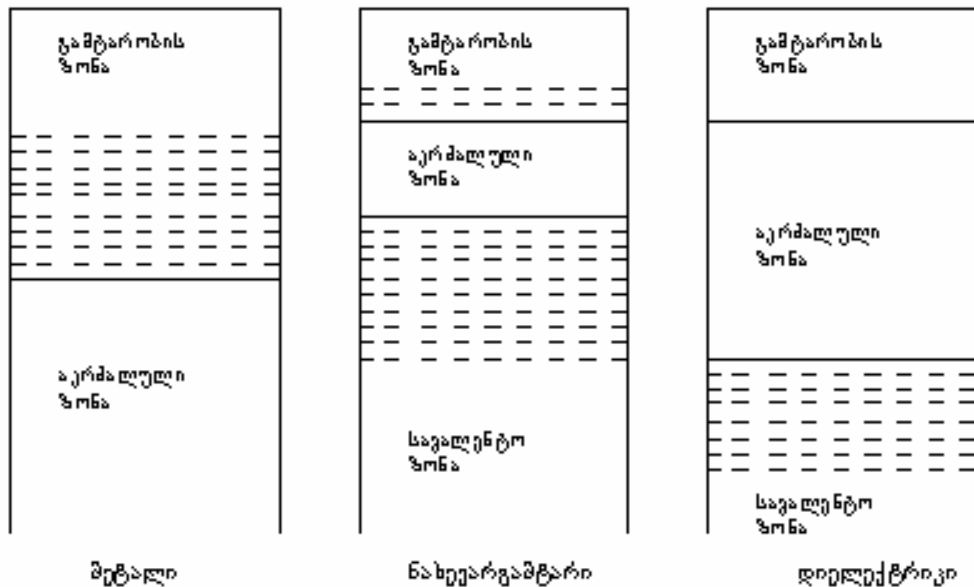
რიგ შემთხვევებში დასაშვები ზონები ერთმანეთს ფარავენ და მაშინ შესაბამისი აკრძალული ზონა არ არსებობს. ასეთ გადაფარვას ადგილი აქვს სპექტრის მაღალ ნაწილში, რადგან ზედა დონეები ატომში განლაგებული არიან ერთმანეთთან ახლოს.

დასაშვებ ზონებს შორის ენერგეტიკული მანძილი (ის ენერგია, რომელიც საჭიროა მეზობელი დასაშვები ზონიდან ელექტრონის გადასაგლეჯად) დამოკიდებულია ელექტრონის ატომთან კავშირის ენერგიაზე.

მყარი სხეულის გამტარობა განპირობებულია იმით, რომ ელექტრონებს შეუძლიათ გადასვლა უახლოეს ენერგეტიკულ დონეებზე. აქედან გამომდინარე გამტარობაში მონაწილეობა შეუძლიათ მხოლოდ იმ ზონის ელექტრონებს, რომელშიც არის თავისუფალი დონეები. ასეთი თავისუფალი დონეები ყოველთვის არსებობს მაღალ დასაშვებ ზონაში. ამიტომ მაღალ ზონას უწოდებენ გამტარობის ზონას.

გამტარობის ზონასთან ახლოს მყოფ ზონას უწოდებენ ვალენტობის ზონას. აბსოლიტურ ნულ ტემპერატურაზე გამტარობის ზონა არ არის სრულად შევსებული ელექტრონებით, ხოლო სავალენტო ზონა სრულადაა შევსებული და ამის გამო ამ ზონის ელექტრონები ვერ იღებენ მონაწილეობას გამტარობაში. მაგრამ აბსოლიტურ ნულზე მაღალ ტემპერატურაზე სავალენტო ზონიდან ელექტრონები გადადიან გამტარობის ზონაში და იღებენ მონაწილეობას გამტარობაში. ამ დროს სავალენტო ზონაში ჩნდება თავისუფალი დონეები, სადაც სხვა უფრო ქვედა ზონებიდან შესაძლებელია ელექტრონების გადმოსვლა. ეს მოვლენა შეეხება სხვა პროცესს, რომელსაც ჩვენ არ ვიხილავთ.

მყარი სხეულების ზონური სტრუქტურა არის მყარი სხეულის მეტალებად, ნახევარგამტარებად და დიელექტრიკებად დაყოფის ძირითადი საფუძველი. ნახ. 2.3.1 ნაჩვენებია მყარი სხეულის ზონური სტრუქტურა აბსოლიტურ ნულისაგან მცირედ განსხვავებულ ტემპერატურაზე ( $T > 0^{\circ}\text{K}$ ).



ნახ. 2.3.1

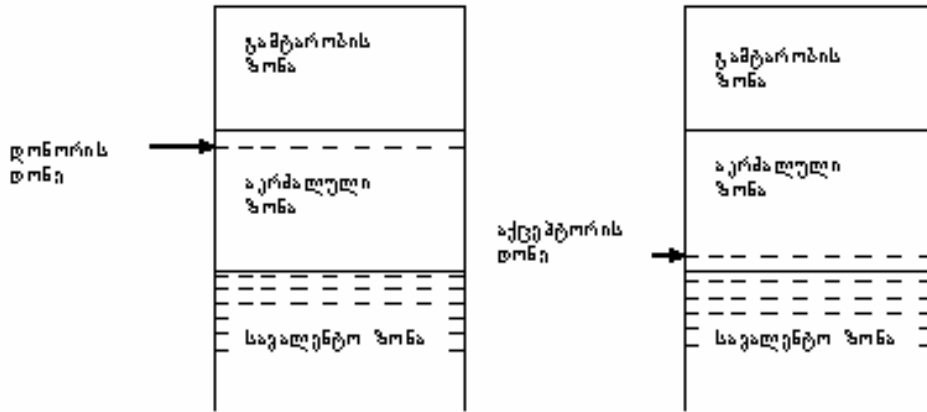
მეტალებში გამტარობისა და სავალენტო ზონები ერთმანეთს ფარავენ. ამის გამო გამტარობის ზონაში ყოველთვის იმყოფებიან ელექტრონები და აბსოლიტურ ნულ ტემპერატურაზეც კი გააჩნიათ მათ გამტარობა. ნახევარგამტარებში და დიელექტრიკებში გამტარობისა და სავალენტო ზონები გამოყოფილია აკრძალული ზონით, რომლის სიგანე დიელექტრიკში უფრო მეტია ვიდრე ნახევარგამტარში. აბსოლიტურ ნულ ტემპერატურაზე

ნახევარგამტარებში და დიელექტრიკებში გამტარობის ზონაში ელექტრონები არ არსებობენ, ამიტომ მათი გამტარობა ნულის ტოლია. სხვა რომელიმე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე ნახევარგამტარის გამტარობის ზონაში სავალენტო ზონიდან გადმოდინან ელექტრონები (გადალახავენ რა აკრძალულ ზონას) და ნახევარგამტარი იძენს გამტარობას, ხოლო დიელექტრიკში სავალენტო ზონის ელექტრონები ვერ გადალახავენ აკრძალულ ზონას და ამიტომ მას გამტარობა არ გააჩნია.

როგორც ავლინდნენ, თუ ნახევარგამტარის ტემპერატურა აბსოლიტურ ნულისაგან არის განსხვავებული, მაშინ გამტარობის ზონაში ჩნდებიან ელექტრონები, ხოლო სავალენტო ზონაში შეუვსებული დონეები (ხვრელები). ორივე ისინი (ელექტრონები

დახვრელები) წარმოიქმნებიან ერთდროულად ტოლი რაოდენობით. ორივე ზონის თავისუფალ მუხტებს შეუძლიათ ელექტრულ ველში მოძრაობა და ამიტომ ნახევარგამტარს გააჩნია გამტარობა. ელექტრონების გადასვლა ერთი ზონიდან მეორეში არის დროებითი. რაღაც დროის შემდეგ გადასული ელექტრონები ისევ ბრუნდებიან საწყის ზონაში (ხდება რეკომბინაცია). ელექტრონების ერთი ზონიდან მეორეში გადასვლა-გადმოსვლის პროცესი განუწყვეტლივ მიმდინარეობს. ტემპერატურის ზრდით იზრდება ელექტრონ-ხვრელის წყვილის რაოდენობა და ამასთან იზრდება ნახევარგამტარის გამტარობა.

ნახ.2.3.2-ზე ნაჩვენებია მინარევიანი ნახევარგამტარის ზონური სტრუქტურა



ნახ. 232

აბსოლიტურ ნულ ტემპერატურაზე. დონორული მინარევი ხასიათდება იმით, რომ მისი სავალენტო დონეები განლაგებულია აკრძალული ზონის ზემო ნახევარში, ხოლო აქცეპტორული მინარევის შემთხვევაში ქვემო ნახევარში. ელექტრონის გადასასვლელად დონორული დონიდან გამტარობის ზონაში და სავალენტო ზონიდან აქცეპტორულ დონეზე საჭიროა მცირე ენერგია. ამიტომ ამ დროს მინარევიანი გამტარობა გაცილებით უფრო დიდია ვიდრე საკუთარი გამტარობა. ეს სამართლიანია მხოლოდ დაბალ ტემპერატურაზე. ტემპერატურის შემდგომი ზრდა იწვევს საკუთარი გამტარობის თანდათანობით ზრდას, ხოლო მინარეულ გამტარობას გააჩნია ზღვარი. ამიტომ მაღალ ტემპერატურაზე მინარევიანი ნახევარგამტარის გამტარობა ძირითადად არის საკუთარი.

მყარ სხეულში ელექტრონების განაწილება ენერგეტიკული დონეების მიხედვით განისაზღვრება ნახევარგამტარის  $1\text{სმ}^3$ -ში ელექტრონების  $dn$  რიცხვით, რომლებსაც უკავიათ ენერგეტიკული დონეები  $dw$  ენერგიის რომელიღაც ინტერვალში:

$$dn = p(w)f(w)dw$$

სადაც  $p(w)$  არის ენერგეტიკული დონეების სიმკვრივეთა განაწილების ფუნქცია, რომელიც განსაზღვრავს ენერგიის ერთეულ მნიშვნელობაზე მოსულ დონეების რიცხვს;  $f(w)$  არის განაწილების ფუნქცია, რომელიც ასახავს მოცემულ  $T$  ტემპერატურის დროს  $w$  ენერგიის მქონე ენერგეტიკული დონის ელექტრონებით შევსების ალბათობას.  $f(w)$  ალბათობა განისაზღვრება ფერმის განაწილების ფუნქციით (ფერმის ფუნქცია), სადაც  $w_F$  არის ფერმის

$$f(w) = \frac{1}{\exp\left(\frac{w - w_F}{kT}\right) + 1}$$

დონე (ფერმის ენერგია);  $k$ - ბოლცმანის მუდმივაა;  $T$ - აბსოლიტური ტემპერატურაა.

ნახევარგამტარებს, რომლებშიც მუხტების გადამტანების ენერგეტიკული დონეების მიხედვით განაწილება ემორჩილება მაქსველის კანონს, არაგადაგვარებული ეწოდება. მაქსველის განაწილების კანონი ზემოთ მოყვანილი ტოლობისათვის არის შემდეგი:

$$\exp\left(\frac{w - w_F}{kT}\right) \gg 1 \quad \text{ე.ი.} \quad w - w_F \gg kT$$

ამ ნახევარგამტარებში ფერმის დონე მდებარეობს აკრძალული ზონის შიგნით.

ნახევარგამტარებს, რომელთა თვისებები ემორჩილება ფერმის სტატისტიკას (ფერმის ფუნქციას) გადაგვარებული ეწოდება. ნახევარგამტარის მდგომარეობა მისი გადაგვარების თვალსაზრისით დამოკიდებულია მინარევის კონცენტრაციასა და ტემპერატურაზე. არაგადაგვარებულ ნახევარგამტარებში მინარევის კონცენტრაცია იმყოფება ( $10^{12}$ - $10^{18}$ )  $\text{სმ}^{-3}$  საზღვრებში. გადაგვარების შემთხვევაში მინარევის კონცენტრაცია იზრდება ( $10^{19}$ - $10^{21}$ )-მდე.

არაგადაგვარებულ ნახევარგამტარში მინარევის კონცენტრაციის გაზრდა იწვევს  $n$  ტიპის ნახევარგამტარში ფერმის დონის აწევას და თანდათანობით მიახლოებას გამტარობის ზონის ფსკერთან, ხოლო  $p$  ტიპის ნახევარგამტარში ფერმის დონე თანდათანობით დაიწევს და მიუახლოვდება სავალენტო ზონის ჭერს. ელექტრონების კონცენტრაციას, რომლის დროსაც ფერმის დონე ემთხვევა გამტარობის ზონის ფსკერს, მიღებულია ეწოდოს კრიტიკული  $n_{კრ}$ . ასევე ხვრელების კონცენტრაციას, რომლის დროსაც ფერმის დონე ემთხვევა სავალენტო ზონის ჭერს, მიღებულია ეწოდოს კრიტიკული  $p_{კრ}$ . გამოთვლილია, რომ  $T=300\text{K}$  დროს გერმანიუმი შეიძლება ჩაითვალოს გადაგვარებულად, თუ  $n > n_{კრ} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{სმ}^{-3}$ .

## 2.4 p-n გადასასვლელი

ნახევარგამტარული ხელსაწყოს დასამზადებლად იყენებენ არა ერთი ტიპის ნახევარგამტარებს, არამედ სხვადასხვა ტიპის ნახევარგამტარებს, რომლებიც ერთმანეთთან არიან მოყვანილი კონტაქტში.

თუ კონტაქტში მოვიყვანთ ორ სხვადასხვა ტიპის ნახევარგამტარს ( $n$  და  $p$ ), მაშინ გამყოფი საზღვრის ახლოს ადგილი ექნება ძირითადი გადამტანების ურთიერთნეიტრალიზაციას. კონცენტრაციათა მკვეთრი განსხვავების გამო ხვრელები დიფუზიით გადადიან  $p$  ტიპის ნახევარგამტარიდან  $n$  ტიპის ნახევარგამტარში და რეკომბირდებიან იქ ელექტრონებთან. ასევე ელექტრონები  $n$ -დან გადადიან  $p$ -ში და ახდენენ იქ ხვრელებთან ნეიტრალიზაციას. პროცესის დამყარების შემდეგ გამყოფ საზღვარზე იქმნება ორმაგი ელექტრონული ფენა, რომელიც ღარიბია მუხტის ძირითადი გადამტანებით, ამიტომ მაღალი ელექტრული წინააღობა აქვს და ხელს უშლის მუხტების შემდგომ გადაადგილებას. ამ ფენას დადებითი მუხტები  $n$  ნახევარგამტარის მხარას აქვს, რაც გაპირობებულია დონორული მინარევის იონთა მუხტით, ხოლო უარყოფითი მუხტი ამ ფენას აქვს  $p$  ნახევარგამტარის მხარეს და იგი შექმნილია აქცეპტორული მინარევის იონების მიერ. აღნიშნულ ორმაგ ფენას (ნახ.2.4.1 მუქი უბანი) ელექტრონულ-ხვრელური ან  $p-n$  გადასასვლელი ეწოდება. იგი რამდენიმე მიკრონი სისქისაა და მთელი განხილული სისტემის მეტად მცირე ნაწილია, მაგრამ ის განსაზღვრავს ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ძირითად თვისებას.



ნახ.2.4.1

$p-n$  გადასასვლელი ხასითდება საკონტაქტო  $U_k$  ძაბვით და  $E_k$  დაძაბულობით, რომელიც ეწინააღმდეგება ხვრელებისა და ელექტრონების ურთიერთ გადასვლას. ამრიგად  $p-n$  გადასასვლელზე წარმოიქმნება პოტენციალური ბარიერი, რომლიც ეწინააღმდეგება ძირითადი გადამტანების გადასვლას და მყარდება დინამიური წონასწორობა, რომლის დროსაც  $p-n$  გადასასვლელში ადგილი აღარ აქვს მუხტების მოძრაობას.

თუ p-n გადასავლელს გარედან მოვდებთ U ძაბვას ისეთი პოლარობით, რომ p ნახევარგამტარზე მიეწოდოს უარყოფითი, ხოლო n-ზე დადებითი პოტენციალი, მაშინ ძაბვით შემნილი E ელექტრული ველი დაემთხვევა მიმართულებით საკონტაქტო  $E_0$  ელექტრულ ველს და შეჯამდება მასთან. ამის შედეგად ჩამკეტი ფენის საზღვრები ფართოვდება და ძაბვა გახდება  $U_p+U$ , ხოლო წინაღობა იზრდება, რადგან U ძაბვის მოქმედებით ძირითადი გადამტანები გამოიყვანებიან საკონტაქტო არედან პერიფერიისაკენ, რაც კიდევ უფრო ზრდის ძირითადი გადამტანების დეფიციტს p-n გადასასვლელში. ამ შემთხვევაში p-n გადასასვლელში გამავალი დენი მცირეა და მას უკუ  $I_{უკუ}$  დენი ეწოდება. p-n გადასასვლელი ამ დროს ჩაკეტილია, ხოლო U ძაბვას ჩამკეტი ანუ უკუ ძაბვა ეწოდება.

თუ U ძაბვას დადებითი პოლარობით მოვდებთ p ნახევარგამტარს, ხოლო უარყოფითით n-ს, მაშინ  $E_p$  და E ურთიერთსაწინააღმდეგო იქნება და პოტენციალური ბარიერი საკონტაქტო ფენაში მცირდება  $U_p-U$ -მდე. ამ დროს U-ს მოქმედებით ძირითადი გადამტანები შედიან პერიფერიიდან საკონტაქტო არეში და ამცირებენ იქ ელექტრონებისა და ხვრელების დეფიციტს. პოტენციალური ბარიერის შემცირების გამო ადვილდება ძირითადი გადამტანების გადასვლა p-n გადასასვლელში და დენი იზრდება. ე.ი. p-n გადასასვლელის წინაღობა მცირდება. ასეთ მდგომარეობას გახსნილი ეწოდება, ხოლო U ძაბვას პირდაპირი ანუ გამსხნელი ძაბვა ეწოდება. U ძაბვის ზრდით პოტენციალური ბარიერი მცირდება და როდესაც  $U=(0,35-0,5)\phi$ , მაშინ საერთოდ ქრება და გადის  $I_{პირ}$  პირდაპირი დენი.

როგორც ზემოთ მოყვანილი მსჯელობიდან ჩანს p-n გადასასვლელს გააჩნია არასიმეტრიული ელექტრული გამტარობის თვისება.

სხვადასხვა კუთრი გამტარობის მქონე ორი n ტიპის ნახევარგამტარების კონტაქტის შედეგად მიღებულ გადასასვლელს ელექტრონულ-ელექტრონული ანუ  $n-n^+$  გადასასვლელი ეწოდება. ამასთან + ნიშანი ეკუთვნის უფრო მაღალი კუთრი გამტარობის არეს. ანალოგიურად არსებობს  $p-p^+$  ან ხვრელურ-ხვრელური გადასასვლელი.

თუ გადასასვლელის ფართობი მეტია მის სისქეზე, მაშინ გადასასვლელს სიბრტყითი ეწოდება, ხოლო თუ ნაკლებია, მაშინ წერტილოვანი.

ჰეტეროგენული, ანუ ჰეტეროგადასასვლელი ეწოდება სხვადასხვა მასალის ნახევარგამტარებს შორის გადასასვლელს, რომლებიც ხასიათდებიან სხვადასხვა სიგანის აკრძალული ზონით. ჰეტეროგადასასვლელის მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ გადასასვლელი n ტიპის გერმანიუმსა და p ტიპის გალიუმის არსენიდს შორის ან n ტიპის გერმანიუმსა და n ტიპის გალიუმის არსენიდს შორის და სხვა.

პრაქტიკაში p-n გადასასვლელის მიღების სამი ხერხი არსებობს: 1. ნადნობიდან გამოზრდის მეთოდი 2. შედნობის მეთოდი 3. დიფუზიის მეთოდი.

ნადნობიდან გამოზრდის მეთოდი დაფუძნებულია იმაზე, რომ გამდნარი ნახევარგამტარული ნივთიერების გამყარებისას მასში შემავალი მინარევები უთანაბრად ნაწილდება მყარ და თხევად ფაზებს შორის. თუ ნახევარგამტარის ზოდის უბანს გავადნობთ მაღალი სიხშირის ელექტრული ველით და ამ ველს გადავადგილებთ ზოდის გასწვრივ ერთი მიმართულებით, მაშინ მინარევები წარიტაცება გამდნარი უბნის მიერ და გაძევდებიან ზოდის ბოლოსაკენ. ამის გამო ზოდის სხვადასხვა უბანს მინარევების სხვადასხვა კონცენტრაცია ექნება და ისინი სხვადასხვა ტიპის ნახევარგამტარები იქნება.

შედნობის მეთოდის დროს, მაგალითად, ელექტრონულ გერმანიუმში ადნობენ ინდიუმს, რომელიც აქცეპტორულ მინარევს წარმოადგენს. გადნობის შედეგად გერმანიუმის ნაწილი იხსნება ინდიუმში და გერმანიუმის ფირფიტის ზედაპირზე წარმოიქმნება ჩადრმავება და გაცივების შედეგად წარმოიქმნება p ტიპის გერმანიუმის შრე, რომელიც კონტაქტში იქნება n ტიპის გერმანიუმთან.

დიფუზიის მეთოდი მდგომარეობს იმაში, რომ მაღალ ტემპერატურაზე p და n ტიპის ნახევარგამტარები დიფუნდირდება ერთმანეთში.



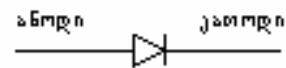
# თავი 3. ნახევარგამტარული ელექტრული ხელსაწყოები

## 3.1 ნახევარგამტარული დიოდი

p-n გადასასვლელის არასიმეტრიული ელექტროგამტარობის თვისება საფუძვლად დაედო ნახევარგამტარული დიოდის მუშაობას. დიოდი არის ნახევარგამტარული ხელსაწყო, რომელიც დენს ატარებს მხოლოდ ერთი მიმართულებით. იგი არის ჰერმეტიკულ კორპუსში მოთავსებული p-n გადასასვლელი, რომლის p და n ნაწილებს გაკეთებული აქვს გამომყვანები. გამომყვანს, რომელიც მიერთებულია p ნახევარგამტართან ეწოდება ანოდი, ხოლო რომელიც მიერთებულია n-თან ეწოდება კათოდი. ნახ. 3.1.1-ზე და ნახ. 3.1.2-ზე შესაბამისად ნაჩვენებია დიოდის სტრუქტურული და სქემატური აღნიშვნა.

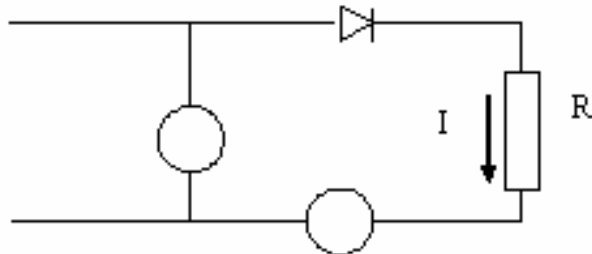


ნახ. 3.1.1



ნახ. 3.1.2

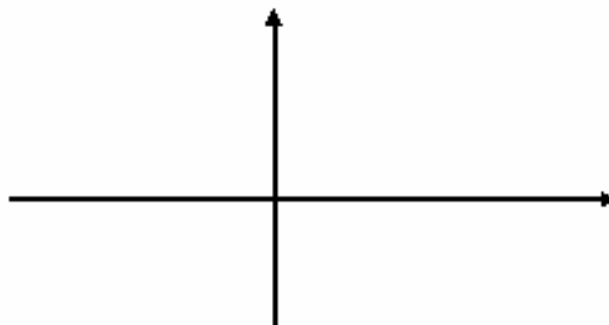
დიოდის შესწავლის მიზნით განვიხილოთ ნახ. 3.1.3-ზე ნაჩვენები სქემა.  $I=f(U)$



ნახ. 3.1.3

მახასიათებელს ეწოდება დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი. თუ დიოდის ანოდზე მოვდებთ პლუს პოტენციალს, ხოლო კათოდზე მინუსს, მაშინ ძაბვის ზრდით დენი არახაზოვნად გაიზრდება. თუ კი ანოდზე მოვდებთ უარყოფით პოტენციალს, ხოლო კათოდზე დადებითს, მაშინ ძაბვის ზრდით დენი ჯერ თითქმის ნულის ტოლია შემდეგ კი მყისიერად იზრდება. პირველ შემთხვევაში დიოდზე მოდებულია პირდაპირი ანუ გამდები ძაბვა, ხოლო მეორე შემთხვევაში უკუ ანუ ჩამკეტი ძაბვა. დიოდი ღია მდგომარეობაშია თუ  $U_a - U_k > 0$  და ჩაკეტილია თუ  $U_a - U_k < 0$ . სადაც  $U_a$  არის ანოდზე მოდებული პოტენციალი, ხოლო  $U_k$  კათოდზე.

დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ნაჩვენებია 3.1.4-ზე. იგი შედგება ორი შტოსაგან: პირდაპირი (დიოდზე მოდებულია პირდაპირი ძაბვა) და უკუ (დიოდზე მოდებულია უკუ ძაბვა).



ნახ. 3.1.4

პირდაპირი ძაბვის შემთხვევაში (მახასიათებლის OA უბანი) ძაბვის ზრდა იწვევს დენის ექსპონენციალურ ზრდას. ეს ზრდა იქამდე გაგრძელდება, სანამ p-n გადასასვლელი არ გადაიწვება (გაწყდება).

უკუძაბვის შემთხვევაში დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი შედგება ორი უბნისაგან. OB უბანზე დიოდში გამავალი დენი თითქმის ნულის ტოლია (ძალიან მცირეა, რომელიც შეიძლება უგულვებელყოთ). მიაღწევს რა უკუ ძაბვა  $U_g$  მნიშვნელობას, ძაბვის შემდგომი ზრდა გამოიწვევს დენის მყისიერ ზრდას (BD უბანი). ამ დროს დიოდი გაიბრუნა, შემცირდა წინაღობა (გახდა ნულის ტოლი) და დენი ამის გამო მყისიერად გაიზარდა.  $U_g$ -ს დიოდის გარღვევის უკუ ძაბვა ეწოდება.

არსებობს დიოდის გარღვევის შემდეგი ოთხი სახე: 1. ზეაური, 2. გვირაბული, 3. თბური, 4. ზედაპირული. პირველ ორ სახეს ხშირად უწოდებენ ელექტრულ გარღვევას.

ზეაური გარღვევა წარმოიქმნება p-n გადასასვლელში ჩქარი ელექტრონების ან ხვრელების მიერ ნეიტრალური ატომების დარტყმითი იონიზაციის შედეგად. ამ დროს წარმოიქმნებიან მუხტის გადამტანის ახალი წყვილები, რომლებიც მოძრაობენ რა გადასასვლელის ელექტრულ ველში, ატომებთან დაჯახებისას კვლავ წარმოქმნიან გადამტანების ახალ წყვილებს და ა.შ., ე.ი. გადამტანები გადასასვლელში ზეავისებურად მრავლდებიან. ამ პროცესის პარამეტრს წარმოადგენს გამრავლების M კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება, როგორც p-n გადასასვლელიდან გამოსული გადამტანების რიცხვის ფარდობა გადასასვლელში შესული იმავე ტიპის გადამტანების რიცხვთან. M კოეფიციენტი შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი ემპირიული ფორმულით:

$$M=1 / [1 - (U/U_{გამრ.})]^a$$

a ხარისხის მაჩვენებელი დამოკიდებულია იმაზე თუ რა მასალისაგანაა დამზადებული ნახევარგამტარი.

გამრღვევი ძაბვის სიდიდე დამოკიდებულია ნახევარგამტარის კუთრ წინაღობაზე და მისი გაზრდით იზრდება, ასევე დამოკიდებულია იმაზე თუ რა მასალისაგანაა დამზადებული ნახევარგამტარი.

გვირაბული გარღვევა ვითარდება იმ შემთხვევაში, თუ p-n გადასასვლელში ელექტრული ველის დაძაბულობა აღწევს  $7 \cdot 10^5$  ვ/სმ რიგის სიდიდეს. ველის ასეთი დიდი დაძაბულობა შესაძლებელია ნახევარგამტარული დიოდის p და n არეებში მინარევის ძალიან მაღალი კონცენტრაციის დროს, როდესაც გადასასვლელის სისქე ხდება ძალიან მცირე (0,01 მკმ რიგის). გარღვევის მიზეზს წარმოადგენს გვირაბული ეფექტი, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ n არის გამტარობის ზონისა და p არის სავალენტო ზონის ელექტრონების ნაწილი ჟონავს p-n გადასასვლელის ენერგეტიკულ ბარიერში თავისი ენერჯის შეუცვლელად. ამ დროს გამრღვევი ძაბვა გადამტანების კონცენტრაციის უკუპროპორციულია, ე.ი. ნახევარგამტარის ორივე არის კუთრი წინაღობის პირდაპირპროპორციულია.

თბური გარღვევა განპირობებულია p-n გადასასვლელის თბური რეჟიმის მდგომარეობის დაკარგვით. თუ უკუ დენის გავლის დროს გამოყოფილი სითბო მეტია იმ სითბოზე, რომელიც შეუძლია გასცეს (გაფანტოს) გადასასვლელმა, მაშინ უკანასკნელის ტემპერატურა იზრდება. ეს კი იწვევს ელექტრონ-ხვრელების დამატებით გენერაციას და უკუ დენის შემდგომ გადიდებას, რაც კიდევ ზრდის ტემპერატურას და ა.შ. ასეთი მზარდი პროცესის შედეგად გადასასვლელი დაუშვებლად ხურდება და ხდება თბური გარღვევა. თბური გარღვევის ძაბვა ძალიან მცირდება გარემოს ტემპერატურის გაზრდით და თბური წინაღობის გადიდებით. თბური გარღვევის დამახასიათებელ თვისებას წარმოადგენს, ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის უკუ შტოზე ვარდნილი უბანი (ნახ. 3.1.4-ზე BC), უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობით.

ზედაპირული გარღვევა დამოკიდებულია p-n გადასასვლელის სისქეზე ზედაპირული მუხტის ზემოქმედებასთან, რომლის დროსაც ამ ადგილას ხდება p-n გადასასვლელის გარღვევა. ასეთი გარღვევისგან თავის დასაცავად საჭიროა ნახევარგამტარის ზედაპირი დაიფაროს დიდი დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე მასალის დამცავი გარსით.

პრაქტიკაში უფრო ხშირად გხვხვდება ზეაური გარღვევა. რაც შეეხება თბურ გარღვევას იგი წარმოიქმნება დიდი უკუდენების დროს.

დიოდი შეიძლება დამზადდეს როგორც ერთი, ისე ორი და მეტი გადასასვლელით. ორგადასასვლელიანი დიოდი არის p-i-n სახის, სადაც სამი მონაცვლე არეა: ხვრელური, საკუთრივი (i) და ელექტრონული გამტარობით. ასეთ დიოდს გააჩნია დიდი დასაშვები უკუძაბვა და დიდი დასაშვები პირდაპირი დენი. უკუძაბვის მოდების დროს i არის წინაღობა

მატულობს, რადგან ელექტრული ველი მისგან შეიწოვს გადამტანებს, რაც იწვევს მასში უკუდენით შექმნილი ძაბვის ვარდნის გადიდებას. პირდაპირი ძაბვის დროს, პირიქით  $i$  არის წინააღობა მცირდება მასში  $n$  არიდან ელექტრონებისა და  $p$  არიდან ხვრელების გადასვლის გამო, ამიტომ  $i$  არის ძაბვის ვარდნა მცირდება.

### 3.2 ნახევარგამტარული დიოდების კლასიფიკაცია

ძირითადი დანიშნულებების მიხედვით არსებობენ შემდეგი სახის დიოდები:

1. გამმართველი, 2. დეტექტორული, 3. შემრევი 4. მოდულატორული, 5. გამამრავლებელი და სხვა. ზემოაღნიშნულ სისწორეზე მომუშავე დიოდებს ეწოდება ზემოაღნიშნული სისწორის დიოდები, ხოლო იმპულსურ რეჟიმში მომუშავე დიოდებს ეწოდებათ იმპულსური დიოდები.

არსებობს აგრეთვე ისეთი დიოდები, რომელთა სახელწოდება დაკავშირებულია დიოდის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებლის გარკვეულ უბანზე მათი მუშაობის თავისებურებაზე. ასეთია, ნახევარგამტარული სტაბილიტრონი, რომლის მუშა უბანია დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გარღვევის უბანი; გვირაბული დიოდი, რომელიც შექმნილია გადაგვარებული ნახევარგამტარის საფუძველზე და მუშა უბანი არის მახასიათებლის ის უბანი სადაც დიფერენციალური წინააღობა არის უარყოფითი; შექცეული დიოდი, რომელიც შექმნილია გადაგვარებული ნახევარგამტარის საფუძველზე, რომლის დენი უკუ ძაბვის დროს განპირობებულია გვირაბული მექანიზმით, ხოლო პირდაპირი ძაბვის დროს მუხტების გადასვლა  $p-n$  გადასასვლელში ხდება მხოლოდ ინჟექციით (გარედან შესვლით). კონსტრუქციის მიხედვით ნახევარგამტარული დიოდები იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად: 1. წერტილოვანი და 2. სიბრტყითი. წერტილოვანი დიოდებს აქვთ წერტილოვანი  $p-n$  გადასასვლელი, ხოლო სიბრტყით დიოდში გადასასვლელი არის სიბრტყითი.

სისწორის მიხედვით დიოდები არის 1. დაბალსიხშირული; 2. საშუალოსიხშირული 3. მაღალსიხშირული.

სიბრტყით დიოდებში  $p-n$  გადასასვლელს აქვს დიდი ფართობი და მნიშვნელოვანი საკუთარი ტევადობა (ათეული პიკოფარადის რიგის), ამის გამო ისინი გამოიყენება მძლავრ, მაგრამ დაბალსიხშირულ ხელსაწყოებში.

წერტილოვანი დიოდებში  $p-n$  გადასასვლელი არის მცირე ფართობის და მცირე საკუთარი ტევადობის (პიკოფარადის მეასედი), ამის გამო ისინი გამოიყენება მაღალ და ზემოაღნიშნულ სიხშირეებზე და გამართული დენი არ აღემატება რამოდენიმე ათეულ მილიამპერს.

სიმძლავრის მიხედვით გამმართველი დიოდები არსებობს შემდეგი სახის: 1. მცირე სიმძლავრის ( $p < 3$  ვტ) 2. საშუალო სიმძლავრის ( $3$  ვტ  $< p < 10$  ვტ) 3. დიდი სიმძლავრის ( $p > 10$  ვტ).

დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის განხილვის დროს ავლნიშნეთ, რომ პირდაპირი დენის უსასრულოდ ზრდა შეუძლებელი, ასევე შეუძლებელია დიოდის უკუ ძაბვის უსასრულო ზრდაც. ამიტომ მის ძირითად პარამეტრებს წარმოადგენს დასაშვანი პირდაპირი დენისა და დასაშვები უკუძაბვის სიდიდე. დიოდის პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით უნდა ვიცოდეთ ის რეჟიმი, რა რეჟიმშიც უნდა იმუშაოს დიოდმა. კერძოდ, რისი ტოლი იქნება პირდაპირი დენი, უკუ ძაბვა, რა სიმძლავრე მოვა მასზე, რა სისწორის დიაპაზონში იმუშავენ და ა. შ., საერთოდ რა მიზნისთვის არის დიოდი გამოსაყენებელი. ყოველივე ამის ცოდნის შემდეგ შესაძლებელია სპეციალური ცნობარიდან შევრიჩით ჩვენთვის საჭირო დიოდის ტიპი.

### 3.3 ნახევარგამტარული სტაბილიტრონები

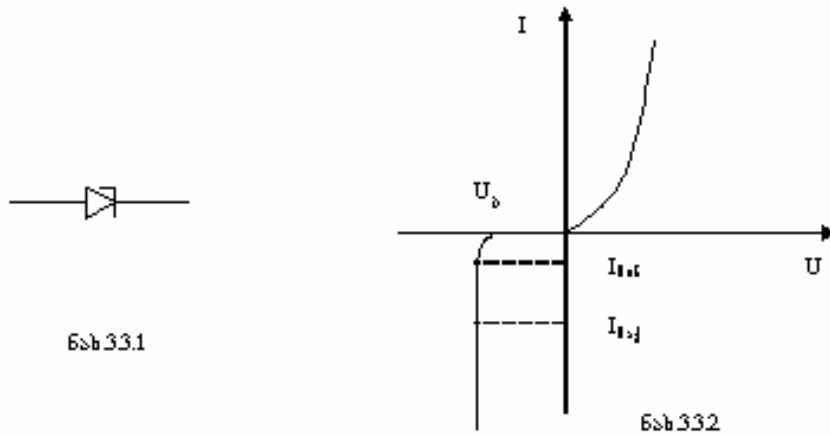
ისეთ დიოდს, რომელსაც მასში გამავალი დენის გარკვეულ ფარგლებში ცვლილების დროს შეუძლია მოგვცეს მუდმივი (სტაბილური) ძაბვა სტაბილიტრონი ეწოდება. სტაბილიტრონი მასთან პარალელურად მიერთებულ დატვირთვის წინააღობაზე ინარჩუნებს სტაბილურ ძაბვას, როდესაც იცვლება კვების ძაბვა ან დატვირთვის წინააღობა. იგი წარმოადგენს ძლიერად ლეგირებული სილიციუმისგან დამზადებულ სიბრტყით დიოდს. სტაბილიტრონის მუშაობისთვის გამოიყენება გარღვევის უბანი ვოლტ-ამპერული

მახასიათებლის უკუ შტოზე, რომელზეც უკუ ძაბვის მცირედი ცვლა იწვევს უკუ დენის მკვეთრ ცვლილებას.

სილიციუმის გამოყენება სტრბილიტრონის დამზადების დროს გამოწვეულია იმით, რომ მას გააჩნია მცირე უკუ დენი სანამ იგი გაირღვევა, ამის გამო გარღვევის წინ სტაბილიტრონი არ ცხელდება, გარღვევის რეჟიმში გადადის საკმაოდ სწრაფად და გარღვევის უბნის მახასიათებელი გადის თითქმის ვერტიკალურად, არ გაჩნია უარყოფითი დახრა.

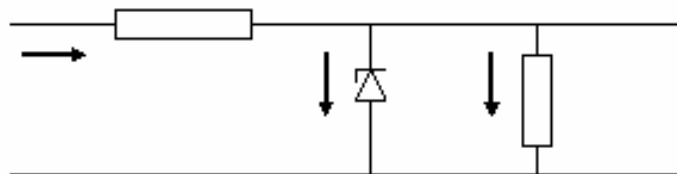
სტაბილიტრონში გარღვევის მექანიზმი შეიძლება იყოს გვირაბული, ზვაური და შერეული (გვირაბულ-ზვაური). გარღვევის სახე დამოკიდებულია სტაბილიტრონის იმ ფენის კუთრ წინააღობაზე, რომელშიც გადადიან მუხტის არაძირითადი გადამტანები. თუ აღნიშნული ფენის (ბაზის) წინააღობა არის ძალიან მცირე (დაბალვოლტიანი სტაბილიტრონი), მაშინ ადგილი აქვს გვირაბულ (ზენერულ) გარღვევას, ხოლო თუ მაღალვოლტიანი (მაღალი ძაბვის სტაბილიტრონი), მაშინ ადგილი აქვს ზვაურ გარღვევას, ან რაც იგივეა მინარევის დიდი კონცენტრაციის შემთხვევაში გადასასვლელი არის თხელი და მასში აღიძვრება დიდი დაძაბულობის ელექტრული ველი, რომელიც იწვევს გვირაბულ გარღვევას. მინარევის მცირე კონცენტრაციის შემთხვევაში გადასასვლელს აქვს დიდი სისქე და გარღვევა არის ზვაური. გარღვევის ძაბვის სიდიდე დამოკიდებულია მასალის კუთრ წინააღობაზე, რაც უფრო ნაკლებია კუთრი წინააღობა მით ნაკლებია გამრღვევი ძაბვა.

დღეისათვის წარმოება უშვებს სილიციუმის ბაზაზე დამზადებულ სხვადასხვა სახის სტაბილიტრონებს. სტაბილიტრონის პირობით აღნიშვნა ნაჩვენებია ნახ. 3.3.1-ზე ხოლო ნახ. 3.3.2-ზე ნაჩვენებია მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.



სტაბილიტრონის დასაწყის მომენტში გარღვევის პროცესი არამდგრადია, დროდადრო წყდება, როდესაც დენის მნიშვნელობა მიაღწევს  $I_{z1}$  და გახდება მეტი, მხოლოდ მაშინ ხდება იგი მდგრადი. სტაბილიტრონის მუშა დენის ინტერვალს ირჩევენ  $I_{z1}$ -დან  $I_{z2}$  ინტერვალში.  $I_{z2}$  განისაზღვრება სტაბილიტრონზე მოსული მაქსიმალური დასაშვები სიმძლავრით.

სტაბილიტრონს აერთებენ  $R_{\Sigma}$  დატვირთვის წინააღობას პარალელურად, ხოლო მასთან მიმდევრობით რთავენ  $R_{სტ}$  სტაბილიზაციის წინააღობას და ანოდს აწვდიან უარყოფით პოტენციალს ე.ი. სტაბილიტრონს წრედში რთავენ უკუ მიმართულებით. მისი ჩართვის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.3.3-ზე.  $R_{სტ}$  წინააღობის გარეშე სქემას არ შეუძლია შეასრულოს სტაბილიზაციის ფუნქცია.  $R_{სტ}$  გამავალი დენის ცვლილებისას მასზე ძაბვის



ნახ. 3.3.3

ვარდნა იცვლება ისე, რომ გამოსასვლელი ძაბვა რჩება სტაბილიზირებული. დენის ცვლილებების მიზეზი შეიძლება იყოს როგორც დატვირთვის წინაღობის ცვლილება ისე კვების წყაროს ძაბვის ცვლილება. ცხადია ეს ცვლილება უნდა იყოს ისეთი, რომ  $I_{სტ}$  არ გამოვიდეს  $I_{ინ}-I_{აქ}$  ფარგლებიდან, წინააღმდეგ შემხვევაში გამოსასვლელი ძაბვის სტაბილიზაცია ვერ მოხერხდება.

ნახ. 3.3.3-ზე მოყვანილი სქემა მუშაობს შემდეგნაირად: დავუშვათ, რომ დატვირთვის წინაღობა შემცირდა, ამის გამო გაიზარდა დატვირთვის დენი, ძაბვის ვარდნა  $R_{სტ}$  წინაღობაზე და სტაბილიტრონში გამავალი დენი. მაგრამ თუ სტაბილიტრონში გამავალი დენი არ გადააჭარბებს  $I_{აქ}$  მაშინ დატვირთვაზე ძაბვა იქნება უცვლელი. თუ დატვირთვის წინაღობა გაიზარდა, ამის გამო შემცირდება დატვირთვის დენი, ძაბვის ვარდნა  $R_{სტ}$  წინაღობაზე და სტაბილიტრონში გამავალი დენი. სტაბილიტრონში გამავალი დენი თუ არ იქნება  $I_{ინ}$  ნაკლები, მაშინ დატვირთვაზე ძაბვა იქნება უცვლელი. ანალოგიურად იმუშავებს სქემა მაშინ როდესაც შეიცვლება მკვებავი ძაბვა.

ამრიგად ზემოთ მოყვანილ სქემაში დატვირთვის ცვლილებასთ ერთად იცვლება ძაბვის ვარდნა  $R_{სტ}$  წინაღობაზე ისე, რომ დატვირთვაზე ძაბვა არის მუდმივი. ცხადია დატვირთვა უნდა იცვლებოდეს ისეთ ფარგლებში, რომ დენი არ უნდა გამოდიოდეს  $I_{ინ}-I_{აქ}$  ფარგლებიდან.

თანამედროვე წარმოება უშვებს სტაბილიტრონებს სხვადასხვა ძაბვებზე და სიმძლავრეებზე. მისი შერჩევა ხდება კონკრეტული გამოყენების სფეროსა და თავისი პარამეტრების მიხედვით. სტაბილიტრონის პარამეტრებია: სტაბილიზაციის ძაბვა; დიფერენციალური წინაღობა, სტატიკური წინაღობა, ხარისხის კოეფიციენტი და დასაშვები სიმძლავრე.

### 3.4 ვარიკაპი

ვარიკაპი არის ელექტრონული ხელსაწყო, რომლის ტევადობის ცვლილება შეიძლება მასზე ძაბვის ცვლილების შედეგად.

ვარიკაპი არის ნახევარგამტარული დიოდი, რომელზეც მიეწოდება მისი ტევადობის საშუალო მნიშვნელობის განმსაზღვრელი უკუ ძაბვა. გადასასვლელის საწყისი ტევადობა  $U_{უკუ}=0$  ძაბვის დროს განისაზღვრება გადასასვლელის გეომეტრიული ზომებით, ნახევარგამტარის კუთრი წინაღობით და დამზადების ტექნოლოგიით. ვარიკაპს უნდა ჰქონდეს ძაბვისაგან დამოკიდებული ტევადობის ცვლილების დიდი დიაპაზონი.

ვარიკაპებს ამზადებენ წერტილოვანი დიოდების ან თხელხაზიანი სიბრტყითი დიოდების (20მკმ რივის) სახით. მის ძირითად პარამეტრებს წარმოადგენს: ტევადობა ნორმალური ძაბვის დროს, ვარვისიანობა, ტევადობის მიხედვით გადაფარვის კოეფიციენტი და ტევადობის ტემპერატურული კოეფიციენტი.

ძაბვის მიხედვით ტევადობის ცვლილების ეფექტი შეიძლება გამოიყენებული იქნეს სიხშირის გამრავლების მიზნისათვის. ამ პრინციპზე მომუშავე დიოდებს უწოდებენ ვარაქტორებს.

### 3.5 გვირაბული დიოდი

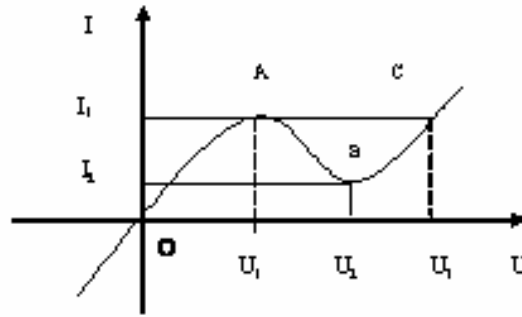
გვირაბული დიოდი დამუშავებული იქნა (1958-1959) წლებში, იაპონელი ფიზიკოსის ესაკის მიერ აღმოჩენილი თვისებების საფუძველზე. მას შეუძლია, ისევე როგორც ტრანზისტორს, გააძლიეროს სიგნალები. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე მას გააჩნია უარყოფითი წინაღობის უბანი. ჩვეულებრივი დიოდებისაგან განსხვავებით ეს უბანი მოთავსებულია მახასიათებლის არა უკუ შტოზე, არამეტ პირდაპირ შტოზე.

გვირაბულ დიოდს ამზადებენ გადაგვარებულ ნახევარგამტარის ბაზაზე. მისი დამზადების დროს რგორც  $p$  არეში ისე  $n$  არეში მინარევი შეჰყავთ ძალიან დიდი კონცენტრაციით (დაახლოებით  $10^{19} \div 10^{20} \text{სმ}^{-3}$ ). ამის გამო გადასასვლელის სიგანე ძალიან მცირეა (0,01 მკმ რივის). გადასასვლელის შიგნით აღიძვრება ( $10^5$ - $10^6$ )ვ/სმ დაძაბულობის ელექტრული ველი.

გვირაბული დიოდის მუშაობას საფუძვლად უდევს გვირაბული ეფექტი, რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ელექტრონს, რომლის ენერგია ნაკლებია, ვიდრე გადასასვლელის

პოტენციალური ბარიერის სიმაღლე, შეუძლია შეაღწიოს ამ გადასასვლელში, ე.ი. ელექტრონი თითქოს სარგებლობს თავისებური გვირაბით რომ გავიდეს ბარიერში ისე, რომ მისმა ენერგიამ არ აიწიოს ბარიერის დონეზე მაღლა.

ნახ. 3.5.1-ზე მოყვანილია გვირაბული დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.



ნახ. 3.5.1

ამ მახასიათებლის თავისებურება მდგომარეობს შემდეგში: უკუ დაბვის დროს დენი დაბვის ზრდით სწრაფად იზრდება. პირდაპირი დაბვის დროს დასაწყისში დაბვის ზრდით დენიც იზრდება (OA უბანი), ხოლო შემდეგი ზრდა იწვევს დენის შემცირებას (AB უბანი). დაბვის შემდგომში ზრდა იწვევს ისევ დენის ზრდას (BC უბანი). AB უბანზე დიოდს გააჩნია უარყოფითი წინაღობა და ე. ი. გვირაბული ეფექტი.  $U_1$  დაბვა არის რამდენიმე ათეული მილივოლტის რიგის, ხოლო  $U_2$  დაბვა რამდენიმე ასეული მილივოლტისა.

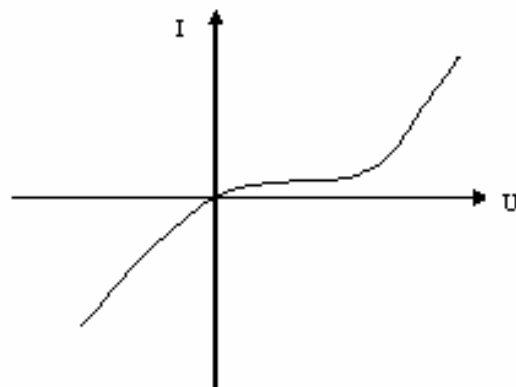
გვირაბული დიოდი ხასიათდება შემდეგი ძირითადი პარამეტრებით:

1.  $I_1/I_2$  დენების ფარდობით; 2. უარყოფითი დიფ. წინაღობის სიდიდით; 3.  $\Delta U_g = U_3 - U_1$  გადართვის დაბვით; 4. დიოდი ბარიერული ტევადობით.

გადასასვლელის ტევადობა შეადგენს  $30 \div -50$  პფ, უარყოფითი დიფერენციალური წინაღობის სიდიდე დამოკიდებულია AB უბნის დახრილობაზე და იგი შეადგენს სიმენსის ერთეულ ან მეასედ ნაწილს. გვირაბულ დიოდს გააჩნია აგრეთვე ინდუქციურობა, რომელიც არის პარაზიტული პარამეტრი და იგი არის  $10^{-10}$  ჰნ რიგის. ცდილობენ, რომ ინდუქციურობა რაც შეიძლება მცირე იყოს.

დღეისთვის გვირაბული დიოდები კონკურენციას ვერ უწევს ტრანზისტორს. მას აქვს თავისი ვიწრო გამოყენების სფერო, როგორცაა ზემოაღნიშნული სისწორის გენერატორები და მაძლიერებლები.

გვირაბული დიოდის საინტერესო სახეა შექცეული დიოდი, რომლის მახასიათებელი ნაჩვენებია ნახ. 3.5.2-ზე. შექცეული დიოდი იმით განსხვავდება გვირაბული დიოდისაგან, რომ მახასიათებლის პირდაპირ შტოზე ან არ არებობს ან ძალიან მცირეა მაქსიმალური წერტილი. თუ შევადარებთ ამ მახასიათებელს ჩვეულებრივ დიოდის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელს დავინახავთ რომ იგი არის შებრუნებული. ე.ი. ჩვეულებრივი დიოდის პირდაპირი შტო არის შექცეული დიოდის უკუ შტო და შესაბამისად უკუ შტო არის პირდაპირი შტო.



ნახ. 3.5.2

შექცეული დიოდის პირდაპირი ძაბვა (ჩვეულებრივი დიოდის უკუ ძაბვის შესაბამისი) არის ძალიან მცირე (ასეული მილივოლტის რიგის), ასევე მცირეა უკუძაბვაც ( $0,3 \pm 0,5$ )ვ. ეს თვისება მრავალ შემთხვევაში არის სასარგებლო.

### 3.6 შოტკის დიოდი

დიოდი, რომელიც დამზადებულია ლითონ-ნახევარგამტარის ბაზაზე შოტკის დიოდი ეწოდება. ასეთ კონტაქტებს და მასში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს 1930-იან წლებში სწავლობდა გერმანელი ფიზიკოსი შოტკი და ასეთ დიოდს მის საპატივცემულოდ ეწოდა შოტკის დიოდი. იგი შექმნილი იქნა 1970-იან წლებში. შოტკის დიოდის შექმნის გზაზე იყო შემდეგი სიძნელეები: ჯერ ერთი, საჭირო იყო მეტალსა და ნახევარგამტარს შორის კონტაქტი სხვა რომელიმე შუალედური ფონის გარეშე; ხოლო მეორე, საჭირო იყო ნახევარგამტარული ფირფიტებს ჰქონოდა მცირე წინაღობა. აღნიშნული სიძნელეები გადალახული იქნა თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენების საფუძველზე. შოტკის დიოდის ძირითადი უპირატესობა  $p-n$  გადასასვლელიან დიოდებთან შედარებით არის ის, რომ პირდაპირი ძაბვის შემთხვევაში ადგილი არ აქვს არა ძირითადი გადამტანის დაგროვებას და გაწოვას. ამის გამო შოტკის დიოდის ინერციულობა განპირობებულია მხოლოდ გადასასვლელის ტევადობით და იგი გადასასვლელის ზომების შემცირების გზით შეიძლება შევამციროთ. მისი მუშაობის სიხშირის დიაპაზონი არის (3-15)გჰც, ხოლო გადართვის (გადასვლა ღია მდგომარეობიდან ჩაკეტილში ან პირიქით) დრო არის 0,1 წმ-ზე მცირე. გარდა ამისა შოტკის დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებზე დენის დიაპაზონი არის უფრო ფართო ვირე  $p-n$  გადასასვლელიანი დიოდის შემთხვევაში. მაგალითად  $I=f(U)$  ლოგარითმული დამოკიდებულება სრულდება  $10^{-12} - 10^{-4}$  ამპერი დენების დიაპაზონში.

ყოველივე ამის გამო შოტკის დიოდი გამოიყენება იმპულსურ რეჟიმში მუშაობის დროს, ზემოდალ სიხშირეებზე და ლოგარითმულ ელემენტებად. დღეისათვის შოტკის დიოდები დამზადებულია 50ა პირდაპირი დენით. ამ დროს ძაბვის ვარდნა შეადგენს მხოლოდ 0,5ვ. ეს მონაცემები ორჯერ მცირეა ვიდრე ჩვეულებრივი სილიციუმის დიოდის.

შოტკის დიოდში ძირითად ნახევარგამტარად გამოიყენება სილიციუმი, ხოლო მეტალად მოლობდენი, ნიქრომი, ოქრო, პლატინა და სხვა.

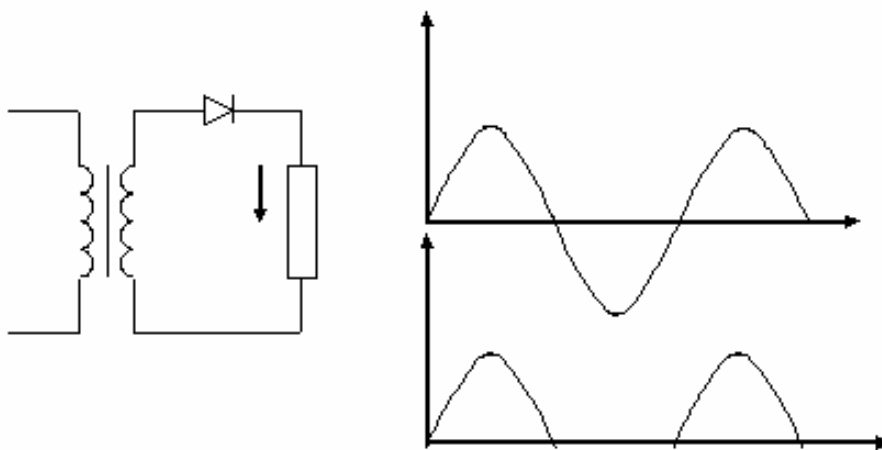
### 3.7 დიოდის პრაქტიკული გამოყენება

პრაქტიკაში დიოდი ფართოდ გამოიყენება. თითქმის არ არსებობს ისეთი ელექტრული ხელსაწყო სადაც დიოდი ამა თუ იმ სახით არ გამოიყენებოდეს. განვიხილოთ დიოდის პრაქტიკული გამოყენების რამოდენიმე მაგალითი.

1. ცვლადი დენის მუდმივად გარდაქმნა.

როგორც ცნობილია ყოფა-ცხოვრებაში გამოიყენება როგორც ცვლადი ისე მუდმივი დენი. ამიტომ საჭიროა შეგვეძლოს ცვლადი დენიდან მუდმივის მიღება და პირიქით. ცვლადი დენი იცვლის როგორც სიდიდეს ისე მიმართულებას, ხოლო მუდმივი დენის როგორც სიდიდე ისე მიმართულება უნდა იყოს მუდმივი. ამიტომ ცვლადი დენიდან რომ მოვიღოთ მუდმივი დენი საჭიროა ჯერ გავხადოთ იგი ერთი მიმართულების, შემდეგ კი მოვახდინოთ მისი გამუდმივება (სტაბილიზაცია). ცვლადი დენი რომ გავხადოთ ერთი მიმართულების დენად (გავმართოდ) საჭიროა გამოვიყენოთ ისეთი ელექტრონული ხელსაწყო, რომელიც დენს მხოლოდ ერთი მიმართულებით გაატატრებს. ასეთი ხელსაწყო კი არის დიოდი.

არსებობს ცვლადი დენის გამართვის ერთნახევარპერიოდიანი და ორნახევარპერიოდიანი სქემები. ნახ. 3.7.1-ზე ნაჩვენებია გამართვის ერთნახევარპერიოდიანი სქემა თავისი დროითი დიაგრამებით.



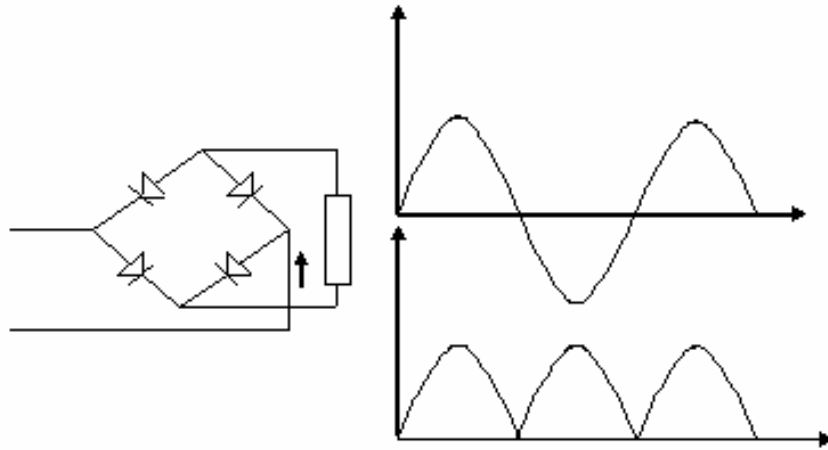
ნახ. 3.7.1

სქემა შედგება ტრანსფორმატორისაგან (ტრ), დიოდისაგან (დ) და  $R_L$  დატვირთვის წინააღობისგან. ტრ-ს დანიშნულებაა დ-ს მივაწოდოთ ისეთი სიდიდის ცვლადი ძაბვა, რომლიდანაც შესაძლებელი იქნება საჭირო მუდმივი ძაბვის მიღება. სქემა მუშაობს შემდეგ ნაირად: ვთქვათ  $t_1$  დროის შუალედში ცვლად ძაბვას აქვს ისეთი პოლარობა, რომ დიოდის ანოდს მიეწოდება დადებითი პოტენციალი, ხოლო კათოდს უარყოფითი. ამ დროს დიოდი ღიაა და დატვირთვაში ნაჩვენები მიმართულებით გადის  $I_L$  დენი.  $t_1 t_2$  შუალედში ცვლადი ძაბვა იცვლის პოლარობას (ანოდს მიეწოდება უარყოფითი პოტენციალი, ხოლო კათოდს დადებითი) და დიოდი იკეტება. ე.ი. დატვირთვაში დენი არ გადის.  $t_2 t_3$  შუალედში ცვლადი ძაბვა ისევ იცვლის პოლარობას და დატვირთვაში გადის დენი და ა. შ.

როგორც დროითი დიაგრამიდან ჩანს დატვირთვაში დენი გადის მხოლოდ პერიოდის ნახევრის დროს, ამიტომ ასეთ აქემას ეწოდება ერთნახევარპერიოდიანი გამართვის სქემა.

ორნახევარპერიოდიანი ანუ ბოგირული გამართვის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.7.2-ზე. (ამ სქემაზე ტრანსფორმატორი არ არის ნაჩვენები. იგი ისე ირთვება, როგორც წინა სქემაზე.) სქემა შეიცავს ოთხ დიოდს და დატვირთვის წინააღობას. იგი მუშაობს შემდეგ ნაირად:  $t_1$  შუალედში  $d_1$  ანოდსა და  $d_4$  კათოდს მიეწოდება დადებითი პოტენციალი, ხოლო  $d_2$  ანოდსა და  $d_3$  კათოდს უარყოფითი პოტენციალი. ამიტომ ღიაა  $d_1$  და  $d_3$  დიოდები, ხოლო ჩაკეტილია  $d_2$  და  $d_4$ . დენი დატვირთვაში გადის შემდეგი გზით: ცვლადი ძაბვის 1 მომჭერი,  $d_1$  დიოდი,  $R_L$  წინააღობა,  $d_3$  დიოდი და ცვლადი ძაბვის 2 მომჭერი.

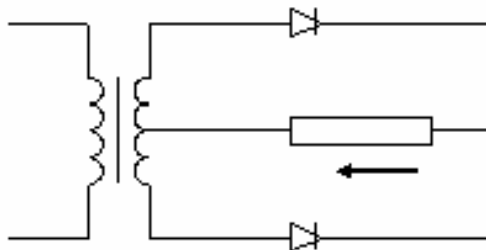




ნახ. 3.7.2

$t_1$  შუალედში ცვლადი ძაბვის პოლარობა იცვლება და  $d_1$  ანოდსა და  $d_4$  კათოდს მიეწოდება უარყოფითი პოტენციალი, ხოლო  $d_2$  ანოდს და  $d_3$  კათოდს დადებითი პოტენციალი. ამიტომ  $d_1$  და  $d_4$ , ხოლო ჩაკეტილია  $d_2$  და  $d_3$  დიოდები. ამ დროს დენი გადის შემდეგი გზით: ცვლადი ძაბვის მე-2 მომჭერი,  $d_2$  დიოდი,  $R_L$  დატვირთვის წინაღობა,  $d_4$  დიოდი და ცვლადი ძაბვის პირველი მომჭერი. როგორც დროითი დიაგრამიდან ჩანს დატვირთვაში დენი გადის ორივე ნახევარ პერიოდში ერთი და იგივე მიმართულებით. ასეთ დენს პულსირებული დენი ეწოდება.

არსებობს ორნახევარპერიოდიანი გამმართვის სქემა, სადაც გამოყენებულია ორი დიოდი და ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის შუა გამოძყვანი. ასეთი სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.7.3-ზე. მისი დროითი დიაგრამა ანალოგიურია ბოგირული სქემის დროითი დიაგრამის, ხოლო მუშაობის პრინციპში ის განსხვავდება, რომ პერიოდის ნახევარში დენის გატარებაში მონაწილეობას იღებს მხოლოდ თითო დიოდი.

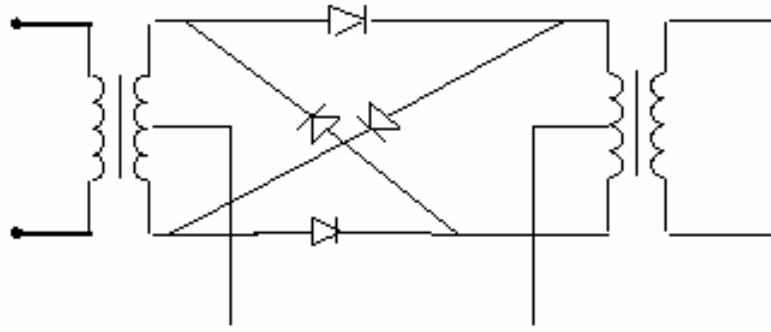


ნახ. 3.7.3

რაც შეეხება გამართული დენის სიდიდის გამუდმივებას (სტაბილიზაციას), მას განვიხილავთ შემდეგ პარაგრაფში.

## 2. სიგნალის სიხშირის შეცვლა

არსებობს ისეთი სქემები, რომელთა საშუალებით შესაძლებელია ელექტრულ სიგნალის სიხშირის შეცვლა. იმ სქემას, რომელიც ზრდის სიგნალის სიხშირეს ეწოდება მოდულიატორი, ხოლო რომელიც ამცირებს დემოდულიატორი. მათი ელექტრული სქემა და მუშაობის პრინციპი არის ერთი და იგივე. განვიხილოთ მოდულიატორის მუშაობის პრინციპი. მოდულიატორის ერთ-ერთი სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.7.4-ზე. იგი შესდგება ორი ტრანსფორმატორისა (ტრ1 და ტრ2) და ოთხი დიოდისაგან. ამ სქემას ეწოდება სიხშირის ორმაგი ბალანსური გარდამქმნელი ან რაც იგივეა წრიული გარდამქმნელი. ტრ1-ს პირველად გრაგნილს მიეწოდება ის სიგნალი, რომლის სიხშირეც უნდა გაიზარდოს. იგი ჩაიწერება ასე  $e_1 = E_1 \sin 2\pi f t$ . ტრ2-ის მეორად გრაგნილიზე მივიღებთ გაზრდილი სიხშირის სიგნალს. ტრ1-ის მეორადი და ტრ2-ის პირველადი გრაგნილის შუა წერტილებში



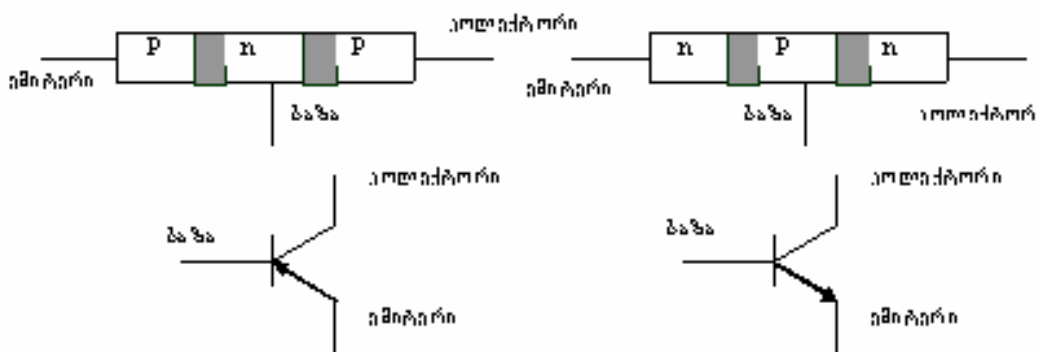
ნახ. 3.7.4

მიეწოდება სიგნალი, რომლის საშუალებითაც ხდება სიხშირის გაზრდა. ამ სიგნალს გადამტანი სიგნალი ანუ გადამტანი სიხშირე ეწოდება. იგი არის გარკვეული მუდმივი სიხშირის სინუსოიდური ფორმის სიგნალი და ასე ჩაიწერება  $e_g = E_g \sin 2\pi Ft$ . იმ სიგნალის სიხშირე, რომლის სიხშირეც უნდა გაიზარდოს შეიძლება იცვლებოდეს. თუ სიხშირე იზრდება, მაშინ გადამტანი სიხშირე მეტი უნდა იყოს ვიდრე შესაცვლელი სიგნალის სიხშირე. ხოლო თუ სიხშირე მცირდება, მაშინ პირიქით. ამ ორი სიგნალის შერევის დროს დატვირთვაში მიიღება დენი, რომელიც ტოლია  $I_{\Sigma}(t) = e_{\Sigma}(t)n_1GH(t)n_2$  სადაც  $G = 1/(R_{\Sigma} + R_{\text{დ}})$ ,  $n_1$  და  $n_2$  არის შესაბამისად პირველი და მეორე ტრანსფორმატორების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, ხოლო  $H(t)$  არის ჩართვის ფუნქცია რომელსაც აქვს მიმდევრობითი სწორკუთხა იმპულსების სახე. თუ ამ ფუნქციას გავშლით ფურიეს მწკრივის სახით, მაშინ დავინახავთ, რომ იგი შეიცავს გადამტანი სიხშირის ჯერად სხვადასხვა სიხშირის სინუსოიდურ სიგნალებს. ამრიგად ტრ-2-ს მეორად გრაგნილზე მივიღებთ გაზრდილი სიხშირის სიგნალებს. თუ ამ გრაგნილს მივეურთებთ შესაბამის ზოლოვან ფილტრს, მაშინ ამ ფილტრის გამოსასვლელზე მივიღებთ საჭირო სიხშირის სიგნალს.

### 3.8 ტრანზისტორი

ტრანზისტორი ეწოდება ნახევარგამტარულ ხელსაწყოს, რომელიც გამოიყენება სუსტი ელექტრო სიგნალების გასაძლიერებლად. იგი 1949-1950 წლებში დამუშავებული იქნა ამერიკელი მეცნიერის ვ. შოკლის მიერ. ტრანზისტორის ყველაზე უფრო გავრცელებულ ტიპს წარმოადგენს სიბრტყითი ტრანზისტორი, რომელიც წარმატებით გამოიყენება როგორც გაძლიერების ისე გასაღების რეჟიმში მუშაობის დროს. იგი არის ელექტრონული სქემის უნივერსალური ელემენტი.

ტრანზისტორი წარმოადგენს ორ გადასასვლელიან ხელსაწყოს. გადასასვლელები წარმოიქმნებიან იმ სამი ფენის საზღვრებზე, რომელთაგანაც შესდგება იგი. ტრანზისტორი შემადგენელი ფენების მიხედვით არის ორი ტიპის p-n-p და n-p-n. ნახ. 3.8.1-ზე და ნახ. 3.8.2-ზე შესაბამისად ნაჩვენებია p-n-p და n-p-n ტიპის ტრანზისტორების სტრუქტურული და სქემური აღნიშვნები.



ნახ. 3.8.1

ნახ. 3.8.2

ტრანზისტორის ერთ გადასასვლელზე მოდებულია პირდაპირი ძაბვა, ხოლო მეორეზე უკუ ძაბვა. იმ გადასასვლელის გარე ფენას, რომელზეც მოდებულია პირდაპირი ძაბვა ეწოდება ემიტერი (ე), ხოლო რომელზეც მოდებულია უკუ ძაბვა ეწოდება კოლექტორი (კ). შუა ფენას კი ბაზა (ბ) ეწოდება. ბაზის სისქე ყოველთვის მცირეა ვიდრე კოლექტორის ან ემიტერის. ემიტერიდან ხდება ბაზაში მუხტის ძირითადი გადამტანების გადასვლა, ხოლო კოლექტორი მათ აგროვებს. იმის გამო, რომ ადგილი ჰქონდეს კოლექტორში მუხტების შეგროვებას საჭიროა ბაზის სისქე იყოს საკმარისად მცირე. წინააღმდეგ შემთხვევაში ემიტერიდან გადასული მუხტები მოასწრებენ ბაზაში მთლიან რეკომბინაციას და ვეღარ მიაღწევენ კოლექტორამდე.

აღსანიშნავია, რომ ტრანზისტორი არის შებრუნებული ხელსაწყო, რაც იმას ნიშნავს, რომ თეორიულად შესაძლებელია ემიტერისა და კოლექტორის ადგილების შეცვლა. ეს შესაძლებელია იმიტომ, რომ ისინი არიან ერთნაირი ტიპის ნახევარგამტარები. მაგრამ, რადგან ემიტერისა და კოლექტორის ფენები რეალურად არასიმეტრიული სტრუქტურისაა და ასევე სხვადასხვა ნივთიერებისაგანაა დამზადებული, ამიტომ მათი ადგილების შეცვლა დაუშვებელია.

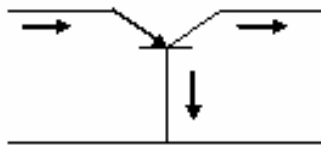
არსებობს ტრანზისტორის მუშაობის შემდეგი რეჟიმები: 1. აქტიური 2. წაკვეთის 3. გაჯერების 4. ინვერსიული.

ტრანზისტორის მუშაობის აქტიური რეჟიმი გამოიყენება მცირე სიგნალების გასაძლიერებლად. ამ რეჟიმში ემიტერ-ბაზა გადასასვლელს მიეწოდება რამოდენიმე ათეული ვოლტი პირდაპირი ძაბვა, ხოლო კოლექტორ-ბაზა გადასასვლელს რამოდენიმე ათეული ან ასეული ვოლტი უკუ ძაბვა.

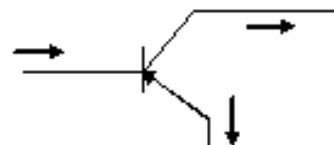
წაკვეთის რეჟიმში ორივე გადასასვლელს მიეწოდება უკუ ძაბვა. ამ რეჟიმში ტრანზისტორი ჩაკეტილია. გაჯერების რეჟიმში ორივე გადასასვლელს მიეწოდება პირდაპირი ძაბვა და ტრანზისტორი ღიაა. ეს ორივე რეჟიმი გამოიყენება ტრანზისტორის გადამრთველად მუშაობის დროს.

ინვერსიულ რეჟიმში ემიტერი და კოლექტორი ცვლიან თავიანთ როლებს, ემიტერი ხდება კოლექტორი და პირიქით.

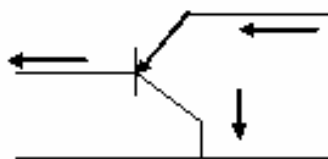
არსებობს ტრანზისტორის ჩართვის სამი სქემა: 1. საერთო ბაზით 2. საერთო ემიტერით 3. საერთო კოლექტორით. აღნიშნული ჩართვის სქემები p-n-p ტიპის ტრანზისტორისათვის შესაბამისად ნაჩვენებია ნახ. 3.8.3-ზე, ნახ. 3.8.4-ზე და ნახ. 3.8.5-ზე. ანალოგიურად იქნება n-p-n ტრანზისტორისთვისაც.



ნახ. 3.8.3



ნახ. 3.8.4



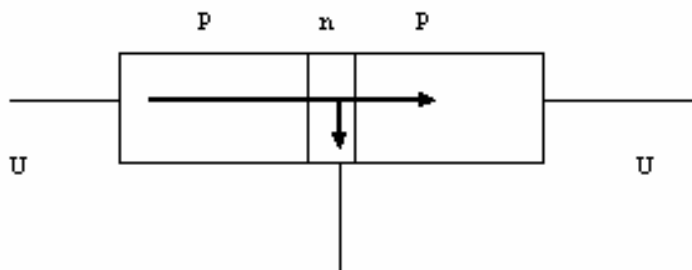
ნახ. 3.8.5

პრაქტიკაში ყველაზე უფრო ხშირად გამოიყენება ტრანზისტორის საერთო ბაზით და საერთო ემიტერით ჩართვის სქემები.

ტრანზისტორის მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში: როგორც ავლნიშნეთ ემიტერ-ბაზა გადასასვლელზე მოდებულია პირდაპირი ძაბვა, ამიტომ ემიტერიდან ბაზაში გადადიან მუხტის ძირითადი გადამტანები (ბაზისათვის არაძირითადი გადამტანები) და ისინი ნაწილობრივ რეკომბირდებიან ბაზის ძირითად გადამტანებთან (ბაზის მცირე სისქის გამო მისი ძირითადი გადამტანების რაოდენობა გაცილებით მცირეა ვიდრე ემიტერის ძირითადი გადამტანებისა). კოლექტორ-ბაზა გადასასვლელზე კი მოდებულია უკუ ძაბვა. ეს ძაბვა უკუ არის ბაზისა და კოლექტორის ძირითადი გადამტანებისთვის, ხოლო ბაზაში მოხვედრილი ემიტერის ძირითადი გადამტანებისათვის არის პირდაპირი. ამის გამო ბაზაში

რეკომბინირების გარეშე დარჩენილი ემიტერის ძირითადი გადამტანები გადავლიან კოლექტორში და მასში გაივლის კოლექტორული დენი. თუ ვცვლით ბაზის პოტენციალს, მაშინ შეიცვლება ბაზაში გარედან შეტანილი ძირითადი გადამტანების რაოდენობა და შესაბამისად შეიცვლება რეკომბინირებული მუხტების რაოდენობაც. ამის გამო შეიცვლება ბაზაში რეკომბინაციის გარეშე დარჩენილი ემიტერის ძირითადი გადამტანების რაოდენობა და ამასთანავე კოლექტორში გადასული მუხტის გადამტანების რაოდენობაც. ე.ი. შესაბამისად შეიცვლება კოლექტორული დენიც. ამრიგად, ბაზის პოტენციალის მცირე ფარგლებში ცვლილების შედეგად შესაძლებელია დიდ ფარგლებში ვცვალოთ კოლექტორული დენი და შესაბამისად გავაძლიეროთ ემიტერ-ბაზაზე მოდებული სუსტი სიგნალი.

ნახ. 3.8.6-ზე ნაჩვენებია ტრანზისტორში დენის განაწილების სქემა. როგორც



ნახ. 3.8.6

ნახაზიდან ჩანს  $I_e = I_b + I_c$  და  $I_b$  გაცილებით მცირეა ვიდრე  $I_e$  და  $I_c$ .  $I_b$ -ს ცვლილებით შეიძლება ვცვალოთ  $I_c$ .

### 3.9 ტრანზისტორის პარამეტრები და მახასიათებლები

ტრანზისტორის ძირითად პარამეტრებს მიეკუთვნება:

1. ემიტერული დენის დიფერენციალური კოეფიციენტი  

$$\alpha = dI_c / dI_e \text{ როდესაც } U_c = \text{Const}$$
2. ემიტერული გადასასვლელის დიფერენციალური წინაღობა  

$$r_e = dU_c / dI_e \text{ როდესაც } U_c = \text{Const}$$
3. კოლექტორული გადასასვლელის დიფერენციალური წინაღობა  

$$r_c = dU_c / dI_c \text{ როდესაც } I_e = \text{Const}$$
4. ძაბვის მიხედვით შიგა უკუკავშირის კოეფიციენტი  

$$\mu_{\text{გკ}} = dU_c / dU_e \text{ როდესაც } I_e = \text{Const}$$

იგი გვიჩვენებს თუ როგორ გავლენას ახდენს კოლექტორული ძაბვა ემიტერულზე.

5. ბაზის მოცულობითი წინაღობა  $r_b$ .
6. ტრანზისტორის სითბური დენი  $I_{\text{თ}}$ .
7. ბაზური დენის დიფერენციალური კოეფიციენტი  

$$\beta = dI_c / dI_b \text{ როდესაც } U_c = \text{Const}$$

$\alpha$ -ს უწოდებენ აგრეთვე დენის გაძლიერების კოეფიციენტს ტრანზისტორის საერთო ბაზით ჩართვის დროს. რადგან  $I_c > I_b$ , ამიტომ  $\alpha < 1$ .  $\beta$ -ს კი უწოდებენ დენის გაძლიერების კოეფიციენტს ტრანზისტორის საერთო ემიტერით ჩართვის დროს. რადგან  $I_c > I_b$ , ამიტომ  $\beta > 1$ . ვიცით, რომ  $I_e = I_b + I_c$ , ამიტომ

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

აქედან ცხადია, რომ საერთო ემიტერით ჩართვის დროს ტრანზისტორის გაძლიერების კოეფიციენტი არის დიდი, ამიტომ ასეთი ჩართვის სქემა პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება სუსტი სიგნალების გასაძლიერებლად.

ტრანზისტორის პარამეტრები საერთო ემიტერით ჩართვის დროს ხასიათდებიან  $I_b$ ,  $U_b$ ,  $I_c$ ,  $U_c$  სიღრმეების ურთიერთდამოკიდებულებით. პრაქტიკაში ყველაზე უფრო მიზანშეწონილია შემდეგი დამოკიდებულებები:

$$U_b = f(I_b, U_j) \text{ და } I_j = f(I_b, U_j)$$

ამ ორი დამოკიდებულებიდან გამომდინარეობს შემდეგი ტოლობები:

$$\Delta U_b = \partial U_b / \partial I_b \Delta I_b + \partial U_b / \partial U_j \Delta U_j$$

$$\Delta I_j = \partial I_j / \partial I_b \Delta I_b + \partial I_j / \partial U_j \Delta U_j$$

ან რაც იგივეა

$$\Delta U_b = h_{11} \Delta I_b + h_{12} \Delta U_j$$

$$\Delta I_b = h_{21} \Delta I_b + h_{22} \Delta U_j$$

სადაც  $h_{ik}$  პარამეტრები არის შემდეგი:  $h_{11} = \partial U_b / \partial I_b$  – ტრანზისტორის შესასვლელი წინაღობა მუდმივი კოლექტორული ძაბვის დროს. იგი 100-1000 ომის ფარგლებშია.  $h_{12} = \partial U_b / \partial U_j$  არის უკუკავშირის კოეფიციენტი  $I_b = \text{Const}$  შემთხვევაში. იგი ასახავს კოლექტორული ძაბვის გავლენას ბაზის წრედზე. იგი ძალიან მცირეა (0,002-0,0002), ამიტომ ნულის ტოლიც შეიძლება ჩავთვალოთ.  $h_{21} = \partial I_j / \partial I_b = \beta$  არის დენის მიხედვით გაძლიერების კოეფიციენტი, როცა  $U_j = \text{Const}$ .  $h_{22} = \partial I_j / \partial U_j$  არის ტრანზისტორის გამოსასვლელი გამტარობა, როცა  $I_b = \text{Const}$ .

ტრანზისტორის სხვადასხვა ჩართვის სქემებისთვის  $h_{ik}$  პარამეტრებს სხვადასხვა მნიშვნელობა აქვს, რომელთა შორის ცალსახა მათემატიკური კავშირია და ჩართვის სქემის შეცვლის შემთხვევაში ადვილად შეიძლება მოვახდინოთ მისი გადაანგარიშება.

$r_{je}$ ,  $r_j$  და  $r_b$  პარამეტრები დამოკიდებულია ტრანზისტორის სახეზე და არ არის დამოკიდებული მისი ჩართვის სქემაზე. ისინი ახასიათებენ ტრანზისტორის ფიზიკურ თვისებებს და ყოველი კონკრეტული ტრანზისტორისთვის შესაძლებელია მათი გაზომვა.

დამოკიდებულებას ტრანზისტორის დენებსა და ძაბვებს შორის ტრანზისტორის მახასიათებელი ეწოდება. არსებობს ტრანზისტორის ოთხი სახის მახასიათებელი:

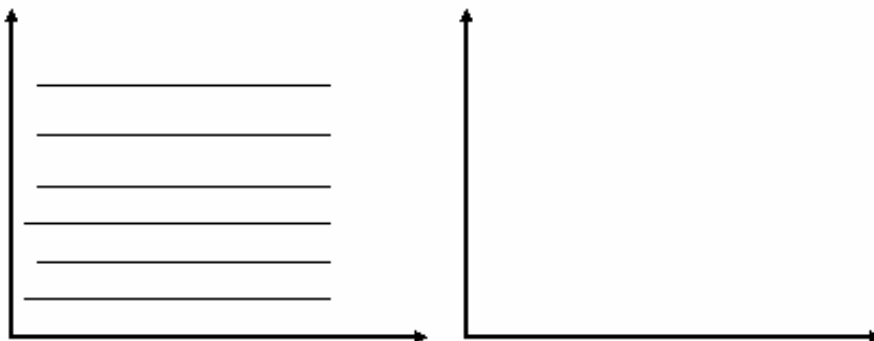
1. შესასვლელი, რომელიც ტრანზისტორის შესასვლელზე აკავშირებს დენისა და ძაბვის სიდიდეებს. 2. პირდაპირი გადაცემის მახასიათებელი, რომელიც ასახავს გამოსასვლელი დენისა და ძაბვის დამოკიდებულებას შესაბამისად შესასვლელის დენსა და ძაბვაზე. 3. უკუკავშირის მახასიათებელი, რომელიც ასახავს შესასვლელი დენისა და ძაბვის დამოკიდებულებას შესაბამისად გამოსასვლელ დენსა და ძაბვაზე. 4. გამოსასვლელი, რომელიც ასახავს დამოკიდებულებას გამოსასვლელ დენსა და ძაბვას შორის. აღნიშნული მახასიათებლები მათემატიკურად ასე ჩაიწერება:

1.  $U_{შეს} = f(U_{შეს})$  2.  $I_{გამ} = f(I_{შეს})$  ან  $U_{გამ} = f(U_{შეს})$  3.  $I_{შეს} = f(I_{გამ})$  ან  $U_{შეს} = f(U_{გამ})$  4.  $I_{გამ} = f(U_{გამ})$ .

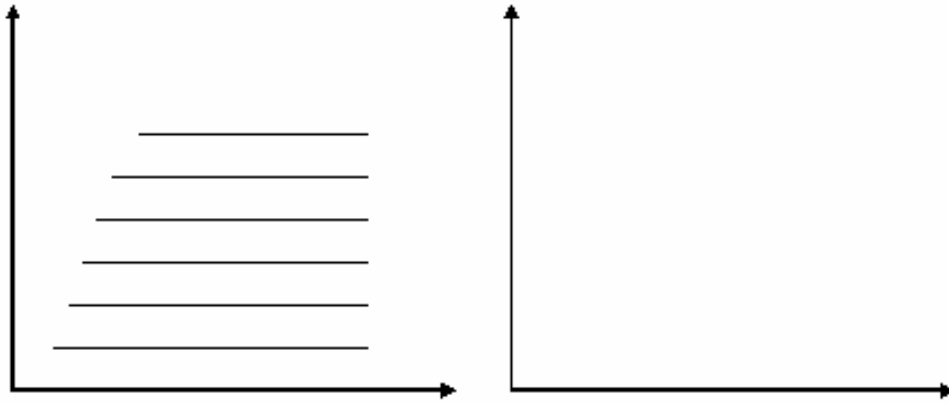
ტრანზისტორული წრედის ანალიზისთვის საკმარისია გვექონდეს ორი მახასიათებელი შესასვლელი და გამოსასვლელი, ხოლო დანარჩენი ორი ადვილად მიიღება ამ ორი მახასიათებლიდან. ამიტომ ტრანზისტორული წრედისათვის შესასვლელი და გამოსასვლელი მახასიათებლები არის ძირითადი მახასიათებლები.

ტრანზისტორის მახასიათებლების სახე დამოკიდებულია მის ჩართვის სქემაზე. რადგან პრაქტიკაში ყველაზე უფრო გამოიყენება საერთო ბაზით და საერთო ემიტერით ჩართვის სქემები, ამიტომ ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ ამ სქემების შესაბამის შესასვლელ და გამოსასვლელ მახასიათებლებს. საერთო კოლექტორით ჩართვის მახასიათებელი მცირედ განსხვავდება საერთო ემიტერით ჩართვის მახასიათებლისგან.

ნახ. 3.9.1-ზე მოყვანილია საერთო ბაზით ჩართული ტრანზისტორის გამოსასვლელი მახასიათებელი სხვადასხვა მუდმივი ემიტერული დენის დროს და შესასვლელი მახასიათებელი სხვადასხვა მუდმივი კოლექტორული ძაბვის დროს.



ნახ. 3.9.1



ნახ.39.2

გამოსასვლელი მახასიათებელი სხვადასხვა მუდმივი ბაზური დენის დროს და შესასვლელი მახასიათებელი სხვადასხვა მუდმივი კოლექტორული ძაბვის დროს. გ გამოსასვლელ ან შესასვლელ მახასიათებლების ერთობლიობას, რომელებიც გადაღებული არიან შესაბამისად სხვადასხვა  $I_b$ ,  $I_c$  და  $U_c$  სიდიდეების შემთხვევაში ეწოდება ტრანზისტორის გამოსასვლელ ან შესასვლელ მახასიათებელთა ოჯახი.

ტრანზისტორის პარამეტრები და მახასიათებლები დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. ტემპერატურის ზრდით პარამეტრებიც იზრდება. ამიტომ ეს მოვლენა ტრანზისტორული სქემის აგების დროს უნდა იქნას გათვალისწინებული.

ტრანზისტორის გამაძლიერებელი თვისებები განისაზღვრება იმ მასალის თვისებებით, რომლისაგანაც იგი მზადდება, მისი წარმოების ტექნოლოგიით, კონსტრუქციით, მუშაობის რეჟიმით და ჩართვის სქემით. სიხშირის ზრდით გამაძლიერებელი თვისებები უარესდება. ეს იმას ნიშნავს, რომ მცირდება გაძლიერების სიდიდე, მცირდება გამოსასვლელი სიმძლავრე და წარმოიქმნება ფაზური ძვრა (დენი გამოსასვლელზე დაგვიანებულია შესასვლელთან შედარებით). ტრანზისტორის მუშა ს  $\Delta$  იხშირეების დიაპაზონზე გაეღენას ახდენს შემდეგი პარამეტრები: 1. ბაზის არეში არაძირითადი გადაძვრების ემიტერული გადასავლელიდან კოლექტორამდე გარბენის დრო. 2. ემიტერული და კოლექტორული გადასავლელების ტევადობები. 3. ბაზის გეომეტრული ზომებით განსაზღვრული  $r_b$  წინაღობა. მაღალსიხშირული ტრანზისტორის დამზადების დროს ცდილობენ, რომ ეს პარამეტრები იყოს რაც შეიძლება მცირე.

ყველა ტრანზისტორს გააჩნია საკუთარი ხმაურის მნიშვნელობა, რომელიც არის ორი სახის დაბალსიხშირული და მაღალ სიხშირული. პირველი გამოწვეულია გადასასვლელურში ზედაპირული ეფექტების არსებობით, ხოლო მეორე ფენების წინააღობის ტემპერატურული ფლუქტუაციით და საფანტური ეფექტით.

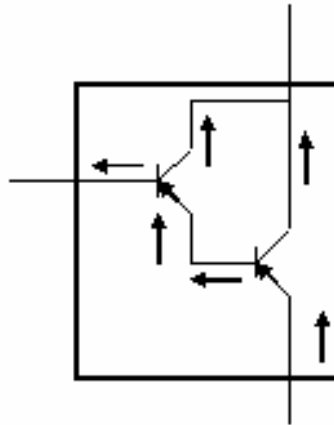
საფანტური ეფექტით გამოწვეული ხმაური გამოითვლება ფორმულით  $i^2=2\rho I\Delta f$  სადაც  $\rho$ -მუხტია;  $I$ -დენია და მისი დისკრეტული სტრუქტურა არის ხმაურის მიზეზი; ხოლო  $\Delta f$  არის სიხშირის ზოლი, რომელშიც გამოითვლება ხმაური. საფანტური ხმაურის სპექტრი არის თანაბარი ე.წ. "თეთრი ხმაური".

სითბური ხმაური გამოითვლება ფორმულით  $e^2=4kTR\Delta f$ . სადაც  $k$  ბოლცმანის მუდმივაა;  $T$ - აბსოლუტური ტემპერატურაა;  $R$ -წინააღობაა, რომელიც არის ხმაურის წყარო;  $e$  არის ექვივალენტური ემპ (ელექტრომაგნიტური ემპი), რომელიც  $R$  წინააღობის მიმდევრობით არის ჩართული. სითბური ხმაური არის ასევე "თეთრი ხმაური" ე.ი გააჩნია თანაბარი სპექტრი.

დაბალსიხშირული ხმაურის სპექტრი არის არათანაბარი, როცა  $f \ll f_m$ , მაშინ ეს ხმაური ჩაიწერება ფორმულით  $i^2=A\Delta f/f^m$ , სადაც  $A$ -კოეფიციენტი და  $m$  ხარისხის მაჩვენებელი მოთავსებულია შუალედში (0,9-1,5).

### 3.10 შედგენილი ტრანზისტორი და ტრანზისტორის ტიპები

ტრანზისტორის  $\beta$  გაძლიერების კოეფიციენტის გასაზრდელად საჭიროა ბაზის სისქის შემცირება, რომელიც ტექნოლოგიურად ძნელი შესასრულებელია. მაგრამ თუ ორ ტრანზისტორს ერთმანეთთან შევაერთებთ გარკვეული სახით, მაშინ შესაძლებელია  $\beta$  გავზარდოთ მნიშვნელოვნად. ორი ტრანზისტორის ასეთ კომბინაციას, რომელიც არის ერთი მთლიანი ტრანზისტორი, ეწოდება შედგენილი ტრანზისტორი ან დარლივტონის სქემა. იგი ნაჩვენებია ნახ. 3.10.1-ზე. ვაჩვენოთ, რომ შედგენილი ტრანზისტორის გაძლიერების  $\beta$  კოეფიციენტი არის გაცილებით მეტი, ვიდრე თითოეული ტრანზისტორის  $\beta_1$  და  $\beta_2$  გაძლიერების კოეფიციენტი ცალკეცაა. მივცეთ ნაზრდი დენს  $dI_b = dI_{b1}$ , მივიღებთ, რომ



ნახ. 3.10.1

$$dI_{e1} = (1 + \beta_1)dI_b = dI_{b2} = dI_{b1} + dI_{e1}$$

$$dI_e = dI_{e1} + dI_{e2} = \beta_1 dI_b + \beta_2 (1 + \beta_1) dI_b$$

გავყოთ  $dI_b$ , მივიღებთ  $dI_e/dI_b = dI_{e1}/dI_b + dI_{e2}/dI_b = \beta_1 + \beta_2(1 + \beta_1)$  ე.ი.  $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2$  რადგან ყოველთვის  $\beta \gg 1$  შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ  $\beta = \beta_1\beta_2$ , რომელიც შეიძლება იყოს რამოდენიმე ათასი.

შედგენილი ტრანზისტორში კომპონენტების რაოდენობა შეიძლება იყოს აგრეთვე სამი.

არსებობს ტრანზისტორის შემდეგი ტიპები: 1. წერტილოვანი 2. სიბრტყითი 3. ზვაური.

პირველად შექმნილი იქნა წერტილოვანი ტრანზისტორი. 1948 წელს ამერიკელი მეცნიერები დ. ბარდნი და ვ. ბრაიტეინი იკვლევდნენ რა წერტილოვან გერმანიუმის დიოდს, მას დაუმატეს ნემსი ანუ ზონდი. აღმოჩნდა, რომ თუ ზონდს მოვდებთ დიდ უკუ ძაბვას, მაშინ დენი ზონდში იცვლება იგივე ნაირად, როგორც ძირითად კონტაქტებში, ხოლო სიმძლავრე ზონდში მეტი იყო ვიდრე ძირითად კონტაქტებში. ეს მოვლენა შემდგომი კონსტრუქციული დახვეწის შედეგად საფუძვლად დაედო ეწერტილოვანი ტრანზისტორის შექმნას. ე.ი. წერტილოვან ტრანზისტორში გადასასვლელის ფართობი არის მცირე ვიდრე მისი სისქე.

შემდგომი კვლევის შედეგად შეიქმნა ბრტყელი ტრანზისტორები. ასეთი ტრანზისტორი აღმოჩნდა უფრო უკეთესი და ამიტომ წერტილოვანი ტრანზისტორებს წარმოება თითქმის აღარ უშვებს.

ზვაურ ტრანზისტორის მუშაობის პრინციპი ემყარება კოლექტორულ გადასასვლელში დარტყმითი (ზვაური) იონიზაციის მოვლენას.

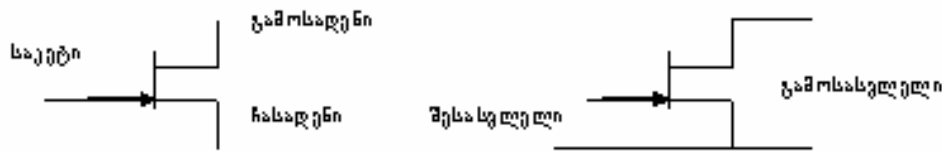
### 3.11 ველიანი ტრანზისტორი

იმის მიხედვით თუ ტრანზისტორის მუშაობაში რა მუხტები იღებენ მონაწილეობას არსებობს ბიპოლარული და უნიპოლარული ტრანზისტორები.

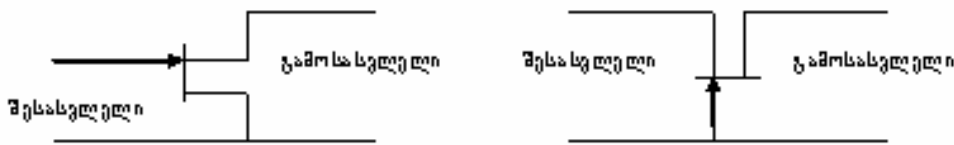
ბიპოლარულია ისეთი ტრანზისტორი, სადაც მუხტის გადამტანებად გამოიყენება როგორც ხვრელები ისე ელექტრონები. ამის გამო წინა პარაგრაფებში განხილული ყველა ტრანზისტორი არის ბიპოლარული.

თუ ტრანზისტორში მუხტის გადამტანებს წარმოადგენს მარტო ხვრელები ან მარტო ელექტრონები ეწოდება უნიპოლარული. ასეთ ტრანზისტორებს აგრეთვე უწოდებენ ელექტრული ველით (ველიან) მართვად ტრანზისტორებს. ველიან ტრანზისტორში დენის მართვა ხდება ელექტრული ველის საშუალებით და არა დენით, როგორც ბიპოლარულ ტრანზისტორში.

ველიან ტრანზისტორს გააჩნია, ისევე როგორც ბიპოლარულს, სამი გამომყვანი: საკეტი (ს), რომელიც ანალოგიურია ბაზის; 2. ჩასადენი (ჩ), რომელიც ანალოგიურია ემიტერის; 3. გამოსადენი (გ), რომელიც ანალოგიურია კოლექტორის. ასევე არსებობს ველიანი ტრანზისტორის ჩართვის სამი სქემა: 1. საერთო ჩასადენით; 2. საერთო საკეტით; 3. საერთო გამოსადენით. ნახ. 3.11.1-ზე ნაჩვენებია ველიანი ტრანზისტორის სქემური აღნიშვნა და საერთო ჩასადენით ჩართვის სქემა, ხოლო ნახ. 3.11.2-ზე შესაბამისად საერთო გამოსადენით და საერთო საკეტით ჩართვის სქემები.



ნახ. 3.11.1



ნახ. 3.11.2

არსებობს ველიანი ტრანზისტორის ორი სახე: 1. ველიანი ტრანზისტორი, რომელშიც p-n გადასავლელში მუხტები მოძრაობენ ელექტრული ველი გავლენით. ასეთ ველიან ტრანზისტორს უნიტრონს უწოდებენ. იგი გამოგონებული იქნა 1952 წელს. 2. 1963 წელს გამოგონებული იქნა ველიანი ტრანზისტორი, რომელსაც ჰქონდა ნახევარგამტარ-დიელექტრიკ-მეტალ ფენები და ელექტრული ველის გავლენით მუხტის გადამტანები მოძრაობდა დიელექტრიკში. ასეთ ველიან ტრანზისტორს უწოდებენ მეტალ-დიელექტრიკ-ნახევარგამტარული სტრუქტურის ტრანზისტორს ან შემოკლებით მდნ ტრანზისტორს ან ტრანზისტორს იზოლირებული საკეტით.

ველიან ტრანზისტორში მუხტების ნაკადი იმართება გადასავლელში გაჩენილი არხის კვეთის ფართობის ცვლილებით. იგი იცვლება ელექტრული ველის გავლენით. ამის გამო შესაბამისად იცვლება მასში გამავალი მუხტების რაოდენობა.

დღეისათვის ველიანი ტრანზისტორები პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება. რიგ შემთხვევებში მათ გააჩნიათ უპირატესობა ბიპოლარულ ტრანზისტორებთან შედარებით. კერძოდ, მათ გააჩნიათ ხმაურის დაბალი დონე და მუშაობენ ზემაღალ სიხშირეებზე. ასევე ისინი ფართოდ გამოიყენებიან მიკროსქემების დასამზადებლად.

## 3.12 ტრანზისტორის პრაქტიკული გამოყენება



დღეისათვის წარმოდგენელია ისეთი ელექტრული მოწყობილობები სადაც ფართოდ არ იყოს გამოყენებული ტრანზისტორის ესა თუ ის სახე. ჩვენ განვიხილოთ ტრანზისტორის გამოყენების მხოლოდ რამოდენიმე მაგალითი.

ა. მუდმივი დენის სტაბილიზატორი

დიოდის პრაქტიკული გამოყენების განხილვის დროს ავლინებთ, რომ დიოდების საშუალებით შეგვიძლია მივიღოთ პულსირებული დენი. ე.ი. ისეთი დენი, რომელსაც მიმართულება უცვლელი აქვს, ხოლო სიდიდე ცვალებადი. ასეთი სახის დენიდან მუდმივი დენის მისაღებად საჭიროა პულსირებული დენის სტაბილიზაცია (გამუდმივება).

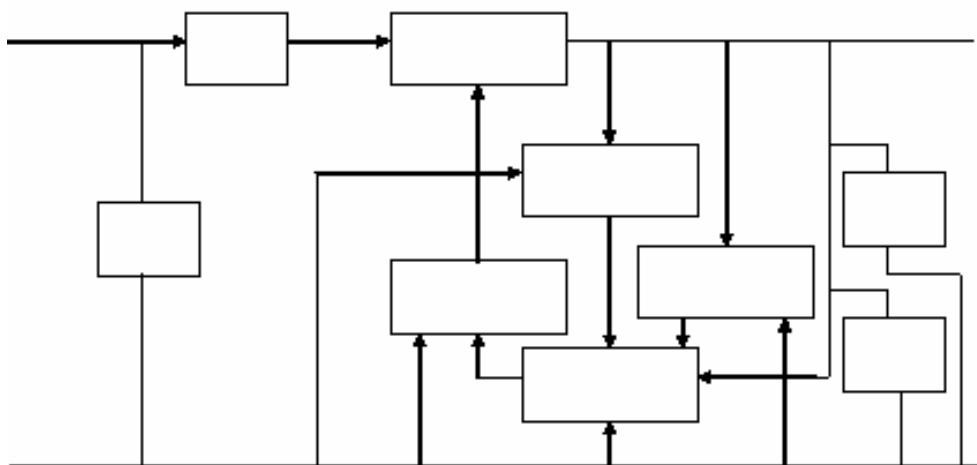
თუ დატვირთვა მცირეა (ათეული მილიამპერი), მაშინ სტაბილიზაციისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ ინდუქციურობა და ელექტროლიტური კონდესატორი, როგორც ეს ნახ. 3.12.1-ზეა ნაჩვენები. თუ დატვირთვა დიდია (ამპერები), მაშინ აღნიშნული ინდუქციურობა და ტევადობა საკმარისი აღარ არის და საჭიროა სპეციალური სტაბილიზაციის მოწყობილობის გაკეთება. სწორედ ამ მოწყობილობის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს ტრანზისტორი.

განვიხილოთ დენის სტაბილიზაციის პრინციპი. სტაბილიზაციის სტრუქტურული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.12.1-ზე. თუ დატვირთვა მცირეა, მაშინ  $R_C$  დროის მუდმივა იმდენად დიდია, რომ  $C$  კონდესატორი ასწრებს რამოდენიმეჯერ დამუხტვას და განმუხტვას. ამის გამო, როცა პულსირებული ძაბვა მცირდება (უახლოვდება ნულს)  $C$  კონდესატორზე დაგროვილი ენერჯია მიეწოდება დატვირთვას და ფაქტიურად მასზე ძაბვა არ იცვლება. ამ დროს ნახ. 3.12.1-ზე ნაჩვენები სხვა მოწყობილობები აღარ არის საჭირო. თუ დატვირთვა მცირეა ( $R_L$  მცირეა), მაშინ  $R_C$  იმ რიგისაა, რომ  $C$  კონდესატორი ვეღარ ასწრებს დამუხტვას და როცა პულსირებული ძაბვა მცირდება დატვირთვაზე ძაბვაც მცირდება ე.ი. ვეღარ ხდება ძაბვის გამუდმივება. ამ დროს საჭიროა სქემის სხვა მოწყობილობების მუშაობა.

სტაბილიზაციის სქემა შეიცავს შემდეგ მოწყობილობებს:

1. ცვალებადი წინაღობის ელემენტი (3); მისი დანიშნულებაა დატვირთვის ცვლილებასთან ერთად შეიცვალოს მისი წინაღობა. თუ დატვირთვა იზრდება, მაშინ მისი წინაღობა უნდა მცირდებოდეს, ხოლო თუ დატვირთვა მცირდება, მაშინ მისი წინაღობა უნდა გაიზარდოს. იგი წარმოადგენს მძლავრ ტრანზისტორს, რომლის ემიტერს ან კოლექტორს (იმის მიხედვით თუ რა ტიპისაა ტრანზისტორია) მიეწოდება პულსირებული ძაბვის პლიუსი ან მინუსი, ხოლო სტაბილიზირებული ძაბვის პლიუსი ან მინუსი მოიხსნება შესაბამისად კოლექტორიდან ან ემიტერიდან. უკუკავშირის საშუალებით ბაზაზე მიეწოდება სიგნალი, რომელიც დატვირთვის ცვლილების შესაბამისად უფრო გააღებს (შეამცირებს ცვლადი წინაღობის ელემენტის წინაღობას) ან უფრო ჩაკეტავს (გაზრდის წინაღობას) ტრანზისტორს.

2. ძაბვის ეტალონი(7); მისი დანიშნულებაა მოგვცეს სტაბილური (მცირე სიმძლავრის) ძაბვა. იგი წარმოადგენს შესაბამისი ტიპის სტაბილიტრონს და შეირჩევა იმის მიხედვით თუ რა სიდიდის მუდმივი ძაბვის მიღება არის საჭირო.



ნახ. 3.12.1

3. დაბვის რეგულირების ელემენტი (6); მისი დანიშნულებაა საჭიროების შემთხვევაში ხელით შეიცვალოს გამოსასვლელი სტაბილური დაბვის სიდიდე. იგი არის ცვლადი რეზისტორი (წინაღობა).

4. შედარების მოწყობილობა (8); მისი დანიშნულებაა შეადაროს ერთმანეთს გამოსასვლელი დაბვა, ეტალონური დაბვა და დაბვი რეგულირების ელემენტიდან მოხსნილი დაბვა. ეს მოწყობილობა აგებულია ტრანზისტორზე.

5. გამაძლიერებელი (9); მისი დანიშნულებაა, შედარების მოწყობილობიდან მოხსნილი დაბვა გააძლიეროს და მიაწოდოს ცვლადი წინაღობის ელემენტს.

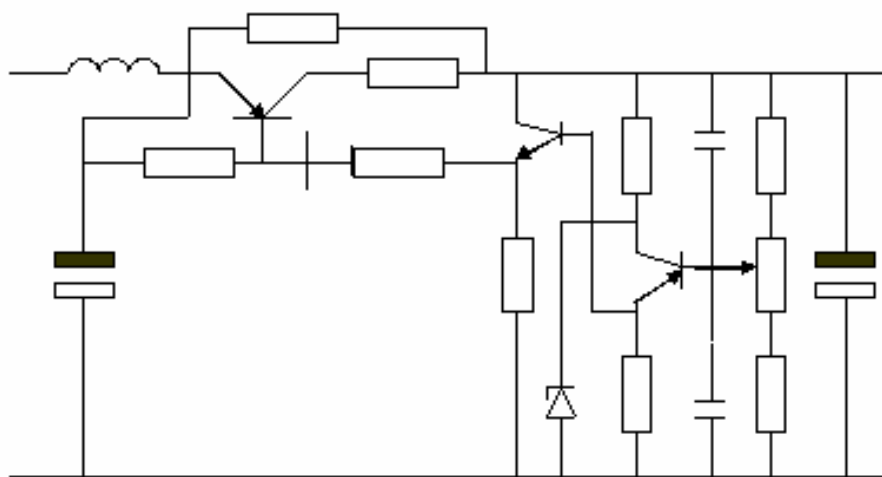
6. ინდუქციურობა (2). 7. ტევადობა (1 და 5). 8. დატვირთვა (4).

ნახ. 3.12.1-ზე ნაჩვენებია მოწყობილობა მუშაობს შემდეგ ნაირად: დაბვის რეგულირების ელემენტის საშუალებით ვაყენებთ საჭირო გამოსასვლელ დაბვას. მასზე მოდებული დაბვის ვარდნა მიეწოდება შედარების მოწყობილობას. იგი არის შედარების ზღვარი. ამ დროს სხვაობა გამოსასვლელ და ეტალონურ დაბვებს შორის თანაფარდობაშია შედარების ზღვართან. თუ გაიზარდა გამოსასვლელი დაბვა, მაშინ იზრდება სხვაობა  $U_{გაა}-U_{ეტ}$  ე.ი ირღვევა თანაფარდობა და შედარების მოწყობილობა გასცემს ისეთ დაბვას, რომ გაძლიერების შემდეგ გაიზარდოს ცვლადი წინაღობის ელემენტის წინაღობა ისე, რომ გამოსასვლელი დაბვა ჩადგეს ნორმის ფარგლებში. თუ შემცირდა გამოსასვლელი დაბვა, მაშინ მცირდება  $U_{გაა}-U_{ეტ}$  სხვაობა და შედარების მოწყობილობა გასცემს ისეთ დაბვას, რომ გაძლიერების შემდეგ შემცირდეს ცვლადი წინაღობის ელემენტის წინაღობა ისე, რომ გამოსასვლელი დაბვა ჩადგეს ნორმის ფარგლებში.

ამრიგად პულსირებული დაბვა ნაწილდება ცვლადი წინაღობის ელემენტსა და დატვირთვის წინაღობას შორის ისე, რომ დატვირთვაზე დაბვა ყოველთვის მუდმივია, ხოლო ცვლადი წინაღობის ელემენტზე იცვლება. ცხადია, რომ პულსირებული დაბვა მეტი უნდა იყოს ვიდრე სტაბილიზირებული (გამოსასვლელი) დაბვა, რადგან დატვირთვის გაზრდის დროს წრედში იზრდება დენი და შესაბამისად დანაკარგები წრედის ელემენტებზე.

ტევადობების სიდიდე დიდია (რამოდენიმე ათასი მიკროფარადი), ამიტომ იყენებენ ელექტროლიტურ კონდენსატორებს. ასევე დიდი უნდა იყოს ინდუქციურობაც.

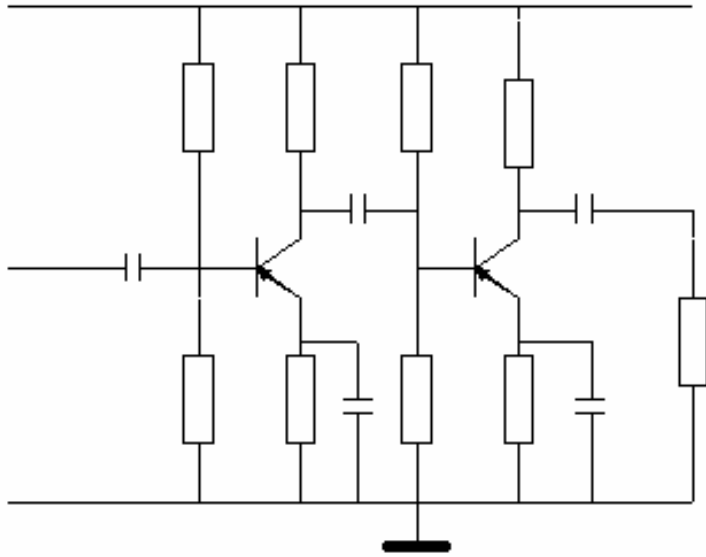
ნახ. 3.12.2-ზე ნაჩვენებია 24ვ სტაბილიზატორის ელექტრული სქემა 8ა დატვირთვის შემთხვევაში. ცვლადი წინაღობის ელემენტის როლს ასრულებს  $T_1$  მძლავრი ტრანზისტორი, დაბვის რეგულირების ელემენტი არის  $R_9$  წინაღობა, დაბვის ეტალონი არის  $R_5$  სტაბილიტრონი, შედარების მოწყობილობა აგებულია  $T_2$  ტრანზისტორზე და გამაძლიერებელი  $T_3$  ტრანზისტორზე.  $T_2$  არის მცირე სიმძლავრის, ხოლო  $T_3$  საშუალო სიმძლავრის.



ნახ. 3.12.2

ბ. გამაძლიერებელი

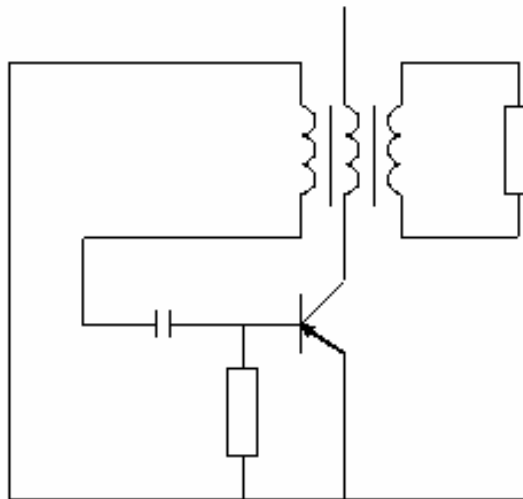
როგორც ავლინნეთ ტრანზისტორზე შეიძლება ავაწყოთ ისეთი ელექტრული სქემა, რომელიც სუსტ სიგნალს გააძლიერებს. იმისდამხედვეთ თუ რა სიმძლავრის სიგნალის მიღება გვსურს არსებობს ერთტრანზისტორიანი, ორტრანზისტორიანი და ა.შ. გაძლიერების სქემები. ნახ. 3.12.3-ზე ნაჩვენებია ორტრანზისტორიანი გაძლიერების სქემა.



ნახ. 3.12.3

გ. გენერატორი

ნახ. 3.12.4-ზე ნაჩვენებია ერთ ტრანზისტორზე აწყობილი გენერატორის სქემა.



ნახ. 3.12.4

გამაძლიერებლისა და გენერატორის მუშაობის პრინციპი სხვა საგანში იქნება განხილული.

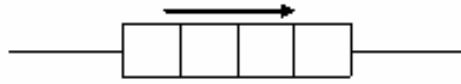
### 3.13 ტირისტორი

სამ p-n გადასასვლელიან ნახევარგამტარულ ხელსაწყოს, რომელსაც ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე გააჩნია უარყოფითი წინაღობის უბანი ტირისტორი ეწოდება. ტირისტორს შეიძლება ჰქონდეს ორი ან სამი გამომყვანი.

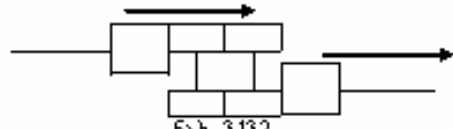
ტირისტორს, რომელსაც აქვს ორი გამომყვანი (ანოდი და კათოდი) ეწოდება დიოდური ტირისტორი ან რაც იგივეა დინისტორი. მისი გაღება ან ჩაკეცვა ხდება მკვებავი ძაბვის სიდიდისა ან პოლარობის ცვლილებით. მიტომ მას აგრეთვე უწოდებენ არამართვად ტირისტორს.

ტრისტორს, რომელსაც აქვს სამი გამომყვანი ეწოდება ტრინისტორი. იგი ორი გამომყვანის (ანოდი და კათოდი) გარდა შეიცავს მესამე გამომყვანს (მმართველი ელექტროდი), რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია ის გადავიყვანოთ როგორც ღია ისე ჩაკეტილ მდგომარეობაში, თუ მმართველ ელექტროდს მივაწვდით შესაბამის მმართველ დენს.

ნახ. 3.13.1-ზე ნაჩვენებია დინისტორის სტრუქტურული სქემა. იგი არის ოთხი  $p_1-n_1-p_2-n_2$  ფენებისაგან შემდგარი დიოდი. თუ მასზე მოვდებთ ძაბვას ნაჩვენები პოლარობით,



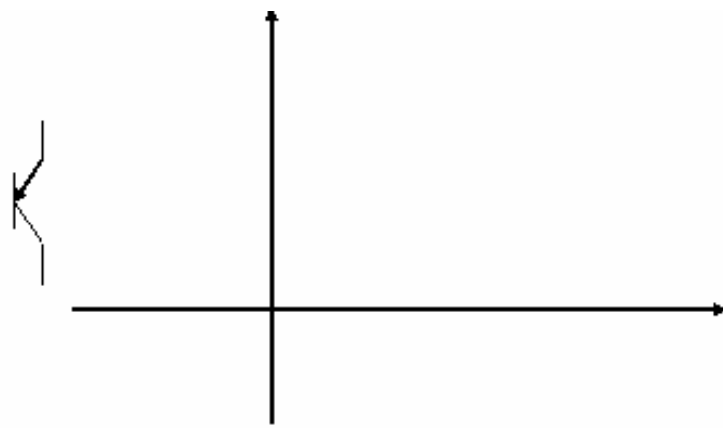
ნახ. 3.13.1



ნახ. 3.13.2

მაშინ გაივლის I დენი ნახაზზე ნაჩვენები მიმართულებით. ამ დროს  $p_1-n_1$  და  $p_2-n_2$  გადასასვლელი იმუშავებენ პირდაპირი მიმართულების ძაბვაზე, ხოლო  $n_1-p_2$  გადასასვლელი უკუ მიმართულების ძაბვაზე. ამრიგად, გამოდის, რომ თითქოს ორი ტრანზისტორი მუშაობს ერთ ხელსაწყოში, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3.13.2-ზე. ერთი ტრანზისტორი არის  $p_1-n_1-p_2$ , ხოლო მეორე  $n_1-p_2-n_2$ .  $p_1$  და  $n_2$  არის ემიტერები, ხოლო  $n_1$  და  $p_2$  არის ერთი ტრანზისტორისთვის ბაზა და მეორე ტრანზისტორისთვის კოლექტორი.

ნახ. 3.13.3-ზე ნაჩვენებია დინისტორის პირობითი აღნიშვნა და ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი. იგი შესდგება შემდეგი უბნებისაგან: 1. OA უბანი; ამ უბანზე წინაღობა



ნახ. 3.13.3

დიდია და ძაბვის ზრდა იწვევს დენის უმნიშვნელოდ ზრდას. 2. AB უბანი; ამ უბანზე ხდება ზეაური გარღვევა ე.ი. ძაბვის მცირედი ზრდა იწვევს დენის სწრაფ ზრდას და როცა  $U=U_{ჩართ.}$  ე.ი.  $B^1$  წერტილში ხდება დინისტორის გაღება. 3. BC უბანი; ამ უბანზე წინაღობა არის უარყოფითი და C წერტილში დინისტორი მთლიანად ღიაა. 4. CD უბანი; ამ უბანზე წინაღობა მცირეა, დინისტორი ღიაა და ძაბვის ზრდით დენი ისე იზრდება, როგორც დიოდში. 5. OF უბანი; ეს უბანი შეესაბამება დინისტორის უკუ შტოს და როცა  $U>U_{უკუ}$  ადგილი აქვს დინისტორის გარღვევას.

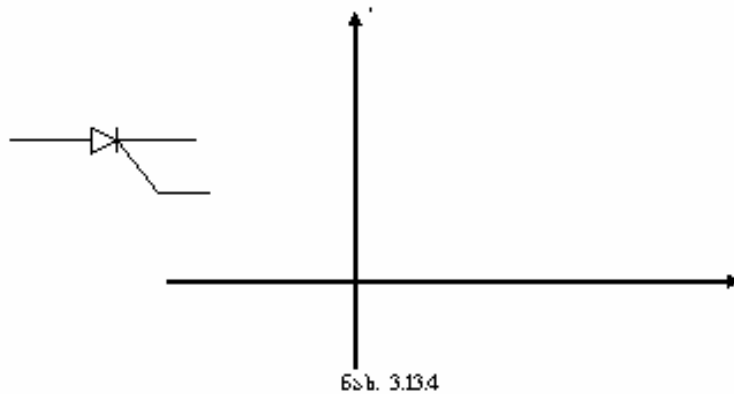
თუ გახსნილ დინისტორში შევამცირებთ დენს და როცა  $I < I_{გამ}$  იგი გადავა გახსნილ მდგომარეობიდან ჩაკეტილში და პროცესი განვითარდება უკუ მიმართულებით. დენის შემცირება (ჩაკეტვა) შეიძლება მოხდეს გარე წრედში წინაღობის გაზრდით ან დროებით ძაბვის მოხსნით. დინისტორის გარღვევის ძაბვა შეიძლება მეტი ან ნაკლები იყოს ჩართვის ძაბვაზე, ეს დამოკიდებულია მისი დამზადების ტექნოლოგიაზე.

დინისტორის პარამეტრებია: 1. ჩართვის ძაბვა; როცა  $U > U_{ჩართ}$  დინისტორი იღება. 2. ჩართვის დენი; ეს დენი გადის ჩართვის ძაბვის დროს. 3. ჩაკეტილი დინისტორის წინაღობა მუდმივი და ცვლადი დენის მიხედვით. პირველი განისაზღვრება გაყონვის დენით, რომელიც ათეული მიკრონის რიგისაა, ხოლო მეორე ძალიან დიდია (რამოდენიმე ათეული და ასეული მეგაომი). 4. გამორთვის დენი; თუ ღია დინისტორის დენს შევამცირებთ გამორთვის დენთან შედარებით, მაშინ იგი ჩაიკეტება. 5. ნარჩენი ძაბვა; ეს ის ძაბვაა, რომელიც დინისტორზეა მისი ღია მდგომარეობაში ყოფნის დროს. I<sub>გ</sub> (0,5-1)კ

რიგისაა. 6. ჩართვის დრო; იგი გვიჩვენებს თუ რა დროში გადადის დინისტორი ჩაკეტილი მდგომარეობიდან ღიაში. იგი (0,1-0,5)მკვმ რიგისაა. 7. გამორთვის დრო; იგი გვიჩვენებს თუ რა დროში გადადის დინისტორი ღია მდგომარეობიდან გამორთულში და არის (5-10)მკვმ რიგის.

თუ დინისტორის  $n_1$  ფენას გავუკეთებთ გამომყვანს, მაშინ ასეთ ელექტრონულ ხელსაწყოს ტრინისტორი ეწოდება. გამომყვანს მმართველი ელექტროდი ანუ ბაზა ეწოდება. ტრინისტორი შეიძლება გავაღოთ ან ჩაკეცოთ ისევე როგორც დინისტორი ან მმართველ ელექტროდზე მივაწოდოთ შესაბამისი დენის იმპულსი. მაგალითად, თუ ტრინისტორს ადებს დადებითი დენის იმპულსი, მაშინ ჩაკეტავს უარყოფითი დენის იმპულსი და პირიქით. მართველ ელექტროდზე მიწოდებული იმპულსებით შესაძლებელია ვცვალოთ ტრინისტორის ჩაკეტვის ან გაღების დრო და დაბვის სიდიდე.

ნახ. 3.13.4-ზე ნაჩვენებია ტრინისტორის პირობითი აღნიშვნა და ვოლტ-ამპერული მახასიათებელთა ოჯახი. მახასიათებლები გადაღებულია ბაზის სხვადასხვა დენების შემთხვევაში.



როგორც ნახაზიდან ჩანს ტრინისტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ანალოგიურია დინისტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის. განსხვავება არის მხოლოდ  $P_{ჩარ}$  დაბვის მნიშვნელობაში.

შ დღეისათვის წარმოება უშვებს სხვადასხვა სახის (დაბალ, მაღალ და საშუალო სიმძლავრის ) ტრინისტორებს. მცირე სიმძლავრის ტრინისტორებს უმთავრესად იყენებენ რელეურ სისტემებში და საკომუტაციო მოწყობილობებში, ხოლო დიდი სიმძლავრისას მძლავრ გარდამქმნელებში და გადამრთველ მოწყობილობებში.

მძლავრ გამმართველებში ტრინისტორს რთავენ დიოდის მაგივრად და მმართველ ელექტროდზე სპეციალური იმპულსის მიწოდებით შეიძლება ვცვალოთ გამოსასვლელი დაბვის სიდიდე. ე.ი. თუ რა დროს გაიღება ან ჩაკეტება ტრინისტორი შესაბამისად შეიცვლება გამოსასვლელი მუდმივი დაბვა.