

# 3. Félvezető diódák

## 3.1. A PN-átmenetek felépítése és működése

A félvezetőelemek felépítésében  $P$ -típusú és  $N$ -típusú félvezető rétegek egyaránt megtalálhatók. Ezek között a különböző elektromos vezetőképességű rétegek között, a szennyezőatomok eloszlásának a változása lép fel.

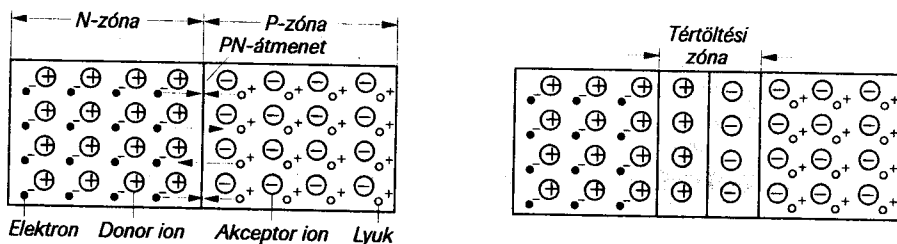
Ha ez a változás *nagy távolságon* jön létre, nem tapasztalhatók különleges tulajdonságok és a két szennyezett félvezető réteg viselkedése egymástól független. Abban az esetben viszont, amikor a szennyezőatomok koncentrációjának változása *a vezetés típusának megváltozásával* egy maximálisan  $1\ \mu\text{m}$  szélességű zónán jön létre, egy **PN-átmenetet** kapunk. A  $PN$ -átmenet léte és tulajdonságai alapvető jelentőségűek a félvezetőelemek legnagyobb részének működésében.

### 3.1.1. A határréteg kialakulása

Képzeljünk el elméleti modell céljára egy  $P$  és egy  $N$ -szennyezésű félvezetőhasáb egymáshoz illesztéséből kialakított félvezetőt. Kezdeti időpontban a két réteg elektromosan semleges. Az  $N$ -réteg szabad elektronjait a kristályszerkezetben rögzített helyzetű ötvegyértékű donor ionok pozitív töltése, a  $P$ -rétegben található lyukakat a háromvegyértékű akceptor ionok negatív töltése semlegesíti. A két réteg közvetlen érintkezési felületénél a töltéshordozók koncentrációkülönbsége miatt bizonyos mértékű *diffúzió* indul meg (lásd 3.1. ábra):

- az  $N$ -szennyezésű rétegből elektronok diffundálnak az átmeneten keresztül a  $P$ -szennyezetségű rétegbe,
- a lyukak viszont a  $P$ -szennyezetségű rétegből átdiffundálnak az  $N$ -szennyezetségű rétegbe.

Amikor az  $N$ -szennyezetségű rétegből diffundáló elektron áthalad az átmeneten, egy olyan tartományba kerül, ahol igen nagy a lyukak sűrűsége. A *rekombináció* valószínűsége olyan nagy, hogy az elektron, mint szabad töltéshordozó rövid idő alatt megszűnik.

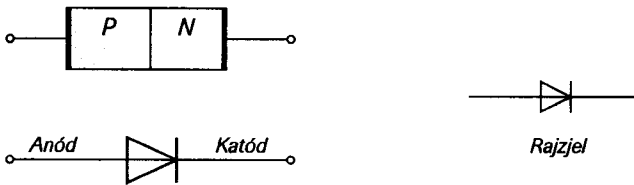


a)

b)

3.1. ábra.  $PN$ -átmenet kialakulása félvezetőben

a) többségi töltéshordozók diffúziója b) tértöltési zóna kialakulása



3.3. ábra. A félvezető dióda felépítése és rajzjele

A rajzjel háromszög-része a  $P$ -tartományt (*anód*) szimbolizálja, míg a függőleges vonalrésze az  $N$ -tartományt (*katód*). A félvezető alkatrészeket gyártó gyárak általában a dióda katódját szokták megjelölni. A vezeték irányába mutató csúcs a nyitóirányú polarizálás esetén érvényes áramirányt (*technikai áramirányt*) adja meg.

A  $PN$ -átmenet a rákapcsolt feszültség polaritásától függően nyitó-, vagy záróirányban működtethető. Nyitóirányú a félvezető dióda előfeszítése (*polarizálása*), ha a  $P$  tartomány (*anód*) az  $N$ -réteghez (*katód*) képest pozitív feszültséget kap, ellenkező polaritás esetében záróirányú előfeszítésről (*polarizálásról*) beszélünk. Ha a félvezető dióda nyitóirányú polarizálással van bekötve a dióda által képviselt ellenállás nagyon kis értékű. Záróirányú polarizálás esetén a dióda ellenállása igen nagy értékű.

A dióda tehát nyitóirányban átengedi az elektromos áramot, záróirányban pedig lezárja. Ezek a tulajdonságok azt mutatják, hogy a félvezető diódának *egyenirányító hatása van*, amelynek műszaki jelentősége nagyon nagy. A félvezető dióda szerkezete és a szennyezett félvezető rétegek geometriája függvényében további különleges tulajdonságok elérése válik lehetővé. Ezek a tulajdonságok teszik lehetővé nagyon sok diódatípus megvalósítását.

### 3.2.1. A félvezető dióda nyitóirányú előfeszítése (*polarizálása*)

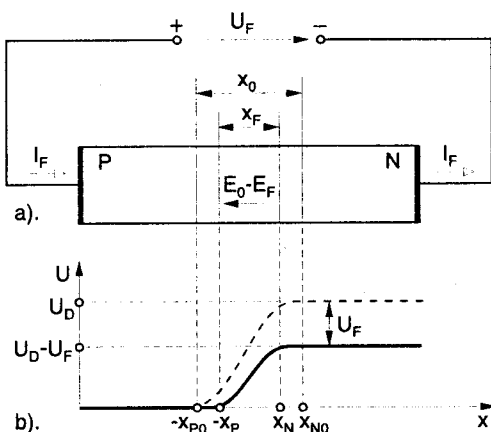
A dióda nyitóirányú előfeszítése esetén (3.4. ábra) a tértöltési tartományban kialakult villamos térerősség ( $E_D$ ) egy alacsonyabb  $E_0$ - $E_F$  szintre gyengül, míg a potenciálgát értéke egy  $U_D$ - $U_F$  értékre csökken. A nyitóirányú előfeszítés csökkenti a diffúziós feszültséget, amely megakadályozza a többségi töltéshordozók vándorlását.

A dióda nyitóirányú karakterisztikáját a 3.5. ábra szemlélteti. Kis nyitóirányú feszültség esetén ( $U_F < 100$  mV) csak nagyon kis erősségű áram folyik, azaz a  $PN$ -átmenet még viszonylag nagy ellenállású. A feszültség növelése ( $U_F > 100$  mV) eleinte kismértékű áramnövekedést eredményez, majd egy bizonyos feszültségszinttől (*Si diódáknál kb. 0,6 V*) nagyon erős áramnövekedés figyelhető meg.

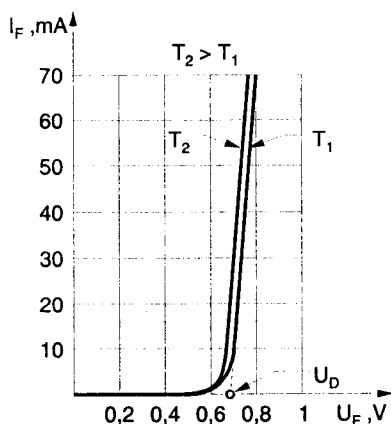
Ameddig a külső  $U_F$  feszültség nem egyenlíti ki a diffúziós-feszültség értékét, a dióda árama a nyitófeszültség függvényében exponenciálisan nő.

A nyitóirányú feszültséget tovább növelve, – mivel a belső potenciálgát megszűnik – a dióda ellenállásként viselkedik és a karakterisztika lineáris jelleget mutat. Ha a külső feszültség értéke kompenzálja a diffúziós feszültség értékét, a belső potenciálgát megszűnik és a  $PN$ -átmenet ellenállásként viselkedik. Ennek az ellenállásnak a nagysága a félvezető anyagától és szennyezettségétől, valamint geometriai méreteitől függ.

A feszültség-áram karakterisztika  $U_F > U_D$  feszültségértékekre gyakorlatilag lineárisnak tekinthető.



3.4. ábra. A dióda nyitóirányú polarizálása  
 a) a villamos erőter és a tértöltési zóna szélessége  
 b) a potenciálgát értékének változása



3.5. ábra. A dióda nyitóirányú jelleggörbéje

A nyitóirányú áram értéke függ a hőmérséklettől, mivel a hőmérséklet növekedésével a termikus töltéshordozók száma exponenciálisan nő.

A kisebbségi termikus töltéshordozók koncentrációja nem változik nyitóirányú polarizálás esetén, így az általuk létrehozott áram az egyensúlyi állapotnak megfelelő szinten marad. A többségi termikus töltéshordozók előnyösebb helyzetben vannak, mint egyensúly esetén, mivel egy kisebb,  $-e \cdot (U_D - U_F)$  értékű – energiagátat kell leküzdeniük ( $e$  – az elemi elektromos töltés nagysága).

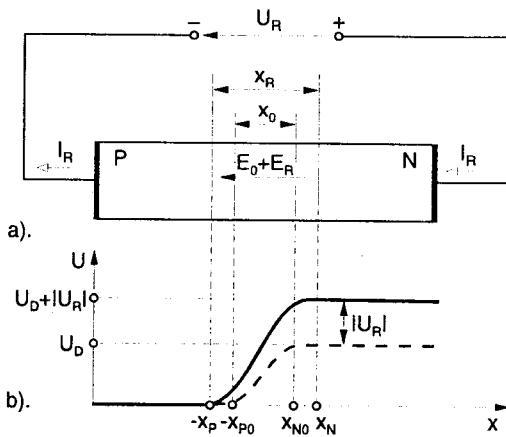
Ennek tulajdonítható, hogy a többségi termikus töltéshordozók által létrehozott áramösszetevők értéke nyitóirányú polarizálás esetén növekvő tendenciát mutat. A hőmérséklet növekedésével a dióda nyitóirányú karakterisztikája balra tolódik (3.5. ábra).

### 3.2.2. A félvezető dióda záróirányú előfeszítése (polarizálása)

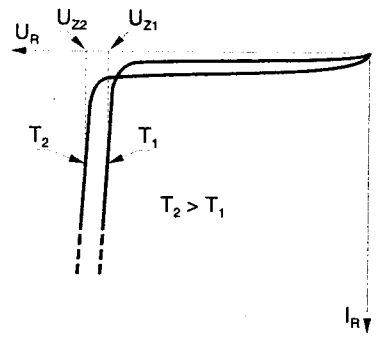
A dióda záróirányú előfeszítése esetén (3.6. ábra) a tértöltési tartományban kezdetben kialakult villamos térerősség ( $E_0$ ) egy  $E_0 + E_R$  szintre felerősödik, míg a potenciálgát értéke  $U_D + U_R$  értékre nő. A tértöltési zóna a félvezetőben a záróirányú feszültség függvényében kiszélesedik ( $x_R$ ).

A kialakuló villamos tér olyan elrendezésű, hogy csak a kristályban igen kicsi koncentrációban jelenlévő kisebbségi töltéshordozókat szállíthatja. Ezért a PN-átmeneten záróirányú polarizálás esetén nagyon kis értékű áram halad át, amelynek értéke gyakorlatilag független a rákapcsolt zárófeszültségtől. Ezt az áramot **záróirányú áramnak** vagy **visszáramnak** nevezzük. Szilíciumalapú diódák esetében ez az áram csak nA nagyságrendű.

A dióda jellemző záróirányú karakterisztikáját a 3.7. ábra szemlélteti. A záróirányú áram nagysága, – mivel a kisebbségi töltéshordozók számától függ – a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan nő. Állandó hőmérsékleten nulla záróirányú feszültség esetén a visszaram is nulla.



3.6. ábra. Záróirányban polarizált PN-átmenet  
 a) a villamos erőter és a tértöltési zóna szélessége  
 b) a potenciálgát értékének változása



3.7. ábra. A dióda záróirányú jelleggörbéje

A kisebbségi töltéshordozók áramlása már igen kis záróirányú feszültség esetén megindul és a visszáram néhány tized voltnál telítésbe kerül. A telítési jelleg annak tulajdonítható, hogy bár a kisebbségi töltéshordozók mozgási energiája növekszik de számuk gyakorlatilag nem.

Az  $U_R$  záróirányú feszültséget tovább növelve a karakterisztikán egy kritikus feszültségértéket érünk el ( $U_Z$  - *letörési feszültség*), ahol a visszáram először kismértékben, majd rohamosan növekszik. A karakterisztikának ezt a szakaszát *letörési tartománynak* nevezzük. A gyors áramnövekedés két jelenség, általában együttes fellépésének tulajdonítható:

**1. Zener-letörés:** A kialakuló villamos tér erőhatása elektronokat szabadít ki a félvezető-kristály kötéséből, amelyek szabad töltéshordozóként részt vesznek az áram létrehozásában. A Zener-letörés mindkét oldalon erősen szennyezett zónájú diódákban lép fel (*Zener-diódák*).

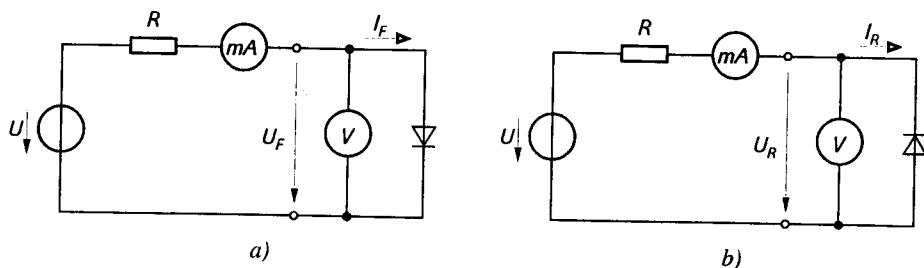
**2. Lavinaletörés:** Ha a záróirányú feszültség túllép egy kritikus értéket ( $U_{ZK}$ ), a félvezetőben jelenlevő szabad elektronok akkora mozgási energiára tesznek szert, hogy ütközéseik révén további elektronokat szabadítanak ki az atomi kötésekéből (*ionizálják a kristályrácsban található atomokat*). Ennek következményeként lavinaszerű töltéshordozó-sokszorozás indul meg.

A lavinaletörés a PN-átmenetek legfontosabb letörési mechanizmusa, amely az átmenetben fellépő nagy erősségű ( $E \approx 2 \cdot 10^7 \frac{V}{m}$ ) villamos erőter hatására alakul ki.

A PN-átmenet hirtelen kialakuló nagy záróirányú vezetőképessége igen nagy áram kialakulását teszi lehetővé, amely jelentős felmelegedést okoz. A dióda védelme érdekében a fellépő áramot feltétlenül korlátozni kell, és célszerű biztosítani a megfelelő hőelvezetést is. A félvezető diódák általában üzemszerűen nem működnek a letörési tartományban; kivételt képez a feszültségstabilizálásra kifejlesztett, különleges felépítésű *Zener-dióda*.

### 3.2.3. A félvezető dióda teljes karakterisztikája

A félvezető diódák  $I = f(U)$  karakterisztikájának meghatározására alkalmas kapcsolást a 3.8. ábra mutatja. Az alkalmazott feszültségforrás változtatható kimeneti feszültséget kell biztosítson.



3.8. ábra. Áramkör a dióda  $I = f(U)$  jelleggörbéjének felvételéhez  
 a) nyitóirányú karakterisztika meghatározására  
 b) záróirányú karakterisztika meghatározására

A teljes karakterisztikát a 3.9. ábra szemlélteti, a germánium és szilícium alapanyagú diódák közötti különbséget is bemutatva. A jelleggöréből meghatározható a diódák ellenállása. Félvezető diódáknál két jellegzetes ellenállást különböztetünk meg, amelyek a következők:

- Egyenáramú ellenállás ( $R_F$ )

$$R_F = \frac{U_F}{I_F}$$

- Differenciális ellenállás ( $r_F$ )

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$$

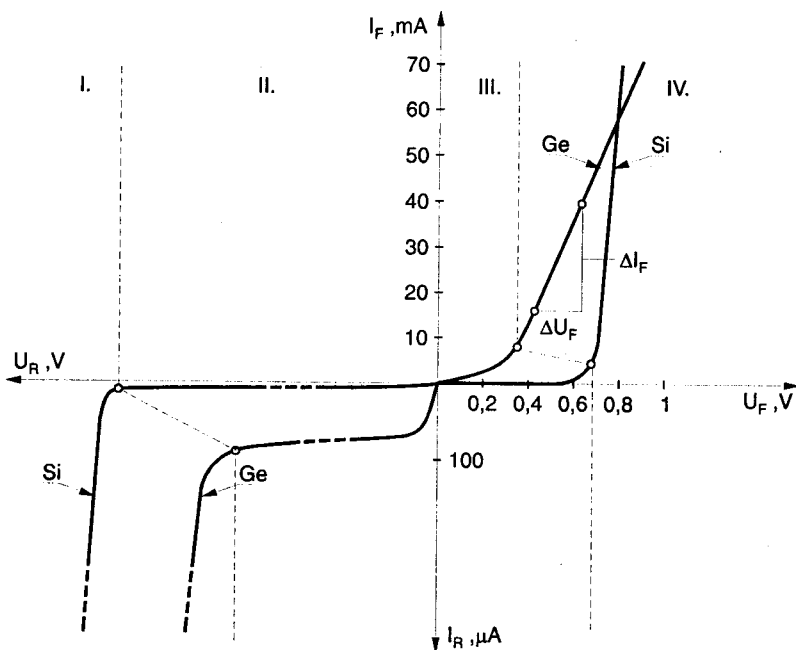
A félvezető dióda egyenáramú- és differenciális ellenállására különböző értékeket kapunk a karakterisztika különböző pontjaiban. A dióda teljes karakterisztikáján négy különböző tartományt különböztethetünk meg:

#### • I. Letörési tartomány

Jellegzetessége ennek a tartománynak, hogy kis záróirányú feszültségváltozás hatására nagy áramváltozás következik be. Az egyenáramú- és a differenciális ellenállás értéke gyakorlatilag nullának tekinthető. Az átmeneten átfolyó visszáram igen nagy értéket vehet fel, amelyet – a dióda túlterhelés elleni védelme érdekében – feltétlenül korlátozni kell.

#### • II. Zárási tartomány

A karakterisztika ezen a szakaszán a visszáram telítési jelleget mutat (az  $U_R$  változása minimális mértékben befolyásolja a diódán folyó igen csekély áramot). A félvezető kristály saját vezetőképességének tulajdonítható visszáram nagyon kicsi: Si-diódák esetén néhány nA, Ge-diódák esetén néhány  $\mu$ A. Az egyenáramú- és a differenciális ellenállás értéke ennek megfelelően nagyon nagy: Ge-diódák esetén  $0,1 + 10 \text{ M}\Omega$ , Si-diódák esetén  $1 + 3000 \text{ M}\Omega$ . A dióda egyenfeszültség és váltakozófeszültség esetén is szakadásként viselkedik.



3.9. ábra. A germánium és szilíciumdiódák tipikus  $I = f(U)$  jelleggörbéje

• III. Nyitóirányú tartomány, exponenciális szakasza ( $U_F \leq U_D$ )

A diódán folyó áram a nyitóirányú feszültség növekedésével exponenciálisan nő. A  $PN$ -átmenet egyenáramú ellenállása ugyanakkor egyre kisebb lesz. Az  $U_D$  küszöbfeszültség értéke Ge-diódáknál kb. 300 mV, Si-diódák esetén pedig kb. 700 mV.

• IV. Nyitóirányú tartomány, lineáris szakasza ( $U_F \geq U_D$ )

A diódán folyó áram minimális mértékben függ a nyitóirányú feszültség változásától. A dióda kis értékű ( $1 \div 100 \Omega$ ) elektromos ellenállásként viselkedik.

### 3.3. Félvezető diódák típusai

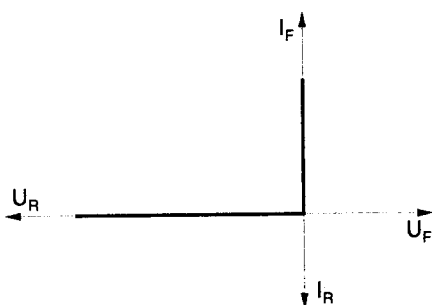
A félvezető diódák olyan elektronikai alkatrészek, amelyek egy  $PN$ -átmenetből és két ohmos (*fém-félvezető*) csatlakozásból épülnek fel. A dióda tokozása a belső szerkezet külső hatásokkal szembeni védelmét, a mechanikai szerelhetőséget, az elektromos csatlakoztatást és a megfelelő hőelvezetést biztosítja.

Nagyon sok különböző típusú félvezető dióda létezik, amelyek jellegzetes felépítése és elnevezése összefüggésben áll a betöltött funkciókkal és felhasználási területeikkel.

A félvezető rétegek szerkezete és szennyezési geometriája függvényében a  $PN$ -átmenet sok (a gyakorlatban nagyon jól felhasználható) különleges tulajdonságot mutat. Ezek szerint megkülönböztetünk: *egyenirányító diódákat, Zener-diódákat, kapacitásdiódákat, tüssdiódákat, Schottky-diódákat, alagútdiódákat, fotodiódákat stb.*

### 3.3.1. Egyenirányító diódák

Az egyenirányító diódák elnevezése abból ered, hogy a váltakozó áram egyenirányítására, azaz egyenárammá való átalakítására használják. Ezek a diódák a *PN*-átmenetnek azt a tulajdonságát használják ki, hogy gyakorlatilag csak nyitóirányú polarizálás esetén vezetik az elektromos áramot. Az ideális egyenirányító dióda karakterisztikáját a 3.10. ábra szemlélteti. Ideális esetben a dióda nyitóirányban rövidzárként (*nulla ellenállás*), záróirányban szakadásként (*végtelen nagy ellenállás*) kell viselkedjen. A valóságos egyenirányító diódák karakterisztikája (3.9. ábra) eltér az ideálistól, főleg magas záróirányú feszültségek és erős nyitóirányú áramok esetén.



3.10. ábra. Ideális egyenirányító dióda jelleggörbéje

Ennek ellenére a jöminőségű, valóságos egyenirányító diódák igen jól megközelítik az ideális tulajdonságokat, mivel nyitóirányban kicsi, záróirányban nagy ellenállást képviselnek. A 3.1. táblázat egy közepes teljesítményű germánium és szilícium egyenirányító dióda fontosabb adatainak összehasonlítását tartalmazza. A táblázatból megállapítható, hogy a *Ge*-diódák egyetlen előnye a *Si*-diódákhoz viszonyítva a kisebb nyitóirányú feszültségesés értéke.

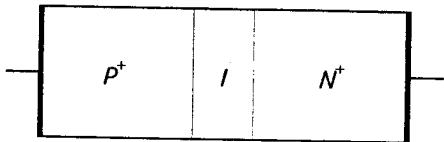
Egyenirányító teljesítménydiódák készítésére a legalkalmasabb félvezető anyag a szilícium; kis teljesítmények esetén alkalmazzák a germániumot is.

Jellemző	Germánium-dióda	Szilícium-dióda
Küszöbfeszültség	0,2 + 0,3 V	0,6 + 0,7 V
Visszaram ( <i>közepes feszültség esetén</i> )	0,1 + 10 $\mu$ A	1 + 100 nA
Nyitóirányú ellenállás (1 mm <sup>2</sup> felületű <i>PN</i> -átmenet esetén)	5 + 10 $\Omega$	2 + 50 $\Omega$
Záróirányú ellenállás	0,1 + 10 M $\Omega$	1 + 3000 M $\Omega$
Maximális zárófeszültség	$\approx$ 200 V	$\approx$ 3000 V
A <i>PN</i> -átmenet maximális üzemi hőmérséklete	80 + 90 C°	150 + 200 C°
Egyenirányítási hatásfok	98 %	99,5 %

3.1. táblázat.

Egy jó teljesítménydiódánál fontos a nagy záróképesség és a kis nyitóirányú veszteség, amely a gyártás szempontjából ellentmondást jelent. A nagy zárófeszültség hosszú, gyengén szennyezett réteget igényel, ami másrészt rossz nyitóirányú tulajdonságokhoz (nagy ellenálláshoz) vezet.

A szilíciumalapú teljesítmény-egyenirányító diódákat *PIN*-diódáknak is nevezik. Az elnevezés utal a dióda szerkezeti felépítésére. A *PIN*-dióda három különböző tartományból áll; ideális esetben sajátvezetésű *I*-zónát (*I*-*intrinsic*) helyeznek el erősen szennyezett *P*- és *N*-réteg közé (3.11. ábra). A valóságban – a gyártástechnológia miatt – az *I*-zóna gyengén szennyezett rétegnek tekinthető. A *PN*-átmenet a *P*<sup>+</sup> réteg határfelületén alakul ki, ha az *I*-réteg *N*-szennyezettségű és az *N*<sup>+</sup> réteg határfelületén, ha az *I*-réteg *P* szennyezettségű.



3.11. ábra. PIN-dióda szerkezete

meg. A nyitóirányú működés esetén az  $I$ -zónát elárasztják a mozgó töltéshordozók, vezetőképessége megnő és a dióda nagyon kis nyitóirányú ellenállást képvisel.

Az egyenirányító diódákat pontosan meghatározott feszültség és áramtartományban való felhasználásra tervezik. A diódákra vonatkozó adatlapok egy sor – a gyártó által rögzített – határértékadatot és üzemi paramétert tartalmaznak. Ezeknek a dióda villamos és termikus jellemzőire vonatkozó adatoknak a túllépése a félvezető tönkremeneteléhez vezet.

### 3.3.2. Zener-diódák

A Zener-diódák (vagy feszültségstabilizáló diódák) a  $PN$ -átmenet azon tulajdonságát használják ki, hogy közelítőleg állandó értékű a záróirányú feszültség a kivezetései között, ha a letörési tartományban működik. Felépítés szempontjából a Zener-diódák különlegesen szennyezett szilíciumdiódák, amelyek veszély nélkül üzemeltethetők a letörési tartományban is. Ezeknél a diódáknál gondoskodnak arról, hogy geometriailag tökéletes legyen az átmenet, csekélyek legyenek az ohmos veszteségek és nagyon jó legyen a hőelvezetés. Nyitóirányú működésük megegyezik a normális  $Si$ -diódákéval. Záróirányban a  $PN$ -átmenet szennyezésétől függő  $U_{ZK}$  **Zener-feszültségig** nagy ellenállást, a Zener-feszültség elérése után kis ellenállást képviselnek. A Zener-dióda félvezető rétegeinek szennyezése erősebb mint más diódák esetében, mivel a letörési feszültségszintet csökkenteni kell és megfelelően kis értékű differenciális ellenállás csak így érhető el.

A letörési tartományban tapasztalható kis ellenállású állapot a már említett **Zener-hatás** és **lavinahatás** együttes következménye. Ennek ellenére tekintet nélkül arra, hogy az átütés valóságos mechanizmusa lavinajelenségen vagy Zener-jelenségen alapszik, a  $PN$ -átmenet **Zener-átöréséről** beszélünk. A Zener-dióda feszültség-áram karakterisztikája és rajzjele a 3.12. ábrán látható. A jelleggörbe fontosabb tartományai a következők:

#### • I. Nyitótartomány

Nyitóirányú polarizálás esetén a Zener-dióda karakterisztikája megegyezik egy közönséges  $Si$ -dióda karakterisztikájával ( $U_D \approx 0,7 V$ ).

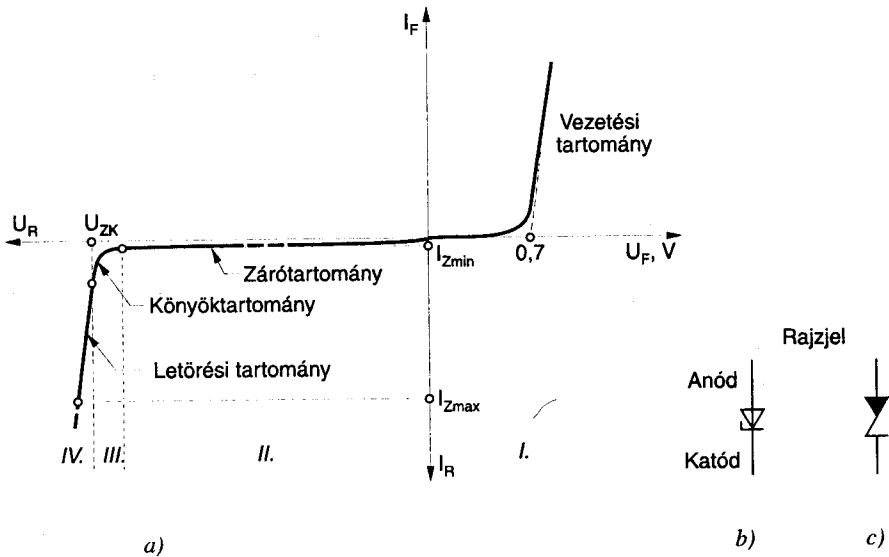
#### • II. Záró tartomány.

Nagyon kis értékű zárási áram folyik, amely a diódának nagyon nagy záróirányú ellenállást ( $10 + 1000 M\Omega$ ) biztosít.

#### • III. Könyöktartomány.

Ebben a tartományban kezdődnek meg a letörési jelenségek. Erősen szennyezett szilíciumdiódák letörési feszültsége  $6 V$ -nál kisebb, és a letörési mechanizmus alapja a Zener-letörés. Gyengébben szennyezett átmenetben a Zener-letörés magasabb feszültségértéken ( $U_{ZK} > 6 V$ ) következne be, mint a lavinaletörés, tehát az utóbbi lesz a ténylegesen fellépő jelenség.





3.12. ábra. A Zener-dióda  $I=f(U)$  jelleggörbéje és rajzjele  
 a) jelleggörbe b) szabványos rajzjel c) gyakran alkalmazott rajzjel

#### • IV. Letörési tartomány

Kis feszültségváltozás nagy áramváltozást eredményez. Ezek a változások határozzák meg a Zener-dióda, – ebben a tartományban érvényes – nagyon kis értékű  $r_z$  differenciális ellenállását. A Zener-dióda differenciális ellenállását a letörési jelleggörbe meredeksége határozza meg. Értéke a karakterisztika minden egyes pontjában más és más értékű, a valóságos jelleggörbe enyhe görbülete következtében.

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$

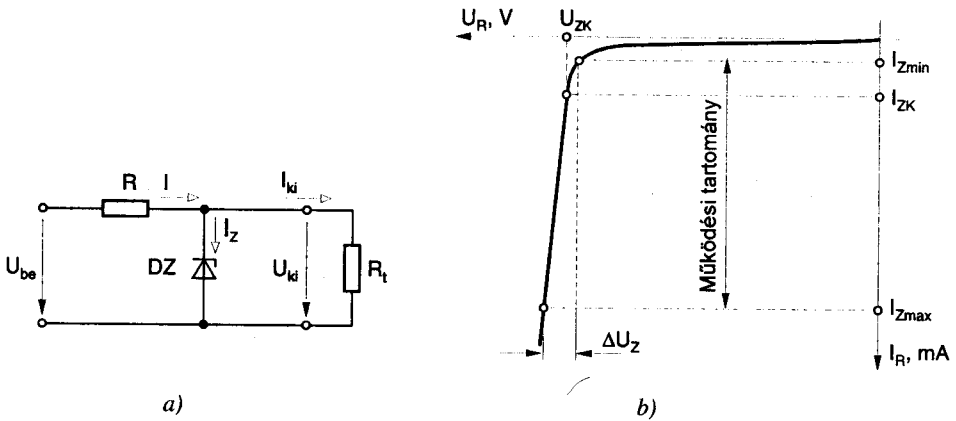
ahol  $\Delta U_z$  a feszültségváltozás,  $\Delta I_z$  az áramváltozás.

A differenciális ellenállás értéke a letörési tartományban (tipikus érték  $1 + 100 \Omega$ ) meghatározza a Zener-dióda feszültségstabilizálási képességét. A legkisebb differenciális ellenállással ( $1 + 3 \Omega$ ), tehát a legjobb feszültségstabilizálási képességgel a  $7 + 9 \text{ V}$  karakterisztikus Zener-feszültségű diódák rendelkeznek.

Kis értékű záróirányú áramok esetén a feszültség erőteljesen változik az áram változásával, tehát a differenciális ellenállás nagy értékű. Ez magyarázza, hogy a Zener-dióda működési tartományának alsó határát egy,  $I_{Zmin}$  minimális Zener-áram határozza meg (3.13.b. ábra).

A fellépő áram értéke nem lépheti túl az  $I_{Zmax}$  maximális Zener-áram szintet a dióda maradandó károsodása nélkül. Az áramhatárolást a 3.13.a. ábrán látható módon, legegyszerűbb egy ellenállással megvalósítani.

Az  $U_{ZK}$  jellemző (karakterisztikus) Zener-feszültségként a gyártók azt a feszültséget adják meg, amely esetén egy meghatározott  $I_{ZK}$  záróirányú áram (általában  $5 \text{ mA}$ ) folyik. A minimális ( $I_{Zmin}$ ) és maximális ( $I_{Zmax}$ ) Zener-áram között elhelyezkedő jelleggörbe szakaszt működési tartománynak nevezzük.



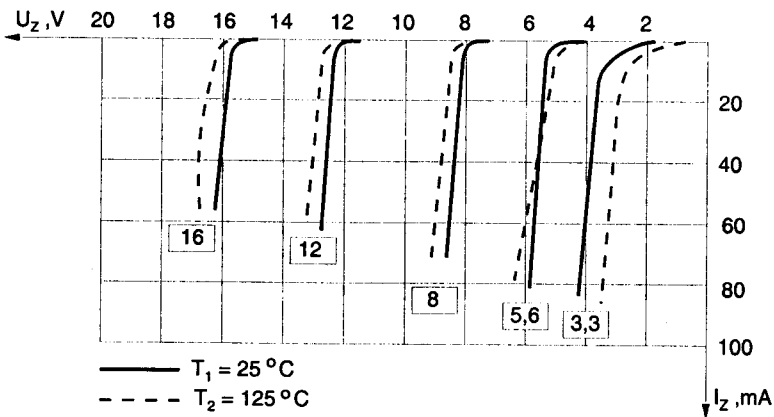
a)

b)

3.13. ábra. Zener-dióda

a) kapcsolása villamos áramkörben b) jelleggörbéje

A Zener-diódák tulajdonságai erősen hőmérsékletfüggők. A letörési feszültség hőmérséklet változás hatására bekövetkező eltolódásának abszolút értéke általában fokenként néhány mV. A 3.14. ábra több különböző Zener-feszültségű dióda karakterisztikájának hőmérsékletfüggését szemlélteti. A folytonos vonalak 25 °C kristályhőmérsékletre, a szaggatott vonalak 125 °C kristályhőmérsékletre érvényesek.



—  $T_1 = 25\text{ °C}$   
 - - -  $T_2 = 125\text{ °C}$

3.14. ábra. Zener-diódák hőmérsékletfüggése

A jelleggörbe hőmérséklettől való függését az  $\alpha_z$  hőmérsékleti tényezővel jellemezhetjük:

$$\alpha_z = \frac{1}{U_{ZK}} \cdot \frac{\Delta U_{ZK}}{\Delta T},$$

ahol  $U_{ZK}$  a Zener-feszültség 25 °C-on,  $\Delta U_{ZK}$  a feszültség eltolódása és  $\Delta T$  a záróréteg hőmérsékletváltozása 25 °C-hoz viszonyítva. A hőmérsékleti tényező megadja a Zener-feszültség eltolódásának mértékét °C-onként.

Az alacsony feszültségű Zener-diódáknak ( $U_{ZK} < 5 \text{ V}$ ) *negatív*-, a magasabb feszültségűeknek ( $U_{ZK} > 5 \text{ V}$ ) *pozitív* a hőmérsékleti tényezője (3.2. táblázat). Igen érdekes tény, hogy az 5 V-os Zener-diódák hőfoktényezője közelítően nulla.

$U_{ZK} \text{ (V)}$	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2
$\alpha_Z \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	-6	-5,5	-5	-4	-2	+1	+2,5	+3,2	+4	+4,5	+4,8
$U_{ZK} \text{ (V)}$	9,1	10	11	12-13	15-16	18-20	22-24	27-36	39-100	100-180	200
$\alpha_Z \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	+5,1	+5,5	+6	+6,5	+7	+7,5	+8	+8,5	+9	+9,5	+10

### 3.2. Táblázat.

A Zener-diódák legfontosabb adatai, amelyek a félvezetőgyártók által közölt adatlapokon is szerepelnek a következők:

#### Határértékek

- legnagyobb megengedett üzemi áram:  $-I_{Zmax}$ ,
- legnagyobb megengedett veszteségi teljesítmény:  $-P_{tot}$ ,
- a záróréteg legnagyobb megengedett hőmérséklete:  $-T_j$ ,
- tárolási hőmérséklet-tartomány:  $-T_s$ .

#### Jellemzők

- differenciális ellenállás:  $-r_z$ ,
- Zener-feszültség:  $-U_{ZK}$ ,
- hőmérsékleti tényező:  $-\alpha_Z$ ,
- hőellenállás:  $-R_{thU}$ .

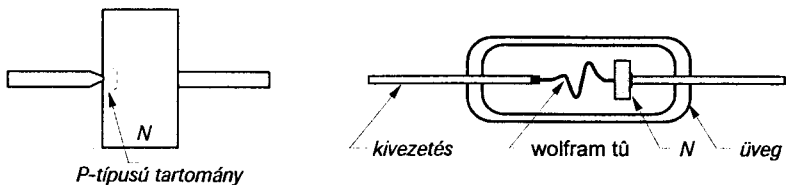
A Zener-diódákat az elektronikai gyakorlatban feszültségstabilizálásra és feszültségátvitelre alkalmazzák. Pozitív- és negatív hőfoktényezőjű diódák megfelelő soros kapcsolásával *hőkompenzált Zener-diódát* kapunk, amelynek Zener-feszültsége megegyezik a sorosan kapcsolt diódák feszültségeinek algebrai összegével. Az ilyen hőkompenzált diódák nagyon alkalmasak referenciaszültségek előállítására.

*Zener-diódák párhuzamos kapcsolása a gyakorlatban nem megengedett.* Párhuzamos kapcsolás esetén a megfelelő működés tökéletesen egyező karakterisztikákat igényelne, amely valóságos diódák esetében nem valósítható meg.

### 3.3.3. Tűsdiódák

A tűsdiódák *N*-típusú germánium vagy szilícium kristályból épülnek fel. A félvezető alapanyagból kis lemezt készítenek, amelynek felületére egy rugós alakra hajlított hegyes huzalt (*tűt*) helyeznek és áramimpulzus segítségével összehegesztik a kristállyal (3.15. ábra). A huzal ötvözőanyagként megfelelő akceptoratomokat tartalmaz (*pl. wolfram*), amelyek az áramimpulzus hatására bekövetkező erős felhevülés során behatolnak az *N*-típusú félvezetőkristályba és nagyon kis átmérőjű ( $\approx 50 \mu\text{m}$ ) és mélységű ( $\approx 10 \mu\text{m}$ ) *P*-típusú tartományt alakítanak ki (3.15. ábra). A tű hegye körül így kialakul egy *mikro-átmenet*.

A tűs diódák nagy előnye, hogy az átmenet kicsiny felülete miatt igen kicsi a rétegapacitása ( $0,2 \div 0,5 \text{ pF}$ ). Ezért alkalmas nagyfrekvenciás működésre is. A semleges rétegek soros ellenállása meglehetősen nagy (*több tíztől, több száz ohmig*) ezért karakterisztikája elég erősen eltér az ideálistól.



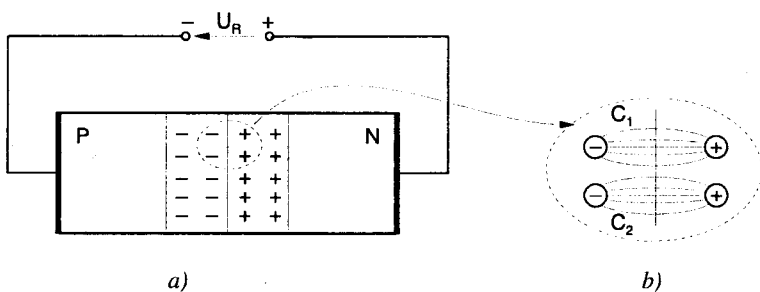
3.15. ábra. A tüssdióda felépítése

A tüssdiódák egyik különleges típusa az aranytűs dióda, amely egyesíti a tüss és a rétegdíóda előnyeit. Készítéskor  $N$ -típusú germánium lemezkével összeolvasztják egy aranyhuzal csúcsát, amely anyagában valamilyen akceptort tartalmaz. A keletkezett  $PN$ -átmenet felülete és így kapacitása is alig nagyobb mint a tüssdiódáké. A kristály erős szennyezése miatt az aranytűs diódák nyitóirányú ellenállása nagyon kicsi.

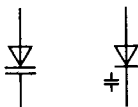
Az aranytűs dióda  $30 + 50$  MHz frekvenciahatárig alkalmazható. A tüssdiódákat és az aranytűs diódákat főleg a híradástechnikában alkalmazzák magasfrekvenciás detektorokban, frekvenciaváltó áramkörökben és kapcsoló áramkörök alkotóelemeiként.

### 3.3.4. Kapacitásdiódák

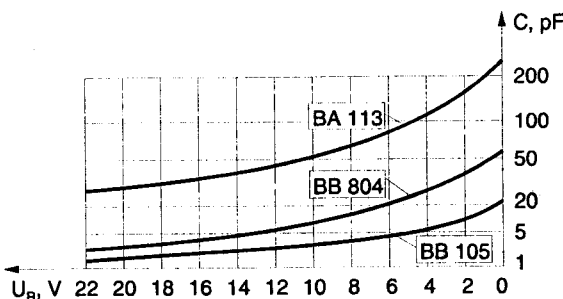
A félvezető díóda tértöltési tartománya a díódával párhuzamosan kapcsolt kapacitásként viselkedik. Az átmenet két oldalán található különböző típusú töltéshordozók páronként elemi kondenzátorokat képeznek (3.16. ábra). Ezeknek az elemi kondenzátoroknak a párhuzamos kapcsolásából alakul ki az átmenet eredő kapacitása, amelyet  $C_s$  záróréteg-kapacitásnak nevezünk.

3.16. ábra. Kapacitásdióda  
a) felépítés b) elemi kondenzátorok

A záróréteg-kapacitás a legtöbbször károsan befolyásolja a díóda működését, mivel magas frekvencián kicsi impedanciája rövidrezárja a  $PN$ -átmenetet, ennek egyenirányító tulajdonságát megszüntetve. Egy kondenzátor kapacitása három tényezőtől függ: a fegyverzet felületének nagyságától, a dielektrikumtól és a fegyverzetek közötti távolságtól. Ennek megfelelően a záróréteg-kapacitás nagysága függ az átmenet felületétől és szélességétől, valamint a félvezetőanyag dielektromos tulajdonságaitól. A tértöltési tartomány szélessége a záróirányú feszültség növelésével megnő, a kapacitás nagysága ugyanakkor csökken. A díóda által képviselt kondenzátor kapacitása a zárófeszültséggel fordított arányban változó érték.



3.17. ábra. A kapacitásdióda áramkörü jelölése



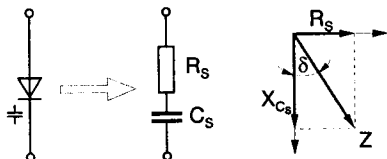
3.18. ábra. A záróréteg-kapacitás feszültségfüggése,  $C = f(U_R)$

A **kapacitásdiódák** (más néven **varikap-diódák**) különleges felépítésű szilíciumdiódák, amelyek feszültséggel szabályozható kapacitásként működnek. A 3.17. ábra a kapacitásdiódák áramkörü jelölését szemlélteti, a 3.18. ábra pedig jellegzetes karakterisztikát mutat be. Az összefüggés a zárórétegkapacitás és a zárófeszültség között nem lineáris. Éles PN-átmenet esetén a záróréteg-kapacitás a zárófeszültség négyzetének reciprokával egyenlő.

A kapacitásdiódák által átfogott kapacitástartomány típusától függően: 1 ÷ 300 pF. Ebben a tartományban a legkisebb és a legnagyobb kapacitás aránya legfeljebb 1: 5 lehet. A **BB113** típusjelzésű varikap diódnál  $C_S = 225$  pF, ha  $U_R = 1$  V és  $C_S = 45$  pF, ha  $U_R = 25$  V.

A kapacitásdióda áramkörü helyettesítő kapcsolását (eltekintve a kicsi soros induktivitás hatásától) a 3.19. ábra mutatja. A helyettesítő kapcsolatban  $C_S$  a záróréteg-kapacitás,  $R_S$  pedig a félvezető kristály soros ellenállása.

A kapcsolat  $\text{tg } \delta$  veszteségi tényezője:



$$\text{tg } \delta = \frac{R_S}{X_{C_S}}$$

A kapacitásdióda jósági tényezője:

3.19. ábra. Kapacitásdióda helyettesítő kapcsolása és vektorábrája

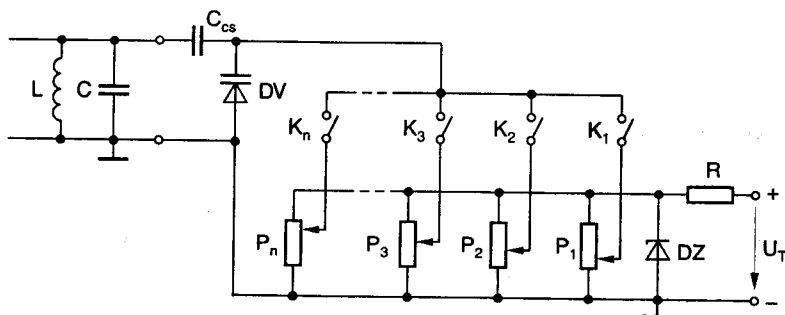
$$Q = \frac{1}{\text{tg } \delta} = \frac{X_{C_S}}{R_S} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_S}$$

A jósági tényező nagysága a kapacitásdióda kapacitásának minőségét jellemzi; ideális esetben  $Q = \infty$ . A kapacitásdiódák legfontosabb műszaki adatai a következők:

- záróréteg-kapacitás (különböző zárófeszültségek esetén):  $C_S$ ,
- a dióda soros ellenállása:  $R_S$  (jellemző érték: 0,5 ÷ 2  $\Omega$ ),
- jósági tényező:  $Q$  (jellemző érték: 100 ÷ 500),
- záróirányú feszültség:  $U_R$  (jellemző érték: 25 ÷ 30 V),
- záróirányú áram:  $I_R$  (jellemző érték: 50 ÷ 100 nA),
- nyitóirányú feszültség:  $U_F$  (jellemző érték: 0,8 ÷ 0,9 V).

A kapacitásdiódákat rezgőkörök feszültségvezérelt hangolására és frekvenciamodulációt megvalósító áramkörökben szokták alkalmazni.

A 3.20 ábra a tévé vevőkészülék hangolóegységének elvi kapcsolását szemlélteti. A Zener-dióda által szolgáltatott egyenfeszültséget felhasználva, mindegyik adóállomáshoz megfelelő feszültség-értéket állítunk be a  $P_1 + P_n$  potencióméterek segítségével.

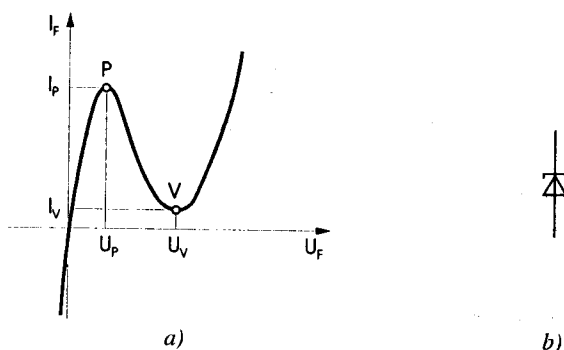


3.20. ábra. Kapacitásdiódát tartalmazó hangolóegység elvi kapcsolása

A beállított feszültség a megfelelő  $K_1 + K_n$  kapcsolókon keresztül, a DV kapacitásdiódára kerül. A dióda a záróirányú feszültség értékének megfelelő kapacitást vesz fel és behangolja az LC rezgőkört. A  $C_{cs}$  kondenzátor egyenfeszültség-leválasztó, valamint váltakozó feszültség csatoló szerepet tölt be.

### 3.3.5. Alagútdiódák

Az *alagútdióda* egy nagymértékben szennyezett  $P^{++}N^{++}$ -átmenetből áll. A félvezető lehet Ge, Si, vagy GaAs alapanyagú. Az alagútdióda feszültség-áram karakterisztikáját és áramköri jelölését a 3.21. ábra szemlélteti.



3.21. ábra. Az alagútdióda  
a) jelleggörbéje b) áramköri jelölése

A félvezető rétegek erős szennyezése következtében, már kis záróirányú feszültségek esetén is kis ellenállású állapotba kerül; nitóirányú polarizálás esetén jelleggörbéjén egy negatív jelleggörbe-tartomány is kialakul (*PV*-szakasz).

A *P* és *V* pontokat meghatározó jellegzetes feszültségértékek:

- $U_p \approx 50 + 100$  mV és
- $U_v \approx 0,5 + 0,9$  V.

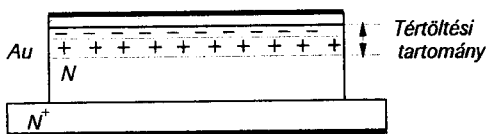
A karakterisztikának ez a része a kvantummechanikai **alagúthatás** következménye. A jellegzőrbe  $P$  és  $V$  pontja között a dióda differenciális ellenállása **negatív előjelet** vesz fel. Ezt a jelenséget nagyon előnyösen használhatják ki rezgőkörök csillapításának megszüntetésére. A megfelelő határfok elérése érdekében főleg magasfrekvencián (1 + 100 GHz) alkalmazzák *detektálásra, rezgéseltésre és erősítésre*.

### 3.3.6. Schottky-diódák

A **Schottky-diódák** egy *fém-félvezető közötti átmenet* tulajdonságait használják ki. Felépítésüket a 3.22. *ábra* szemlélteti, áramköri jelölésüket a 3.23. *ábra* mutatja.

Az  $N$ -szennyezettsgű félvezető rétegre vékony aranybevonatot visznek fel a fém vákuumban megvalósított párologtatásával. A fém-félvezető felületen keresztül diffúziós folyamatok indulnak el, amelynek során az  $N$ -rétegből elektronok vándorolnak át a fémrétegbe. A diffúzió következtében az érintkezési felület két oldalán *tértöltési-zóna* és ebben egy *potenciálgát (Schottky-potenciálgát)* alakul ki. A fém-félvezető átmenet a  $PN$ -átmenethez hasonlóan viselkedik.

Nyitóirányú polarizálás esetén (“+” a fémmre és “-“ a félvezetőre) nő a félvezetőből a fémbbe áthaladó elektronok száma; záróirányú polarizálás esetén az átmeneten áthaladó áramot a fémből a félvezetőbe vándorló elektronok határozzák meg.



3.22. **ábra.** Schottky-dióda szerkezete



3.23. **ábra.** Schottky-dióda áramköri jelölése

A záróirányú áram értéke igen csekély. A *Schottky*-dióda áramvezetését a többségi töltéshordozók biztosítják, a tanulmányozott esetben az elektronok. Nem léteznek kisebbségi töltéshordozók a semleges tartományokban. A *Schottky*-diódák nagyon magas frekvenciákig (speciális típusoknál, *több GHz*) működnek kielégítően. Nyitóirányú feszültségesésük csupán 0,3 + 0,4 V, szemben a szilíciumdiódák 0,6 + 0,8 V-os feszültségesésével. Az elektronikai gyakorlatban főleg a gyorsműködésű digitális integrált áramkörök részegységeként alkalmazzák.

### Összefoglaló kérdések:

1. Mit értünk küszöbfeszültségen?
2. Miért nem zár tökéletesen a félvezető dióda?
3. Melyek a Si-dióda és a Ge-dióda közötti legfontosabb különbségek?
4. Mit értünk lavinahatáson és Zener-hatáson?
5. Hol alkalmazható eredményesen a Zener diódák jellegzetes karakterisztikája?
6. Mi hozza létre a dióda kapacitását és mikor fejt ez ki káros hatást az alkalmazásokban?
7. Mit takar a negatív differenciális ellenállás fogalma az alagútdiódák esetében?
8. Miben különbözik egy Schottky-dióda felépítése egy hagyományos Si-dióda felépítésétől?