

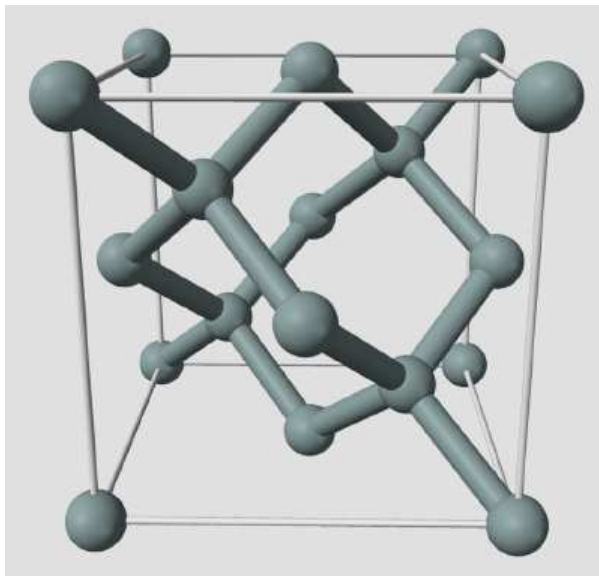
1. A dióda

(írta: Horváth Márk)
(kézirat gyanánt, folyamatos szerkesztés alatt)
(2019. VI. 8.)

1.1.1. Félvezetők

A dióda olyan nemlineáris kétpólus, amely első közelítésben jellemzően egyenirányítóként működik, azaz az egyik irányban vezeti az áramot, a másik irányban gyakorlatilag nem. A dióda régebben vákuumcső (elektroncső) technológiával készült, napjainkban szinte kizárólag félvezető diódát használunk (korábban germánium, ma főleg szilícium alapanyag, illetve fénycsőcsátó diódákhoz gallium-arszenid és egyéb összetett félvezetők). A továbbiakban a félvezető elektronikával foglalkozunk. A diódák működési elve alapul szolgál az összetettebb félvezetők (tranzisztor, tirisztor, stb.) megértéséhez is. A félvezető eszközök kifejlesztéséhez és mélyebb megértéséhez a kvantumfizika eszközei voltak szükségesek. Ebben a jegyzetben az elméleti alapokat minimálisan tárgyaljuk, a hangsúlyt az alkalmazásra helyezzük, ezért javasolt az elmélettel alaposabban foglalkozó jegyzeteket is tanulmányozni (ld. még irodalomjegyzék).

A félvezetők olyan anyagok, amelyek vezetőképességük alapján a vezetők és a szigetelők között helyezkednek el. Jellemzően kovalens kötést alkotnak, így pl. a szilícium és a germánium négy vegyértékű, amelyből mind a négy elektron kötésben vesz részt, ezért alapesetben nem jó vezetők. A vegyértéksáv és a vezetési sáv között lévő ún. tiltott sáv (bandgap, forbidden gap) elég kicsi ahhoz, hogy a hőmérséklet növekedtével néhány elektron átkerülhessen a vezetési sávba. (A fémeknél a vegyértéksáv és a vezetési sáv átfed, ezért jó vezetők; a szigetelőknél nagy a tiltott sáv.) Idegen atomokkal való adalékolással (angolul doping) a félvezetők vezetőképessége nagymértékben javítható, és ezzel érjük el a "különleges képességeiket" is.



1. ábra: Szilícium és germánium kristályrácsa

A szilícium 4 vegyértékű félfémes elem. A Föld anyagában a második leggyakoribb az oxigén után, de tiszta állapotában nem fordul elő (többnyire oxidált állapotban, lásd kvarc, homok). A szilícium (a szénhez és germániumhoz hasonlóan) gyémántrácsban kristályosodik (a félvezetőgyártás egyik fontos problémája az ún. egykristályok gyártása, vagyis a minél nagyobb és minél kevesebb rácshibával rendelkező kristályok növesztése). Mivel mind a négy vegyértékelektronja kapcsolódik egy-egy szomszédos atomhoz, nem marad elektronja a vezetési sávra, így alapesetben rosszul vezet. A hőmérséklet hatására viszont egyes elektronok átkerülhetnek a vezetési sávba, tehát a hőmérséklet növelésével nő a szabad töltéshordozók száma.

A félvezetőket idegen atomok beépítésével adalékoljuk. Már ezred százaléknyi idegen anyag bevitele is tízezerszeresére javíthatja a vezetőképességet. A négy vegyértékű félvezetőt

többszörre 3 és 5 vegyértékű anyagokkal adalékoljuk. (Vannak más típusú félvezetők is, ezekről később szólunk.)

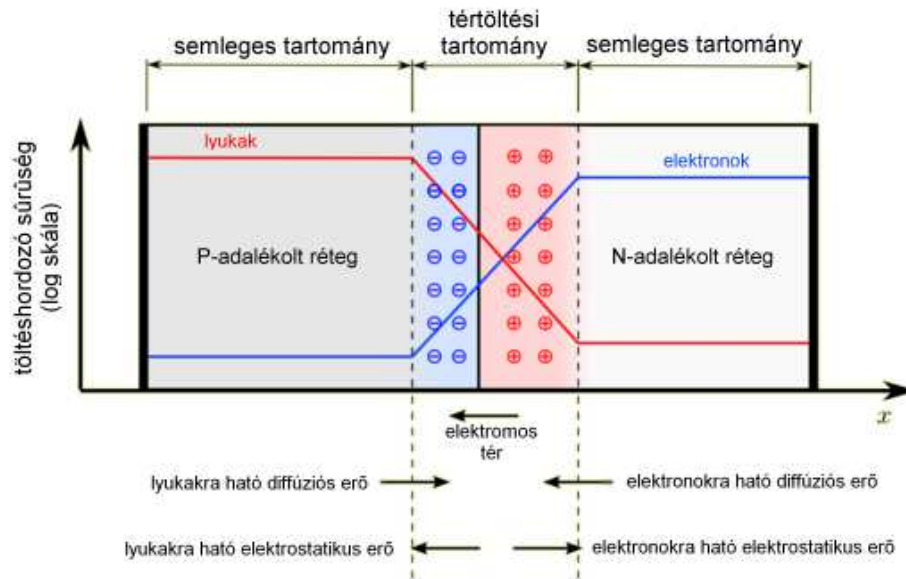
Egy 3 vegyértékű atom (pl. bór, alumínium) három elektronja kovalens kötést létesít a szomszédos szilíciumatomokkal, a negyedik kötéshez azonban hiányzik egy elektronja. Az idegen atomunk azonban "szeretne" a befogadó anyag rácsszerkezetébe "beilleszkedni". (Megj. a kvantumfizikai magyarázatok elkerülése érdekében egyfajta megszemélyesítést használunk; a valóságban ezeknek megvan a bonyolultabb fizikai leírása.) Ilyenkor egy szomszédos atomtól tud elvenni elektront, aminek helyén "lyuk" keletkezik, ami pozitív töltésként viselkedik (elektronhiány). Ezt a lyukat aztán egy megint másik atom elektronja tudja betölteni, akkor ott keletkezik lyuk, és így azt mondhatjuk, hogy a lyuk vándorol a rácspan, pozitív töltéshordozóként viselkedik. Az így adalékolat anyagot P-típusú félvezetőnek nevezzük, az adalékanyagot pedig akceptornak (mert elektront vesz fel, akceptál).

Egy 5 vegyértékű atom (pl. foszfor, arzén) elektronjaiból négy kovalens kötést létesít a kristályrác szilíciumatomjaival, az ötödik elektron azonban nem tud, így már szobahőmérsékleten is könnyen kiszabadul a vegyértéksávból, és a vezetési sávba kerül, tehát negatív töltésű töltéshordozóink lesznek. Az így adalékolat anyagot N-típusú félvezetőnek nevezzük, az adalékanyagot pedig donornak (mert elektront ad, donál).

1.1.2. A PN átmenet

A félvezető dióda készítésekor egy szilícium lapkán egymás mellé egy P és egy N típusú tartományt hoznak létre, egy ún. PN átmenetet (angolul PN junction). A P rétegben pozitív töltésű lyukak, az N rétegben negatív töltésű elektronok a töltéshordozók. (Az ilyen szerkezetben ha egy irányba folyik az áram, akkor az azt jelenti, hogy az egyik irányba mennek az elektronok, az ellenkezőbe a lyukak. A konvencionális áramirány a pozitív töltésé, tehát a rajzokon jelölt irányba haladnak a lyukak, az ellenkezőbe az elektronok, de ez mind ugyanaz az áram.)

A töltéshordozók külső feszültség híján rendezetlen mozgást végeznek a félvezetőn belül. A két réteg találkozásánál az egyik részből átléphetnek a másikba. Ha egy elektron az N tartományból átkerül a P tartományba, akkor ott nagy eséllyel beugrik egy lyuk helyére (hiszen ott egy atomnak "elektronhiánya" volt). Ekkor az elektron (és az előtte ott lévő lyuk) megszűnik szabad töltéshordozónak lenni. Ha egy akceptor (szennyező) atomhoz ugrott be, akkor az az atom innentől negatív töltésű lesz (hiszen eredetileg 3 vegyértékű volt, vagyis 4 elektronnal felszerelve 1 negatív töltése lesz). (Ha szilícium atomhoz ugrott be, akkor is ugyanott vagyunk, a szilícium visszaáll semlegesre, azonban az ő elektronját korábban egy akceptor "elvette".) Hasonlóan, az N tartományból az elektron eljött, tehát ott is csökkent a szabad töltéshordozók száma, és az ottani donor atomok pozitív töltésűvé válnak (hiszen eredetileg 5 elektronjuk volt, abból elvesztettek egyet). Így a P tartományban negatív, az N tartományban pozitív töltésű ionok lesznek az adalékatomokból, a határréteg közelében. Fix töltések (az ionok helyhez kötöttek) ilyen elrendezése elektromos teret kelt (\vec{E} vektor), ami a pozitív töltéstől mutat a negatív fele. Az elektromos tér jellemzője, hogy erővel hat a töltésekre; a vektor iránya mutatja a pozitív töltésre ható erő irányát, az ellenkező irányba hat a negatív töltésekre: $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$

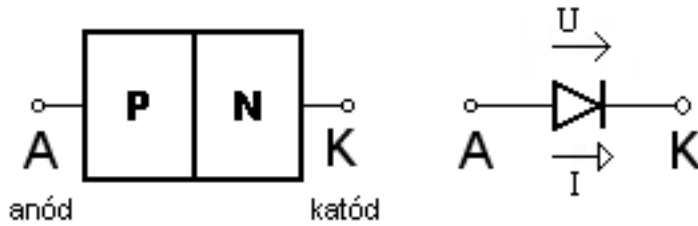


2. ábra: Hőmérsékleti egyensúlyban lévő PN-átmenet

Az így kialakult elektromos tér meggátolja, hogy további elektronok és lyukak tudjanak áthatolni a határon (hiszen pont ellenkező irányba küldi őket, az elektronokat vissza az N tartomány felé, a lyukakat vissza a P tartomány felé). A közepén kialakult réteget kiürített rétegnek illetve tértöltési tartománynak (angolul "space charge region") is nevezik (előbbinek a mozgó töltéshordozók hiánya miatt, utóbbinak a kialakult elektromos tér miatt). A rajta kialakult elektromos tér tehát nehezíti a töltések áramlását.

Külső feszültség hiányában a PN átmeneten az ún. diffúziós és az ún. drift áram kiegyenlíti egymást, az eredő áram nulla. A diffúziós áramot a töltéshordozók koncentráció-különbsége okozza (a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb koncentrációjú felé mozognak). Jelen esetben a többségi töltéshordozók (P-rétegben a lyukak, N-rétegben az elektronok) egy kis része nagy energiája folytán átjut a kiürített réteg potenciálgátján, ez adja a diffúziós áramot. Drift áramnak a töltéshordozóknak elektromos tér hatására történő mozgását hívjuk. Jelen esetben a tértöltési tartomány térerőssége a többségi töltéshordozók számára akadály, a kisebbségi töltéshordozókat (P-rétegbeli elektronok, N-rétegbeli lyukak) viszont N->P irányban gyorsítja, ez lesz a drift áram.

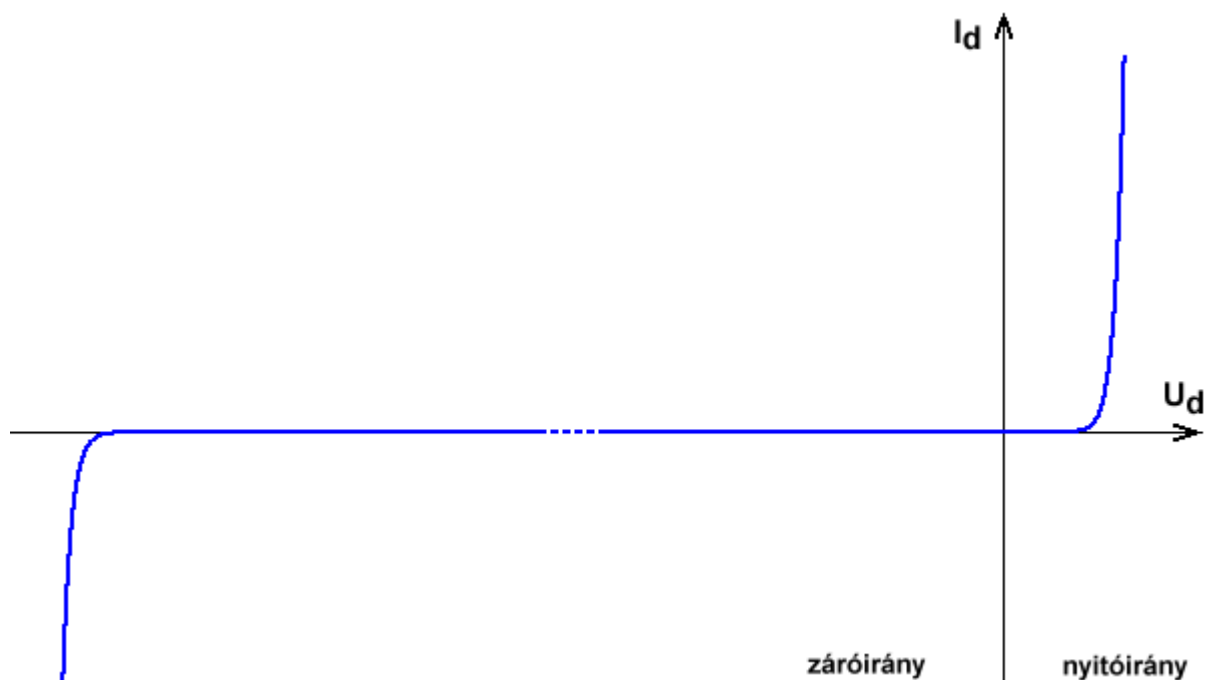
1.2. A dióda rajzjele, bekötése, karakterisztikája



3. ábra: A dióda rétegrendje, rajzjele, nyitóirányú feszültség- és áramiránya

A félvezető dióda többnyire egy PN átmenetből áll (kivétel pl. a Schottky-dióda, amely fém-félvezető átmenet, vagy a PIN dióda, amelynél középen egy adalékolatlan réteg található, de ezek működése is hasonló). A P-réteg felőli kivezetését (elektródát) anódnak, az N-réteg felőlit katódnak nevezzük (az elnevezés még az elektroncsöves korszakból származik). A rajzjele egy nyilat ábrázol, ami a pozitív (nyitóirányú) áramirányt mutatja. Ez a nyíl a P rétegből az N réteg felé mutat.

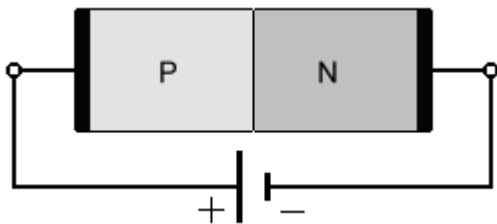
A 2. ábra mutatja a PN-átmenet környékén a töltéshordozók sűrűségét hosszirányban. Az átmenetnél az egyes töltéshordozók átvándorolnak a másik oldalra (elektronok a P rétegbe, lyukak az N rétegbe), ahol az ottani többségi töltéshordozókkal találkoznak, rekombinálódnak (az elektronok „beugranak a lyukakba”, azaz az elektronhiányokba). Az N rétegben – az átmenet közelében – lévő donor atomok elektront vesztenek, pozitív ionná válnak a P rétegben lévő akceptor atomok elektront nyernek, negatív ionná válnak; így kialakul az ún. tértöltési tartomány, más néven kiürített réteg. Az említett ionok ugyanis egy elektromos teret hoznak létre (ld. 2. ábra közepén), ami a P rétegbeli lyukakat és az N rétegbeli elektronokat az átmenettől eltaszítja. Ebben a tartományban tehát nem lesznek szabad töltéshordozók, így akadályozza az áram folyását.



4. ábra: Dióda karakterisztika

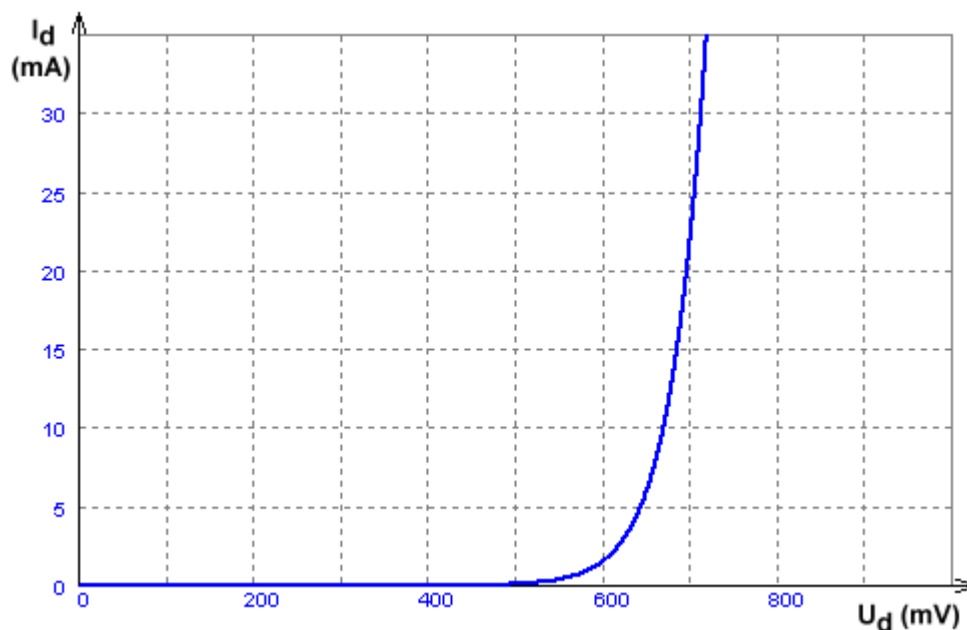
A dióda működését a karakterisztikáján keresztül érthetjük meg. Nyitóirányban meredeken (exponenciális ütemben) nő az áram, vagyis jó vezetőként viselkedik. Nagyon kis pozitív feszültségeken (néhány tized voltig) és záróirányban, amíg a letörési feszültséget nem éri el, közel nulla áram folyik, vagyis szigetelőként viselkedik. A letörési feszültséget elérve újból vezetőként viselkedik. A pontozás a görbe záróirányú részén azt jelképezi, hogy az egyenirányító diódáknál a letörési feszültség (abszolút értékben) nagyságrendekkel nagyobb (akár többszáz vagy ezer volt), mint a jellemzően használt nyitóirányú feszültség (0,6..0,7V körül). A következőkben nézzük meg közelebbről is a nyitóirányú és záróirányú részeit a karakterisztikának.

1.2.1. Nyitóirányú előfeszítés



5. ábra: Nyitóirányú előfeszítés

Ha az N-tartományra a negatív, a P-tartományra a pozitív sarkot kapcsoljuk, akkor nyitóirányú előfeszítésről beszélünk. Ekkor az elektronokra olyan erő hat, ami a kiürített réteg felé taszítja őket, a lyukakra pedig olyan erő, ami szintén a kiürített réteg felé irányul. Elég nagy feszültségnél a töltéshordozók szűkítik a kiürített réteg határait, ezáltal lecsökken annak a vastagsága. Amikor elég kicsi lett, a töltések már könnyen át tudnak hatolni ezen a rétegen, a PN átmeneten a külső feszültség növelésével exponenciálisan megnő a diffúziós áram.



6. ábra Dióda karakterisztikájának nyitóirányú része (az áram- és feszültség értékek csak egy adott típusra érvényesek!)

A dióda karakterisztikája - a letörési tartományt leszámítva - jó közelítéssel egy exponenciális görbével írható le:

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right)$$

ahol

I_0 a kisebbségi töltéshordozók driftárama, gyakorlatilag a záróirányban folyó nagyon kis áram abszolút értéke. (Elméletben adatlapon található érték, gyakorlatilag egy felső korlátot adnak meg rá, ami nagyságrendekkel nagyobb lehet a valódi értéknél, ami pA..nA tartományba esik.) Ennek az áramnak az értéke erős hőmérsékletfüggést mutat.

I_d a dióda árama,

U_d (másképp U_{AK} , úgyismint anód-katód), a dióda feszültsége

U_T az ún. *termikus feszültség* : $U_T=kT/q$, ahol k a Boltzmann állandó, T az abszolút hőmérséklet, q az elemi töltés (proton, illetve elektron töltésének abszolút értéke). U_T értéke kb. 26 mV szobahőmérsékleten.

A dióda tehát egyenirányítóként használható, mert nyitóirányban jól vezet, záróirányban (a letörési tartomány eléréséig) gyakorlatilag nem vezet.

Az exponenciális karakterisztika miatt az áram értéke folytonosan nő a feszültség növelésekor. Nullánál nagyobb feszültségek esetén mindig folyik valamekkora, ráadásul ha bárhol egy szakaszba belenagyítunk, hasonló görbét fogunk látni. Bár szigorúan nézve a szokásosan használt nyitófeszültség (küszöbfeszültség) fogalmunk emiatt helytelen, a gyakorlatban azonban a diódákat meghatározott áramtartományokban használjuk, ahol a nyitófeszültség értéke jó közelítéssel megadható.

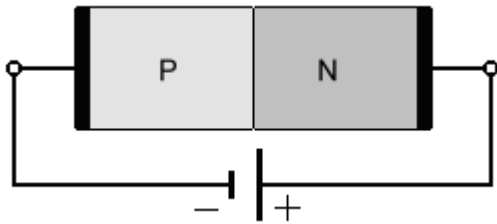
Az ún. gyengeáramú alkalmazásokban jellemzően kb. a tized mA-tól a néhány száz mA-ig terjedő tartományt használjuk, ekkor kb. 0,6...0,7 V (esetleg 0,5..0,8V) közötti értékre áll be a (szilícium) dióda. Az adatlapokon egy adott diódaáram (pl. 1mA vagy 5mA) értékhez tartozó feszültséget adják meg. Ennek az értéknek is van példányonkénti gyártási szórása - ez kb. 0,1 V, azaz pl. az 5mA áramhoz tartozó feszültség is kb. 0,6...0,7V között várható (ez független attól, hogy az előbb említett áramintervallumon is hasonló feszültségek mérhetőek egy adott diódán).

Néhány 100mA, néhány A áram mellett már 0,9...1,5V-ra nő meg a Si dióda feszültsége. Az ún. erősáramú alkalmazásokban ennél is nagyobb áramok is lehetnek. Ezeknél az áramoknál eltérést tapasztalhatunk az exponenciális karakterisztikától, mégpedig azt, hogy a lineárishoz kezd közelíteni. Ennek oka a dióda kis értékű belső soros ellenállása (ezt egy ideális diódával és egy soros ellenállással lehet modellezni).

A feszültség növelésével az áram monoton nő; azonban a dióda fizikai paraméterei, mérete és hűtése felső határt szab az áramnak. A néhány mm méretű gyengeáramú diódák lehet, hogy csak néhány száz milliampert bírnak, míg a több cm-es, hűtőbordára szerelhető erősáramú diódák akár sok tíz vagy sok száz ampert is kibírhatnak.

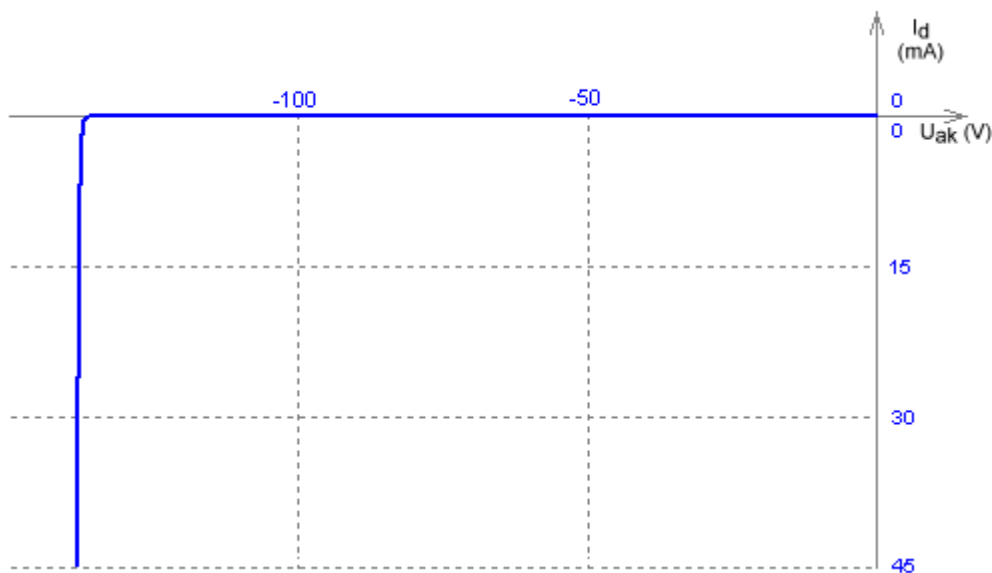
A dióda nyitófeszültségét az alapanyaga határozza meg. Szilícium esetében ez (gyengeáramon) kb. 0,6...0,7V; germánium esetében kb. 0,3..0,4V; Schottky (fém-félvezető) diódánál akár 0,15V is lehet; a különböző alapanyagú LED-eknél 1,5V-tól 3,5V-ig (alapanyagtól és áramtól függően).

1.2.2. Záróirányú előfeszítés



7. ábra: Záróirányú előfeszítés

Záróirányú feszültséget kötve a PN átmenetre, akkor a pozitív potenciál az elektronokat elvonzza a kiürített réteg közeléből, a negatív pedig a lyukakat, így a kiürített réteg vastagsága nőni fog (nem maradnak középen töltéshordozók). Ekkor olyan vastag a kiürített réteg, hogy nem tud diffúziós áram folyni rajta keresztül, csak a kisebbségi töltéshordozók drift árama, ami nagyon kicsi - szilícium diódáknál pA...nA nagyságrendű - tehát a PN átmenet árama ilyenkor jó közelítéssel nulla, az átmenet lezár.



8. ábra Dióda karakterisztikájának záróirányú része (a feltüntetett adatok nem általánosak!)

Záróirányban kellően nagy feszültséget kötve a diódára (ún. letörési feszültség), akkor a Zener- illetve a lavinahatás miatt itt is megindul a vezetés (8. ábra a közel függőleges szakasz). Az egyenirányítás céljára készített diódáknál ez a letörési feszültség nagyobb kell, hogy legyen, mint a bemenő feszültség negatív csúcsértéke, tehát pl. egyfázisú hálózati egyenirányításnál 325V-nál nagyobboknak kell lennie (abszolút értékben), a gyakorlatban így pl. a 400V-os letörési feszültségű diódákat lehetne használni (az egyenirányító diódáknál az adatlapon általában egy minimum értéket adnak meg, azaz a tényleges letörési feszültség ennél valamivel nagyobb is lehet).

A letörési feszültség normál szilícium diódáknál akár 40V-tól akár 1600V-ig (sőt speciális diódáknál akár 25kV-ig) is lehet (ilyenkor a feszültség abszolút értékéről beszélünk, természetesen a letörési feszültség az 3. ábra definiált mérőirány szerint negatív). A

világítódiódáknak (LED-ek) a letörési feszültsége nagyon alacsony (abszolútértékben), akár 5V is lehet, ezért ezeknél külön ügyeljünk arra, hogy ne kerüljenek záróirányú előfeszítésbe (illetve áramuk korlátozott legyen). A Zener-, vagy Z-diódáknak gyárilag relatíve pontosan beállított letörési feszültsége van (néhány volttól néhány tíz-száz voltig), ezekről később szólnunk.

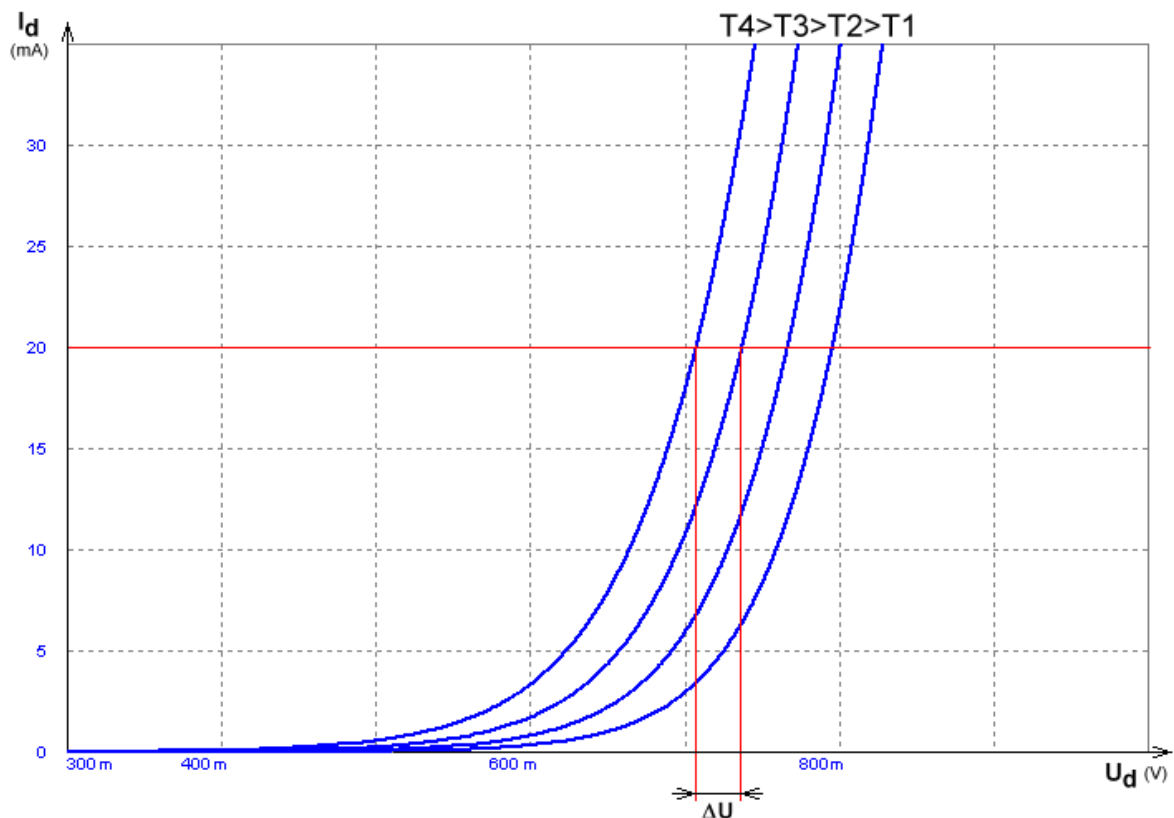
Záróirányban a zárófeszültség növelésével az ideális dióda árama az I_0 áramhoz tart, ez gyengeáramú szilícium diódáknál valós esetben is legfeljebb nA nagyságrendű; germániumnál nagyobb, több tíz μA körüli is lehet. A letörési feszültség elérése után az áram meredeken kezd nőni. Itt a karakterisztika nagyon meredek, vagyis kis feszültségváltozáshoz nagy áramváltozás tartozik. Fordítva nézve nagy áramváltozáshoz is kis feszültségváltozás tartozik, ezért használják a pontosan beállított letörési feszültségű Zener-diódákat stabil referencia-feszültség előállítására.

1.2.3. Dióda hőmérsékletfüggése

A félvezető eszközök karakterisztikái, paraméterei hőmérsékletfüggőek, ami jobb esetben csak működési paraméter (pl. erősítés) változását jelenti, rosszabb esetben, helytelen méretezésnél az eszközök tönkremeneteléhez vezethet.

A dióda (PN-átmenet) nyitófeszültségének (vagyis a „felfutó” szakasz feszültségének) hőmérsékletfüggése (szilícium és germánium alapanyagánál, közelítőleg), állandó áram mellett:

$$\frac{\Delta U_{\text{nyitó}}}{\Delta T} \approx -2 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$$



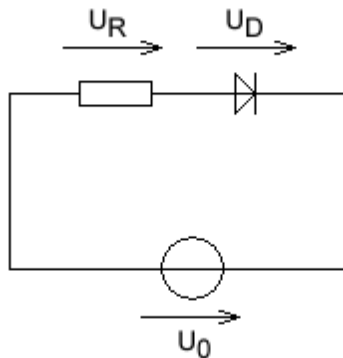
9. ábra: Dióda nyitóirányú karakterisztikája $T_1=0^\circ\text{C}$, $T_2=20^\circ\text{C}$, $T_3=40^\circ\text{C}$, $T_4=60^\circ\text{C}$ hőmérsékleten

A nyitókarakterisztika tehát a hőmérséklet növelésével balra tolódik, Celsius fokenként kb. 2 millivolttal (*a tolódás nem teljesen helyes kifejezés, hiszen az origón továbbra is átmegegy a karakterisztika, passzív eszköz lévén, de a „felfutó” szakaszra jól alkalmazható közelítés*). (A valós érték kb. 1,8...2,2 mV/°C közé esik, 2mV/°C-vel közelítjük.) A hőmérséklet növelésével a záróirányú áram is növekszik, ez a gyakorlatban például a nagyon érzékeny fotodiódás méréseknél (ahol a záróirányú áramot mérjük) jelent problémát.. A változás konkrét értéke függ a félvezető anyagtól. LED-eknél a hőmérsékletfüggés -1,5 ... -5 mV/°C is lehet.

A nyitókarakterisztikából már sejthető, hogy a diódát nem szabad feszültségforrással párhuzamosan kötni. Egyrészt ilyenkor nagyon pontosan kellene a feszültséget beállítanunk - elég, ha pár tized voltal megemelkedik a feszültség a kívánthoz képest, és az exponenciálisan növekvő áram tönkreteszi a diódát. Ráadásul mérés nélkül előre nem ismerjük az egyes példányok pontos karakterisztikáját (hiszen annak gyártási szórása van, ami akár $\pm 0,1$ V lehet).

Másrészt a feszültség nem szándékos megváltoztatásánál kritikusabb jelenség lehet az ún. hőmegfutás. Tegyük fel, hogy sikerült pontosan akkora feszültséget rákapcsolnunk a diódára, ami a kívánt áramot hozza létre. Ha ekkor a dióda hőmérséklete valamiért megnő (egyrészt a saját árama fűti, másrészt a külső hőmérséklet is nőhet), akkor a dióda hőmérsékletfüggése miatt a karakterisztika balra tolódik. Ugyanakkora előfeszítésnél (nyitófeszültségnél) maradva tehát nagyobb hőmérsékleten megnő az áram (a 9. ábra húzzunk egy függőleges szakaszt pl. 700mV-hoz). A megnövekedett áram viszont jobban fűti a diódát, ami miatt még jobban megnőhet a hőmérséklet, még jobban balra tolódik a karakterisztika, még jobban megnő az áram és így tovább; tehát egy pozitív visszacsatolás következhet be, az áram egyre jobban nő, amíg a dióda tönkre nem megy. Ezt a jelenséget nevezzük hőmegfutásnak, és főleg emiatt nem szabad feszültségforrással PN átmenetet (beleértve a tranzisztor bázis-emitter átmenetét) párhuzamosan kapcsolni.

1.2.4. Dióda munkapontjának beállítása



10. ábra: Egyszerű munkapont beállító kapcsolás

Munkapontnak azt a feszültség-áram értékpárt nevezzük, amire a rendszert be akarjuk állítani, vagy másképp amire a rendszer magától beáll. Az áramkörben több eszköz is található, tehát több feszültség-áram páros értelmezhető; ezek közül általában a félvezető eszközök (dióda, tranzisztor, stb.) értékeivel (munkapontjával) foglalkozunk.

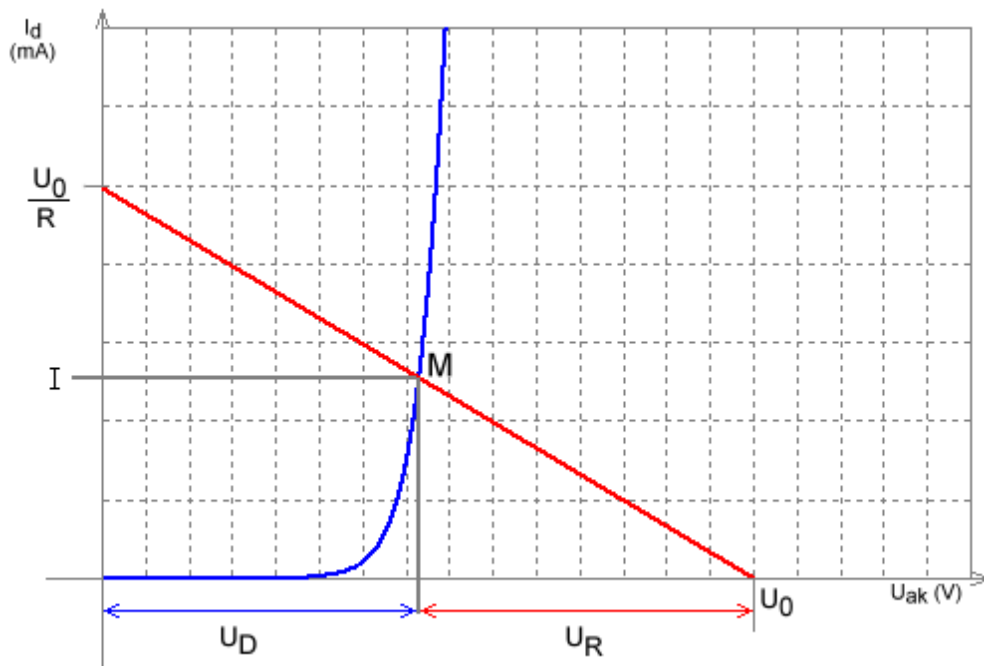
Vizsgáljuk meg a 10. ábrán látható kapcsolást (egyelőre csak nyitóirányban). Írjuk fel a dióda áramának és az ellenállás áramának egyenleteit. Ahhoz, hogy közös grafikonon tudjuk őket ábrázolni, közös x tengelyre van szükség, ezért az I_R -t U_D függvényében fejezzük ki.

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$$

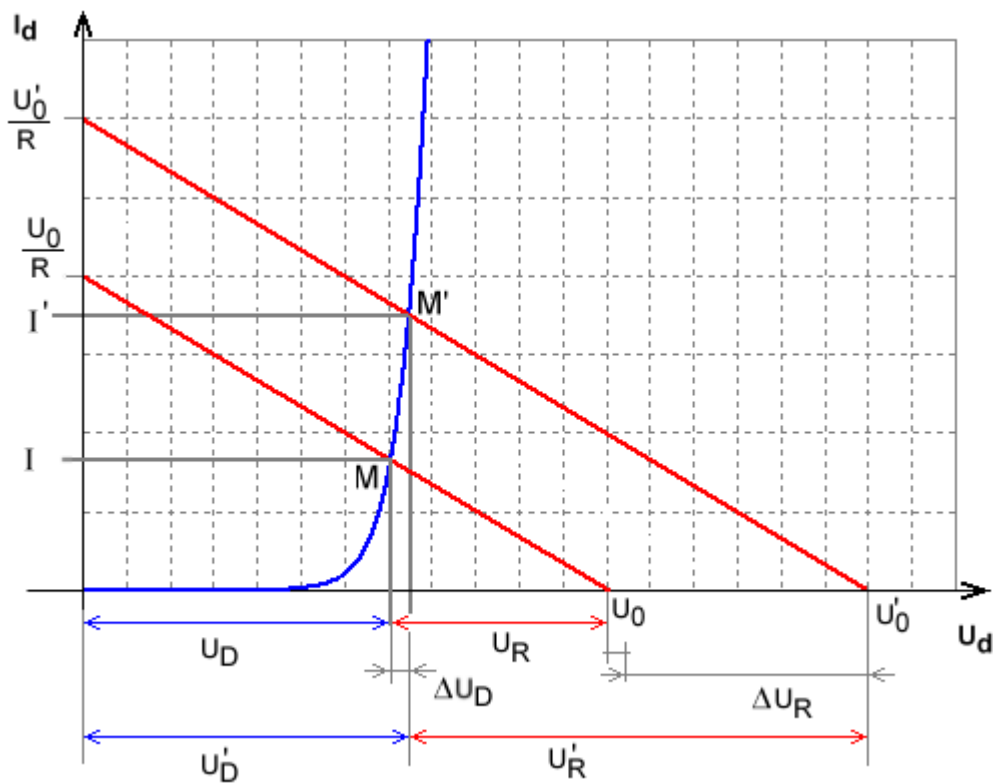
$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U_0 - U_D}{R}$$

$$I_R = I_D$$

Megkaptuk mindkét áramot a diódafeszültség függvényében, tehát ábrázolhatjuk őket egy grafikonon (11. ábra). Az ellenállás egyenlete (pirossal) egy $-U_D/R$ meredekségű egyenest ad, U_0/R és U_0 tengelymetszetekkel. A két áram megegyezik, ezért a két grafikon metszéspontja lesz a munkapont, vagyis az az egyenáramú feszültség-áram értékpár, ahová a rendszer beáll. Itt érvényesül mindkét Kirchhoff-törvény, hiszen az áramok egyenlőek, a feszültségek összege pedig a tápfeszültséget adja. A munkaponti áram minden esetben kisebb lesz az U_0/R értéknél, az ellenállás tehát korlátozza az áramot. Ily módon tetszőleges feszültséget kapcsolhatunk az áramkörre, amíg a munkaponti áram alatta marad a diódára (és ellenállásra) előírtak. A diódára jutó feszültség a karakterisztika nagy meredeksége miatt megmarad a szokásos 0,6..0,7 tartományban, a különbözeti feszültség az ellenálláson fog esni.



11. ábra: Dióda munkapontja



12. ábra: Dióda munkapont eltolódása az U_0 feszültség változása esetén

Nézzük meg, mi történik, ha az U_0 tápfeszültséget megnöveljük U'_0 -re. A 12. ábra látható, hogy ilyenkor az ellenállás egyenes (munkaegyenesnek nevezzük) párhuzamosan eltolódik és az új munkapont nagyobb áramot eredményez. Az exponenciális görbe meredeksége miatt a dióda feszültsége csak kevéssé fog nőni (ΔU_D), a feszültségváltozás nagy része az ellenálláson fog esni ($\Delta U_R = U'_0 - U_0 - \Delta U_D$, a „lépcső” az ábrán az utóbbi tag miatt van). Így a

dióda nyitófeszültségét gyakorlati szempontból akár úgy is értelmezhetjük, hogy normál felhasználás mellett (különböző, bizonyos minimumnál nagyobb áramokon / különböző ellenállások és tápfeszültségek mellett) a dióda feszültsége nem nagyon megy ki a 0,6..0,7 voltos tartományból. (Ezt ne keverjük össze azzal, hogy az egy adott áramértéken mért diódafeszültségnek van egy gyártási szórása is, az adatlapokon pl. gyakran 5mA áram mellett adják meg, hogy 0,6..0,7 V a nyitófeszültség.) Ha a tápfeszültség helyett az ellenállás változik, akkor az egyenes meredeksége változik, a diódára jutó feszültség szempontjából hasonló az eset.

Ha az I áramot akarjuk kiszámolni, elvileg a fenti egyenletekkel kell dolgoznunk, azonban az I_0 értékét ehhez nem ismerjük elég jól. Megbecsülhetjük az áramot úgy, hogy a dióda karakterisztikát egy kb. 0,6..0,7 voltnál lévő függőleges egyenessel közelítjük, és ennek a metszéspontját számoljuk ki a munkaegyenessel. A számoláshoz egyszerűen helyettesítsünk be pl. $U_D=0,6V$ -ot az ellenállás áramának egyenletébe. Kellően nagy tápfeszültség esetén a maximum kb. 1-2 tizedes voltnyi tévedésünk nem eredményez komoly hibát a metszéspontban. Ennek belátására végezzünk egy kis számolást. Tegyük fel, hogy $U_0=5V$ a tápfeszültségünk és $R=4,4k\Omega$ az ellenállás. Első lépésben tegyük fel, hogy a diódánk feszültsége 0,6V lesz. Ekkor az áramunk

$$I = \frac{U_0 - U_D}{R} = \frac{5V - 0,6V}{4,4k\Omega} = 1mA$$

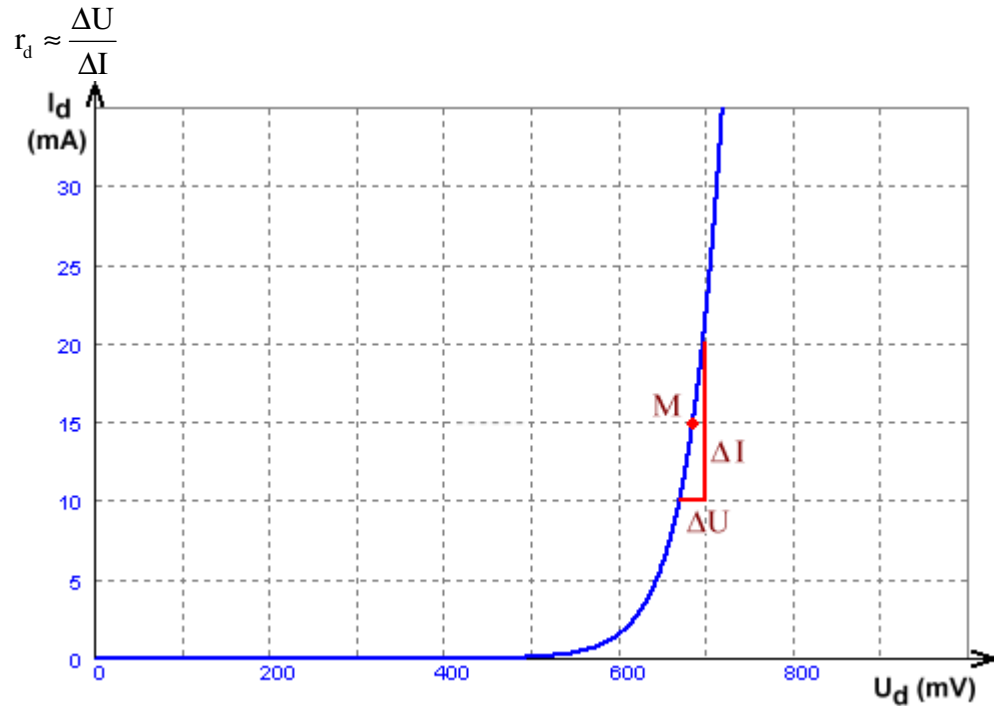
Második lépésben tegyük fel, hogy az előbbi U_D becslésünk téves és valójában 0,7V esik a diódán. (Például egy 1N4148 diódán az adatlap szerint 5mA mellett min. 620mV, max. 720mV esik, tehát kb. 100mV-ot tévedhetünk legrosszabb esetben (jobb esetben max a felét, ha a kettő közé tippelünk)).

$$I' = \frac{U_0 - U'_D}{R} = \frac{5V - 0,7V}{4,4k\Omega} = 0,977mA$$

Az előzőhöz képest ez 2,3%-kal kisebb (miközben a diódafeszültséget 16,7%-kal növeltük meg). Minél nagyobb az U_0 feszültség (és ezzel együtt R), annál kisebb relatív hibával tudjuk az áramot megbecsülni, azaz annál kevésbé számít, hogy 0,6V-nak vagy 0,7V-nak vettük-e fel a dióda feszültségét.

1.2.5. A dinamikus ellenállás

A dióda feszültség- és áramváltozását a munkapont közelében jellemezhetjük a dinamikus ellenállással. A nemlineáris karakterisztika miatt a hagyományos U/I hányados itt kevésbé hasznos (ezt hívjuk statikus ellenállásnak). A dinamikus ellenállás értelmezésénél feltesszük, hogy a munkaponthoz képest kicsi változások vannak a feszültségben és áramban, és ezen a kicsi szakaszon a karakterisztika közel lineárisnak tekinthető. Ekkor



13. ábra: A dinamikus ellenállás értelmezéséhez

Matematikailag pontosabban a karakterisztika munkapontban vett deriváltjaként értelmezhetjük:

$$r_d = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{mp}$$

A deriválást legegyszerűbben a dinamikus ellenállás reciprokára (vezetésre) végezhetjük el, majd az eredmény reciprokát véve:

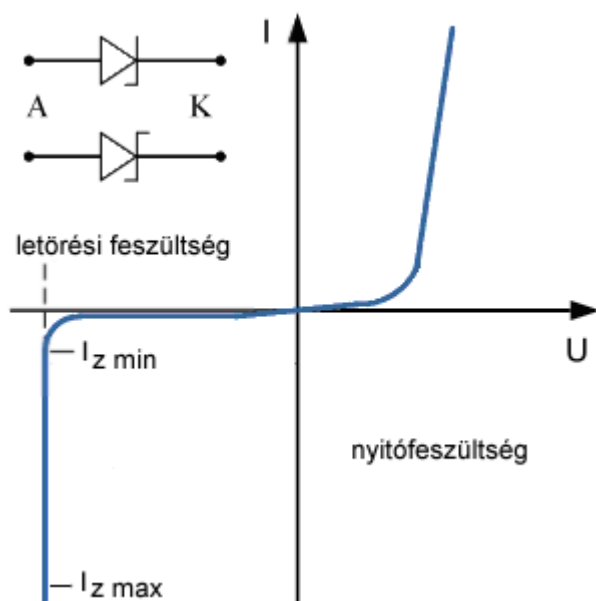
$$g_d = \left. \frac{dI}{dU} \right|_{mp} = \frac{dI_0(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)}{dU} = \frac{1}{U_T} I_0 e^{\frac{U}{U_T}} \approx \frac{I}{U_T}$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{U_T}{I}$$

ahol I a munkaponti diódaáram (a nyitószakaszon a -1 tag elhanyagolható, innen a közelítés a levezetésben).

Tehát pl. 1mA áram mellett 26Ω lesz a dinamikus ellenállás, 2mA mellett már csak 13Ω . Ha ez utóbbi munkapontban 5mV-tal növeljük a dióda feszültségét, akkor az árama $5\text{mV}/26\Omega \sim 0,2\text{mA}$ -rel fog nőni. (Nagyobb áramváltozásnál nem használható ez a számolás, hiszen a képletből láthatóan csökken az r_d értéke.) A dinamikus ellenállás fogalma több eszköznél még elő fog jönni. Lényegében ugyanezt a levezetést fogjuk pl. a bipoláris tranzisztornál használni a meredekség megállapításához.

1.2.6. Zener-dióda



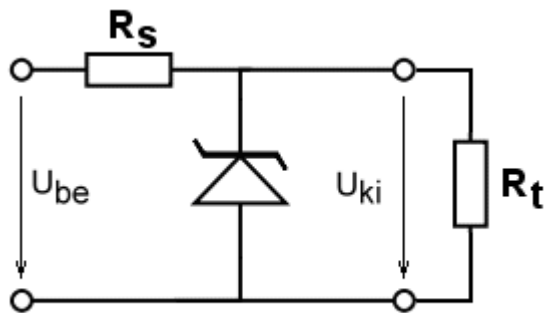
14. ábra: Zener-dióda karakterisztikája és rajzjelei

A Zener-dióda úgy van tervezve, hogy a letörési tartomány alacsony feszültségre van lehozva speciális adalékolással, jellemzően 1V...200V tartományban. A letörési feszültség (*reverse breakdown voltage*) elérésekor a karakterisztika nagyon meredek lesz, nagy áramváltozáshoz kis feszültségváltozás tartozik. Ezért ezt a régiót jól lehet stabilizálásra használni. Ha a diódát sorba kötjük egy ellenállással, ami korlátozza az áramát, és a bemenő feszültség (abszolút értékben) nagyobb, mint a letörési feszültség, akkor a bemenő feszültség változása esetén a abból a dióda mindig kb. ugyanannyit von le, a különbség az ellenálláson fog esni (az elv ugyanaz, mint amit a nyitóirányban előfeszített diódánál bemutattunk a 12. ábra.) A Zener-diódát a fentiekből következően záróirányban kötjük be. A stabil feszültség eléréséhez a diódán legalább az $I_{z\min}$ áramnak kell folynia (14. ábra), ennél kisebb áramnál bekerül a könyök szakaszba, ahol elkezd csökkenni a feszültség; továbbá a letörési szakasz meredeksége nagyobb áramoknál nagyobb (vagyis ott jobban stabilizál). A maximális $I_{z\max}$ áramot a dióda fizikai méretei és ebből (is) fakadó hőleadási képessége határozza meg.

A letörési szakaszt valójában két fizikai jelenség együttesen hozza létre, az ún. lavinahatás és az ún. Zener-hatás. Kb. 5..6V alatti letörési feszültségű diódáknál a Zener-hatás a meghatározó, e fölött a lavinahatás. A letörési feszültség értékének is van hőmérséklet-függése. A Zener-letöréshez negatív, a lavinahatás pozitív hőmérsékleti együttható tartozik (itt a letörési feszültséget abszolút értékben adják meg, tehát a negatív együttható azt jelenti, hogy növekvő hőmérséklet esetén a letörési feszültség abszolútértéke csökken). Az 5...6 V közötti diódáknál (pontosabb értéket az adott típus adatlapjából, még pontosabban mérésekből kaphatunk) található olyan munkapont, ahol a hőmérsékleti tényező nulla (a tényező ui. az áramerősségtől is függ). Hőmérsékletfüggetlen munkapontot létrehozhatnak úgy is, hogy egy

+2mV/K együtthatójú Zener-diódát sorba kötnek egy nyitóirányú (azaz -2mV/K) együtthatójú diódával (ilyenkor az eredő feszültség a letörési és a nyitófeszültség összege lesz).

A letörési feszültség értékétől a letörési tartományban mérhető dinamikus ellenállás értéke is függ. Ennek értéke a kb. 6...8V közötti feszültségű diódáknál a legkisebb (néhányik sorozatban a 6,2V-os, másokban a 7,5V-os diódánál), akár 2-3Ω is lehet. Ez azonban az áramtól is függ, így pl. egy adott (BZX85C) 7,5 voltos dióda adatlapja 35mA mellett 3Ω, 1mA mellett 200Ω dinamikus ellenállást ad meg. Az ettől eltérő feszültségűeké többször tíz vagy száz ohm nagyságrendű is lehet. Így pl. az említett diódánál a 35mA-es munkapontban 10mA áram növekedés $10\text{mA} \cdot 3\Omega = 30\text{mV}$ feszültségváltozást jelent. Ugyanez egy 30Ω-os (pl. 27 voltos) diódánál már 0,3V változást eredményez. A Zener-diódára alapuló feszültségszabályzóknál ezt a jelenséget figyelembe kell venni.



15. ábra: Zener-diódás feszültség referencia áramkör rezisztív terheléssel

A 15. ábra a legegyszerűbb feszültségstabilizáló áramkört mutatja be. Ezt önmagában ritkán használják, inkább bonyolultabb szabályozó áramkörök feszültség-referenciájaként fordul elő (illetve ugyanez az áramkör váltakozóáramon feszültség-határolóként használatos). Ez az áramkör ugyanis érzékeny mind a bemenő feszültség nagyobb változásaira, mind a terhelés változásaira. Kössünk a kimenetre egy ellenállást, a terhelést modellezve (ábrán R_T). Ekkor a bejövő áram megoszlik a dióda és a terhelés között. Minél kisebb a terhelő ellenállás (vagyis nő a terhelőáram), annál kevesebb jut a diódára. Így egyrészt a munkapont vándorol, emiatt a kimenő feszültség is kissé ingadozik, másrészt az I_{zmin} fölé mehet, a könyökszakaszba, ahol jelentősen elkezd csökkenni a feszültség. Ezért nagyobb árammal ez a kapcsolás nem terhelhető. Ezt úgy szokták megoldani, hogy nagy bemenő impedanciájú aktív elemet (pl. tranzisztor, műveleti erősítő) iktatnak közbe, amivel általában visszacsatolást (szabályzást) is megvalósítanak.

Legyen a bejövő áram I_{be} , a soros ellenállás (R_S) feszültsége U_{RS} , a dióda árama I_Z , az R_T terhelés árama I_{ki} . Ekkor $U_{ki} = U_Z$, $U_{be} = U_{RS} + U_{ki}$, továbbá a bejövő áramot kétféleképp kifejezve megkaphatjuk az adott $I_Z - U_Z$ (U_{ki}) munkapont és adott R_T terhelés mellett szükséges R_S soros ellenállás értékét. A számolásokban az egyszerűsítés kedvéért az U_Z feszültség munkapontfüggését gyakran elhanyagoljuk.

$$I_{be} = I_Z + I_{ki} = I_Z + \frac{U_{ki}}{R_T}$$

$$I_{be} = I_{RS} = \frac{U_{RS}}{R_S} = \frac{U_{be} - U_{ki}}{R_S}$$

$$I_Z + \frac{U_{ki}}{R_T} = \frac{U_{be} - U_{ki}}{R_S}$$

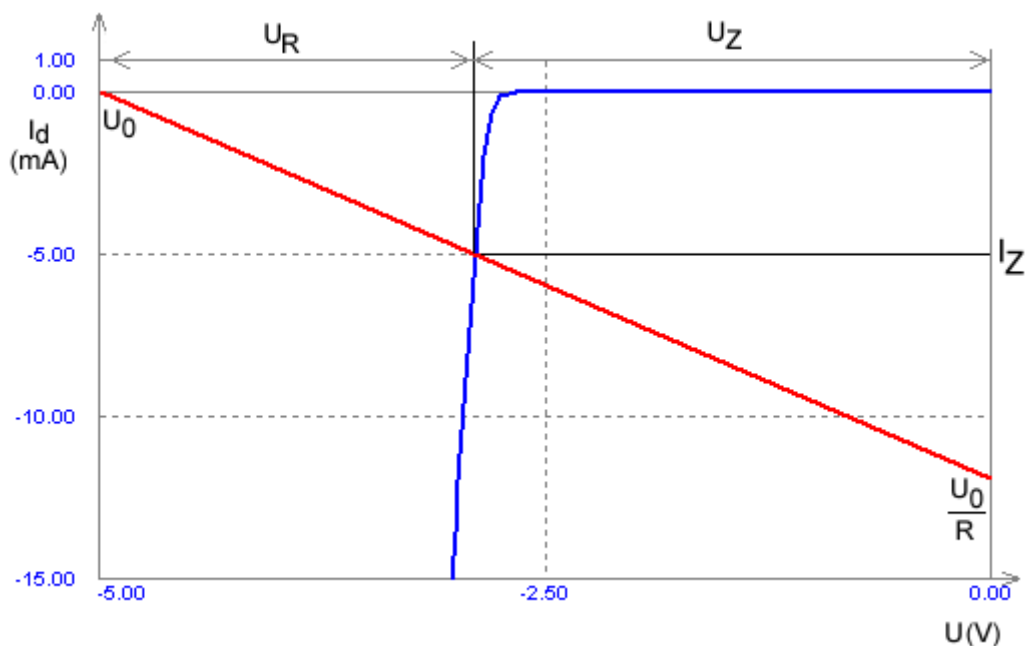
$$R_S = R_T \frac{U_{be} - U_{ki}}{U_{ki} + I_Z R_T}$$

Adott R_S mellett meghatározhatjuk a terhelő ellenállás azon minimálisan szükséges értékét, amely mellett még nem csökken le a dióda árama I_{Zmin} alá. (Továbbra is a könnyebbség kedvéért pozitív számokkal dolgozunk, igazodva ahhoz, hogy a kapcsolási rajzon is a szokásoshoz képest fordítva vettük fel a dióda feszültséget – de itt így értelemeszerű.)

$$R_{tmin} = \frac{U_{ki} R_S}{U_{be} - U_{ki} - I_{Zmin} R_S}$$

A Zener-dióda maximális teljesítményére is természetesen figyelniünk kell:

$$P_Z = U_Z I_Z < P_{Zmax}$$



16. ábra: Zener-dióda munkapontja

1.3. A dióda kapacitása, varicap dióda

A PN átmenetnek kapacitása is van. Nyitóirányban inkább az ún. diffúziós kapacitás, záróirányban a tértöltési kapacitás jellemző, ezek váltakozó áramú körökben jelenthetnek különbséget az ideális diódás számításához képest. A kapacitás nemlineárisan függ a feszültségtől, így a hagyományos $C=Q/U$ képlet helyett differenciális kapacitást értelmezünk:

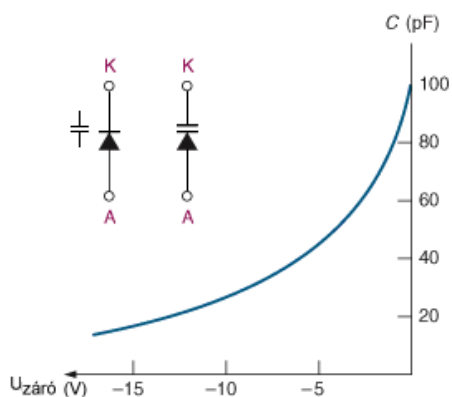
$$C=dQ/dU.$$

Záróirányú előfeszítésnél a kiürített réteg a két oldalán lévő, töltéshordozókat még tartalmazó tartománnyal együtt egy kapacitást alkot. A kiürített réteg d vastagsága a zárófeszültség függvénye, a kapacitás pedig a vastagság függvénye, vagyis a dióda kapacitása változtatható.

A tértöltési kapacitás közelítőleg az alábbi képlettel számolható:

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{U_D}{U_K}}}$$

ahol C_0 a nulla diódafeszültség melletti kapacitás, U_D a diódafeszültség, U_K a kontaktpotenciál (adalekolástól függő állandó, szilíciumnál 0,8..0,9 V körüli). A hatványtényező értéke (itt 1/2) függ az adalekolási profiltól. A diódák záróirányú kapacitását általában grafikusan megadják az adatlapon.



17. ábra: Varicap dióda rajzjelei (baloldali a szabvány szerinti) és karakterisztikája

A zárófeszültséggel változtatható kapacitást ki lehet használni rezgőkörök elektronikus hangolására. Az erre a célra készített diódákat kapacitásdiódának, varicapnak vagy varaktornak hívják. A varicap annyiban különbözik a normál diódáktól, hogy az adalekolási profilját úgy módosítják, hogy a kapacitás átfogása minél nagyobb legyen. A kapacitásuk tipikusan az 1..100 pF-os tartományon belül van.

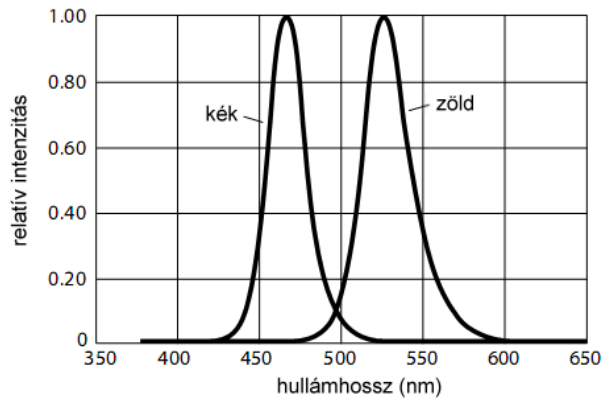
1.4. Világítódioda (LED) és fotodioda

Amikor egy elektron egy lyukkal rekombinálódik, a vezetési sávból a vegyértéksávba ugrik, az energiakülönbséget (a tiltott sáv szélessége) fotonként kisugározhatja. Ez az ún. direkt sáv szerkezetű félvezetőkben valósulhat meg. Ilyen anyag például a gallium-arszenid és módosulatai, míg a szilícium és germánium indirekt sáv szerkezetűek, utóbbiak nem alkalmasak fénykibocsátásra (legalábbis hagyományos formájukban, újabban szilícium nanorészecskékből az ún. kvantumpöttyök technológiájával készítették világítódiodát). A tiltott sáv szélessége a félvezető anyagtól függ, megfelelő összetétel esetén az optikai tartományba esik. A PN átmenetre "ablakot" téve megkapjuk a világítódiodát (LED, *light emitting diode*, fénykibocsátó dióda). A LED-ek egyik legkorábbi anyaga a gallium-arszenid (Ga-As), egy ún. 3-5 vegyület félvezető, ami infravörös tartományban sugároz. Az összetételt változtatva különböző sugárzási hullámhosszakot kaphatunk. (A harmadik oszlopból tipikusan Al, Ga, In, az ötödik oszlopból P, As, N anyagokat használnak. Léteznek 2-6 vegyületek is stb.) Mivel a kibocsátott fotonok energiáját a tiltott sáv határozza meg, a sugárzás spektruma keskenysávú, monokróm lesz. Így például a fehér fény előállítására önmagában nem alkalmas, azt vagy több színből keverik ki, vagy a fénycsövek megoldásához hasonlóan ún. fényport használnak az ultraibolya vagy kék fény széles sávú látható tartományba konvertálásához (a konverzió a magasabb energiájú (kék,ibolya) fotonokat alakítja alacsonyabb energiájúvá (zöld-vörös)).

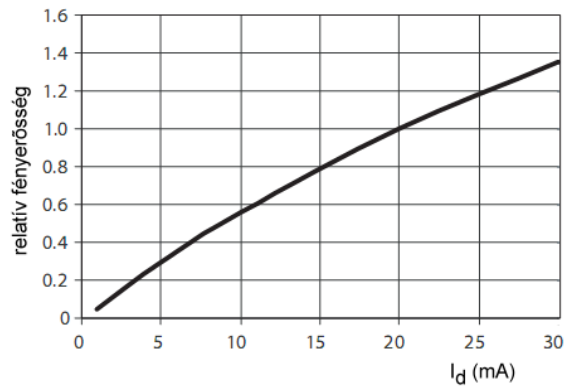
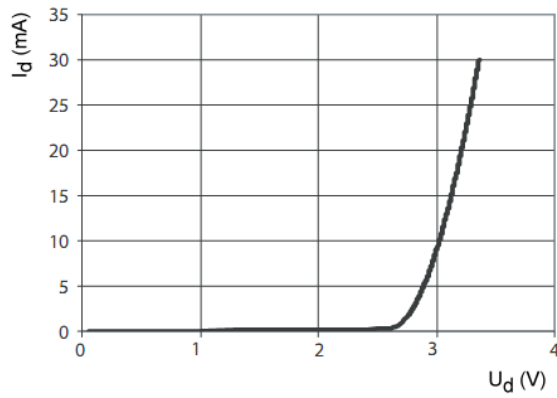
A LED-ek karakterisztikája hasonló az eddig megismert diódákéhoz. A nyitófeszültség az anyagtól függ, jellemzően 1,5...4V közötti tartományban van. (A hagyományos, kijelzésre használtak 1,5...2V között vannak, az újabb, világításra használtak akár 3..4V-ra is felmennek, valamint a felvett teljesítményükben is nagy különbségek lehetnek.) A LED-ek letörési feszültsége kicsi lehet, így különösen vigyázzunk a fordított bekötés elkerülésére. A LED-ek által kibocsátott optikai teljesítmény, illetve fényáram (a karakterisztika meredek részén) közel egyenesen arányos a dióda áramával, így a világítódiodákat jellemzően áramgenerátorosan hajtjuk meg, ha konkrét fényteljesítményt akarunk beállítani. Legegyszerűbb esetben feszültségforrással és soros ellenállással korlátozzuk, illetve állítjuk be a dióda áramát. Ez kijelzési célú LED-eknél teljesen megfelelő, de nagyobb teljesítményeknél (világítási célra), illetve ingadozó tápfeszültségnél vagy hőmérsékletnél ez a módszer nem javasolt.

A LED-ek fényhasznosítása (kibocsátott fényáram és a betáplált elektromos teljesítmény viszonya) jónak mondható, tehát pl. a hasonló fényáramú izzólámpához képest jóval kevésbé melegednek, viszont nehezebb a keletkező hő elvezetése, valamint a fényárama, spektruma és élettartama függ a hőmérséklettől. A világítási célú (nagy teljesítményű) LED-eknél különösen figyelni kell a megfelelő hőelvezetésre.

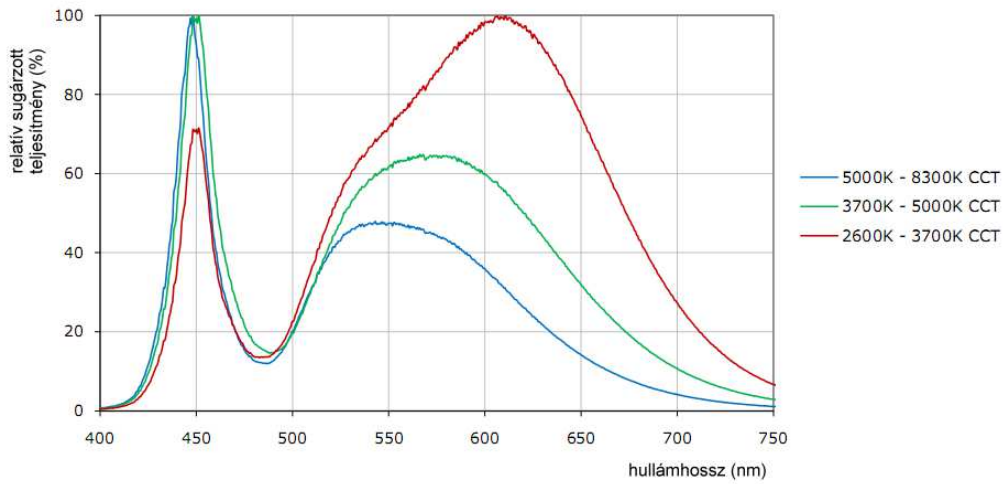
A fotodioda fordított elven működik, a PN átmenetre nyitott ablakon bejövő fotonok a félvezetőbe ütközve elektron-lyuk párt keltenek. Záróirányban a PN-átmeneten elektromos térerősség alakul ki. A fotonok által keltett elektron-lyuk párokat ez a belső villamos tér ellenkező irányba gyorsítja. A hőmérsékleti úton keletkezett párokat is hasonlóan gyorsítja, ezek alkotják a záróirányú áramot, amit a fotodiodánál sötétáramnak hívnak (mivel ez mérhető sötétben). A záróirányban előfeszített fotodiodán a bejövő fényteljesítménnyel egyenesen arányos áram folyik.



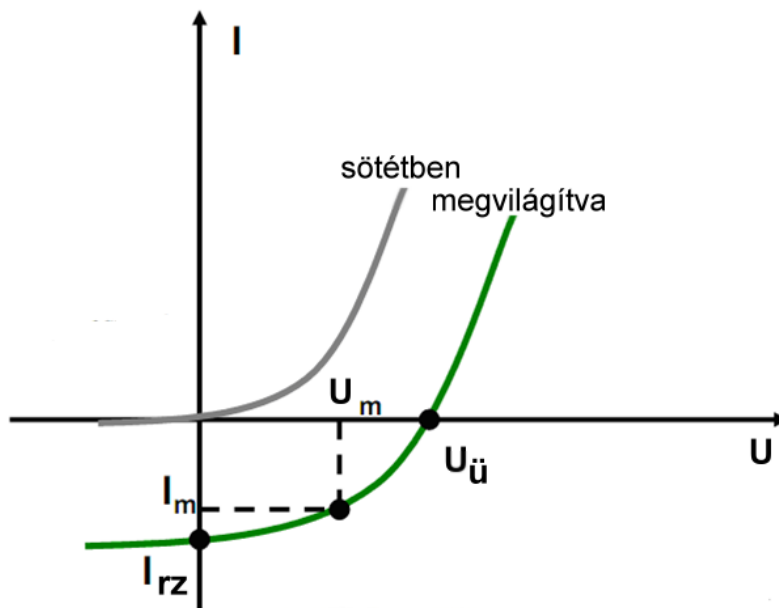
18. ábra: Kék és zöld InGaN LED-ek spektruma



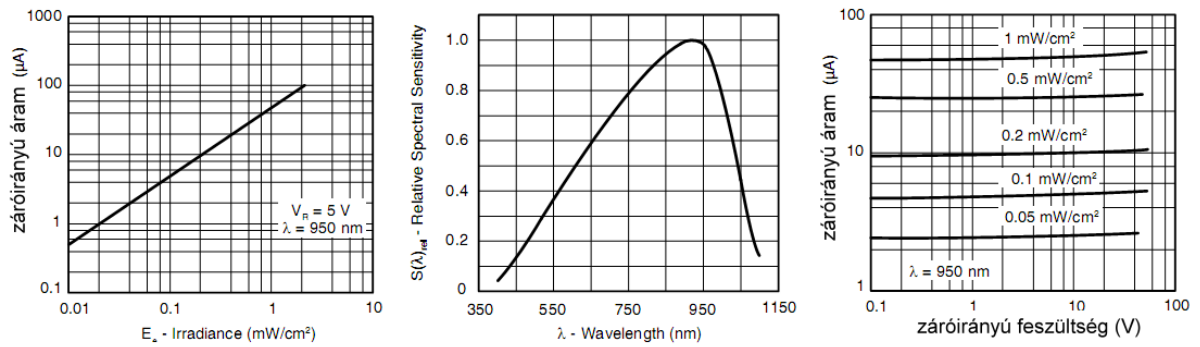
19. ábra: Előbbi LED-ek U-I, illetve I – relatív fényerősség karakterisztikája



20. ábra : Különböző korrelált színhőmérsékletű fehér LED-ek spektruma



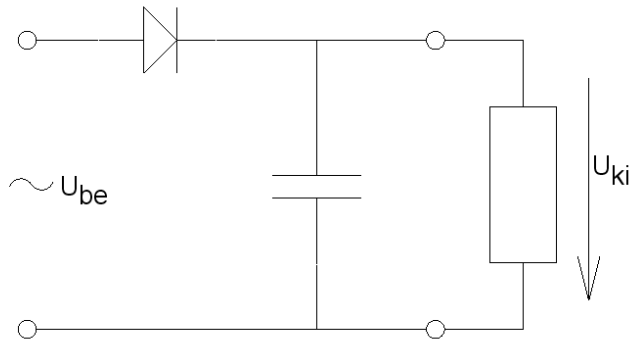
21. ábra: Fotodióda (napelem) karakterisztikája



22. ábra: Egy fotodióda megvilágítás-áram függvénye, spektrális érzékenysége és záróirányú U-I karakterisztikája

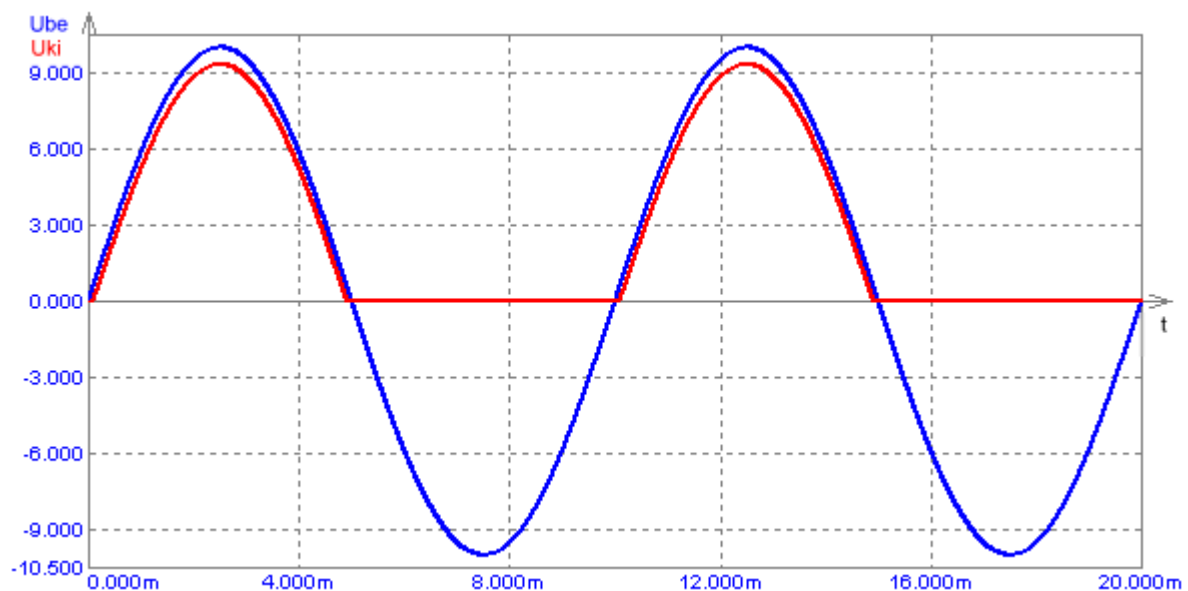
1.5. Egyenirányító kapcsolások

1.5.1. Félhullámú (együtemű) egyenirányító



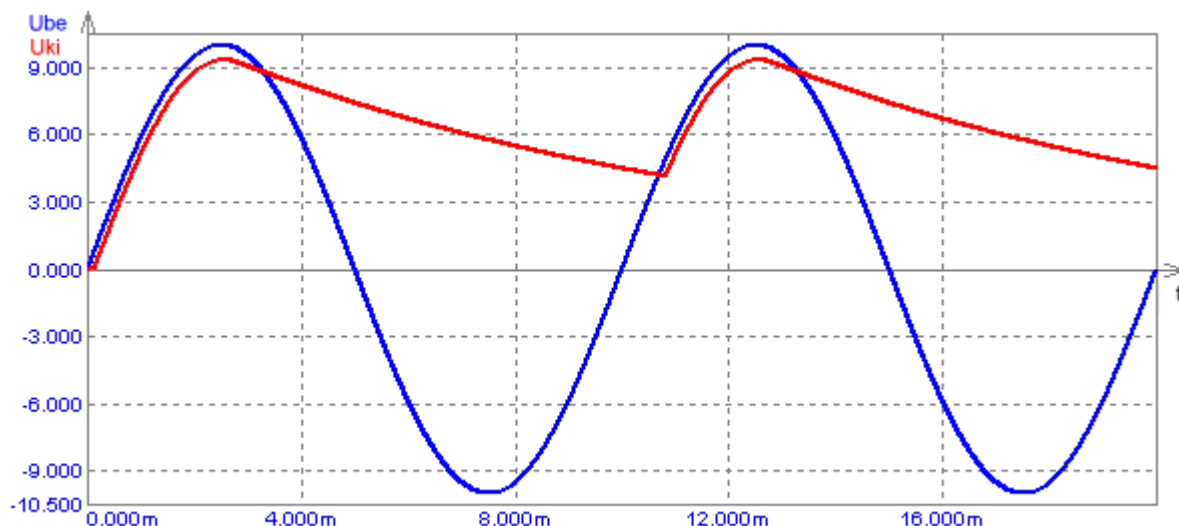
23. ábra Félhullámú egyenirányító kapcsolás ohmos terheléssel

A félhullámú (más néven egyutas együtemű) egyenirányító kapcsolásban a dióda csak a szinuszjel pozitív felét engedi át, tehát a kimeneten minden második félperiódusban jelenik meg egy pozitív félhullám. A terheléssel párhuzamos (puffer-) kondenzátor a pozitív félperiódus elején feltölt, a csúcserték elérése után pedig kisül, így a kimenő feszültség a $\tau=RC$ időállandótól függő mértékben hullámzik (végtelen terhelő ellenállás esetén egyenfeszültség lesz). Az ellenállás a hasznos terhelés (és egyben az áramkorlát). A kimenő feszültség egy dióda nyitófeszültségnyivel kisebb lesz a bemenőnél.



24. ábra Félhullámú egyenirányító bemenete (kék) és kimenete (piros) pufferkondenzátor nélkül

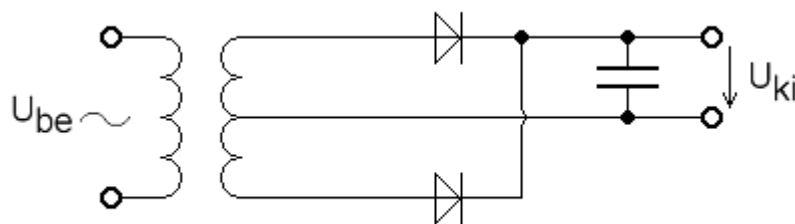
Az egyutas egyenirányítónál a dióda feszültsége záróirányban nagyobb lesz, mint a bejövő csúcsheszültség. Ennek az az oka, hogy az anódon megkapja a bejövő potenciált, a katódon pedig a kondenzátornak az előző töltésből maradt (ellenkező előjelű) potenciálját. Terheletlen esetben így a csúcsheszültség kétszerese eshet a záróirányban, terhelve ennél valamivel kisebb. Emiatt a dióda méretezésénél a letörési feszültséget a csúcsheszültség kétszeresénél nagyobbra érdemes választani.



25. ábra Félhullámú egyenirányító be- és kimenete pufferkondenzátorral, $t=0$ -ban üres kondenzátorral indulva

1.5.2. Teljes hullámú egyenirányítók

1.5.2.1 Középkicsatolt transzformátoros egyenirányító kapcsolás

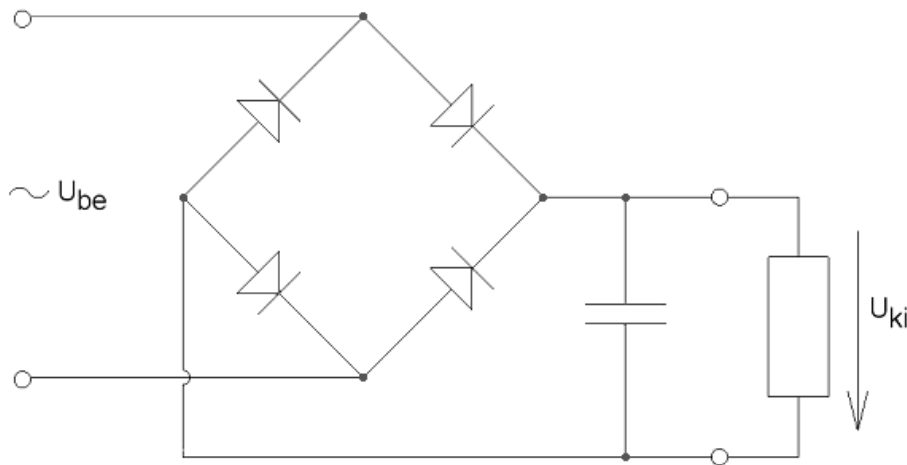


26. ábra: Középkicsatolt transzformátoros teljes hullámú egyenirányító kapcsolás

Ennél a kapcsolásnál a szekunder tekercs középső kicsatolása lesz az új nullapont. A szinuszhullám első félperiódusában a felső tekercskivezetés lesz pozitívabb ennél, a második félperiódusban az alsó kivezetés. A diódákkal összekötve mindkét félperiódus pozitívan fog felül megjelenni, vagyis teljes hullámú egyenirányítót kapunk¹. Ezt az ismert módon pufferezzük a kondenzátorral. A kimeneti jel hasonló a Graetz kapcsolásnál ismertetethez, azzal a különbséggel, hogy egyszerre csak egy diódán esik feszültség, tehát a kimenő feszültség csúcsértéke egy nyitófeszültséggel kisebb a bemenőénél és csak két dióda kell hozzá (ez az elektroncsöves korszakban volt főleg előny, ahol nagyobb volt a nyitóirányú feszültség). Hátránya, hogy középkicsatolt transzformátor szükséges hozzá.

¹ A magyar szakirodalomban többféle elnevezésrendszer is meghonosodott. Főleg régebbi tankönyvekben az egy diódás kapcsolást egyutas együteműnek; a középkicsatolt transzformátorosat egyutas kétüteműnek; a Graetz-félet pedig kétutas kétüteműnek nevezték. Itt az ütem a félszuszok számát jelentette, az utak pedig azt, hogy az egyik ütem hány diódán megy át. Újabbban azonban több jegyzet (és úgy tűnik a szóbeli használat is) mindkét utóbbi (kétütemű) kapcsolást egyszerűsítve kétutasnak nevezi. A félreértések elkerülése kedvéért egy harmadik elnevezési rendszert használtunk, a félhullámú és teljes hullámú egyenirányítót (ez megfelel az angol *half wave* és *full wave rectifier*-nek).

1.5.2.2 Graetz-féle² teljes hullámú (kétutas) egyenirányító kapcsolás



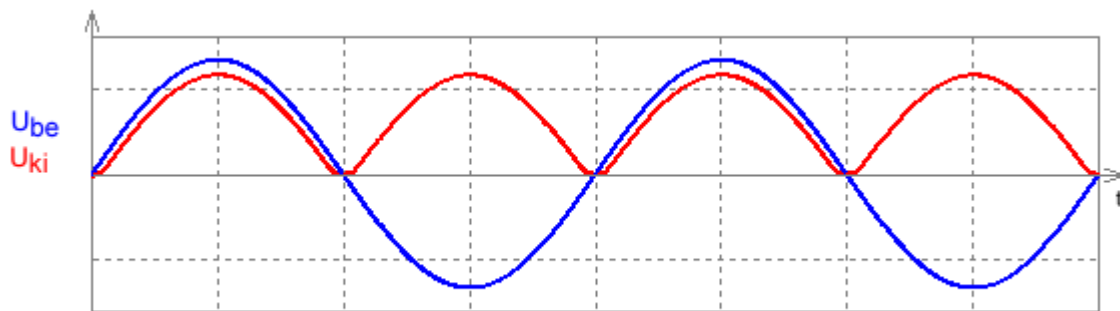
27. ábra Graetz kapcsolású kétutas egyenirányító

A kétutas egyenirányító mindkét félhullámot hasznosítja a szinuszből, az egyik fél egyik diódapáron, a másik fél a másik diódapáron jut el a terheléshez oly módon, hogy mindkettő ugyanabban az irányban essen a terhelésen. Így egy kétszeres frekvenciájú pozitív félhullám-sorozatunk lesz, ezt már sokkal könnyebben tudjuk a kondenzátorral szűrni, hiszen fele annyi ideje van kisülni, tehát csökken a hullámzás. A kapcsolás egyik hátránya, hogy a kimenő feszültség csúcsértéke két nyitófeszültségnivel kisebb a bemenő jelénél, hiszen egyszerre mindig két dióda vezet. Ez kellően nagy bemenő feszültségnél relatíve kis veszteséget jelent csak (ügyeljünk rá, hogy a bemenő jel csúcsértékben jóval nagyobb legyen 1,4 voltnál). A kapcsolás másik tulajdonsága, hogy a bemenet és a kimenet nem földelhető össze (ez előny vagy hátrány is lehet). Például ezért nem tudjuk egyszerre megjeleníteni oszcilloszkópon a bemenő és kimenő jelet, mert a szóp csatornáinak árnyékolásai jellemzően közös földön vannak. A kapcsolása előnye, hogy nem szükséges hozzá transzformátor - bár általában használunk hozzá, ha mondjuk 325V csúcsértékű hálózati feszültséget 5 voltra akarunk váltani, de legalább ilyenkor sem kell (a drágább) középki-csatolt transzformátor. A Graetz-féle kapcsolást szinte minden, hálózatról üzemelő tápegységben megtaláljuk. A középki-csatolt transzformátoros verziót például nagyobb disszipatív tápegységekben találhatjuk meg (főleg olyanokban, ahol a nagyobb áramok miatt egyébként is egyedi transzformátort kellett beletenni, illetve ahol a kapcsolóüzemű működés nem volt célszerű). A modern kapcsolóüzemű AC-DC átalakítók bemenetén jellemzően egy Graetz-féle kapcsolás található.

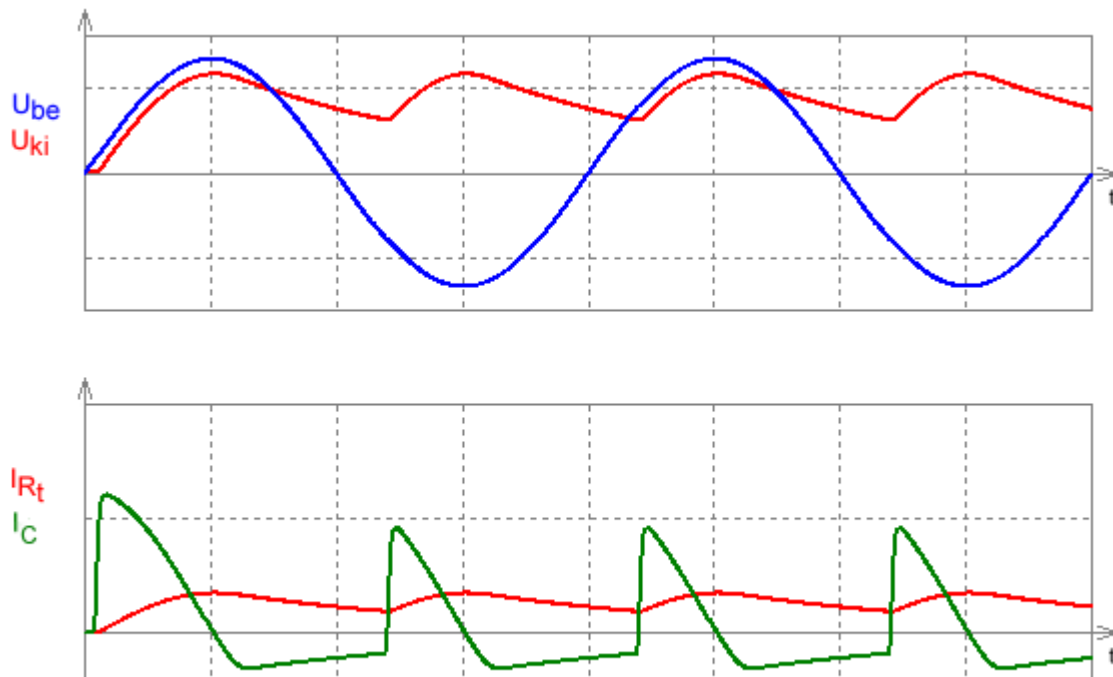
Az ismertetett kapcsolásokban a pufferkondenzátor jelenlétében a kondenzátor áramának alakja a 29. ábra bemutatotthoz hasonló lesz. Az áramtűskék akkor jelennek meg, amikor a kondenzátor feszültsége kisebb lesz, mint a bejövő feszültség és így újra elkezd tölni. Minél nagyobb az időállandó (vagyis lassabban sül ki a kondenzátor), annál rövidebb időben fog – a bejövő feszültség csúcsértéke közelében – tölni, vagyis megjeleni az áramimpulzus. A negatív rész a kisülési áram. A diódák árama hasonló, de ott csak a pozitív áramimpulzusok jelennek meg. Az ábrán látható, hogy bekapcsoláskor a teljesen üres kondenzátor feltöltése

² A kapcsolást először Karol Pollak írta le 1895-ben, Leo Graetz egy évvel később, de utóbbi nevén terjedt el a kapcsolás...

nagyobb áramimpulzust igényel, mint a későbbi töltések, amikor már általában egy nem teljesen üres kondenzátort töltünk újra. Nagyobb kondenzátorok használata esetén az első áramimpulzus nagysága a sokszorosa is lehet a későbbiekének. Ez is az egyik oka lehet annak, amiért a nagyobb áramú berendezéseknél a bekapcsolás pillanatában old a kismegszakító.

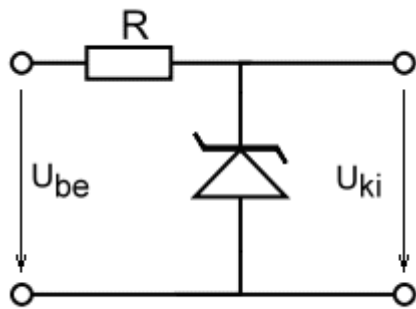


28. ábra: Graetz kapcsolás be- és kimeneti feszültsége pufferkondenzátor nélkül



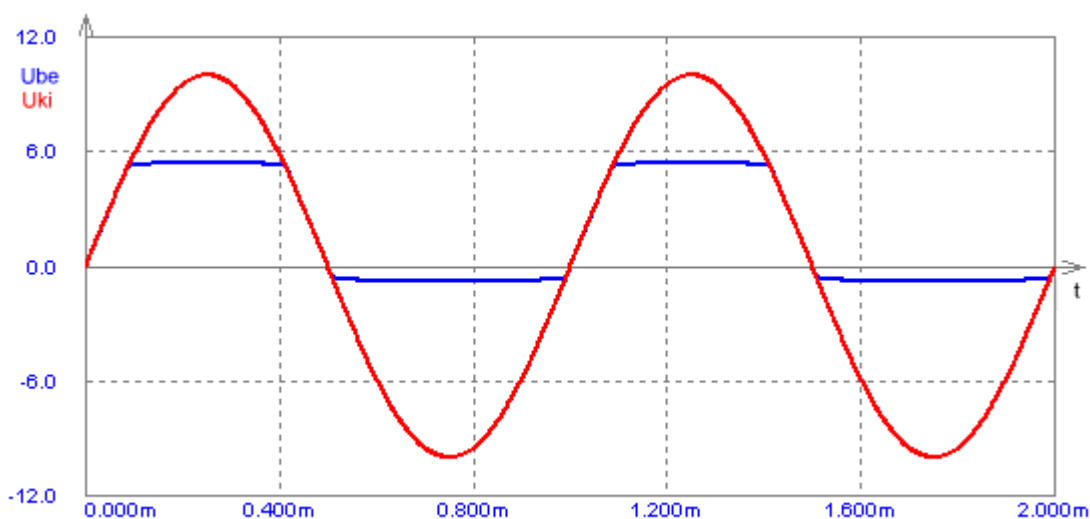
29. ábra Graetz kapcsolás be- és kimeneti feszültsége és áramai pufferkondenzátorral (t=0-ban bekapcsolva üres kondenzátorral)

1.6. Határoló (vágó) áramkörök



30. ábra: Zener-diódás határoló (vágó) áramkör

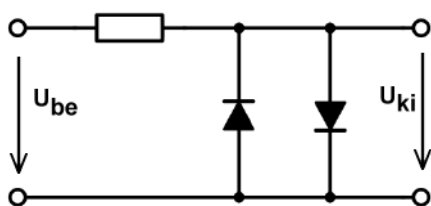
Vizsgáljuk meg, mi történik, ha a Zener-diódás áramkörünk (30.ábra) bemenetére váltakozó (de legalábbis változó) feszültséget adunk. Tegyük fel, hogy a bejövő feszültség maximális értéke nem lesz akkora, hogy a Zener-dióda maximális áramát elérjük akármelyik irányban. A korábban ismertetettekből tudjuk, hogy ha a bejövő feszültség legalább egy kicsivel nagyobb, mint a letörési feszültség, akkor a kimeneten a letörési feszültséget látjuk (ami csak kicsit változik). Azonban ha a bejövő feszültség lecsökken a letörési feszültség alá, a Zener-dióda árama szinte nullára csökken, így a teljes bejövő feszültség megjelenik a kimeneten. Így azt látjuk, hogy ha a bejövő jel pozitív maximuma (csúcsértéke) nem nagyobb a letörési feszültségnél, a kimeneten ugyanezt a jelet kapjuk. (NB. ha nem végtelen ellenállással terheljük le, akkor a két ellenállás feszültségosztóként működik. A végtelen ellenállás helyett a gyakorlatban megteszi a legalább két nagyságrenddel nagyobb.) Ha és ahol a bejövő jel feszültsége nagyobb lesz a letörési feszültségnél, a kimenet a letörési feszültség értékét veszi fel, "levág". Ha a bejövő jel negatívba megy át, ott a Zener-dióda nyitóirányú karakterisztikája érvényesül, vagyis a levágás a nyitófeszültségnél, kb. 0,6...0,7 voltnál következik be.



31. ábra: Zener-diódás határoló áramkör kimenő jele szinuszos bemenet esetén

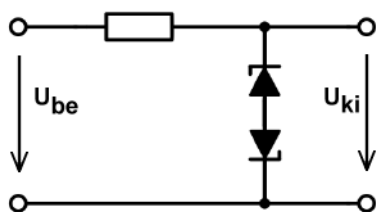
Ezzel az áramkörrel főleg védelmi funkciókat valósítanak meg, de jelek négyszögesítésére, szándékos torzítására is használható. Például egy 5,1 voltos (pl. ZPD5.1) diódával egy hagyományos 0...5V jelszintű digitális rendszer bemeneteit lehet védeni túlfeszültség ellen (általában a negatív ágon a -0,7V még befelé). Digitális rendszerekben azért alkalmazható jól ez a módszer, mert jellemzően nem folynak nagy áramok (nagyok a bemeneti ellenállások, nem akarunk teljesítményt átvinni), ezért a soros ellenállás okozta feszültségosztás nem csökkenti a feszültséget érezhető mértékben.

A kapcsolás hagyományos diódával is megvalósítható, ekkor az egyik irányban 0,7 voltnál vág le, a másik irányban pedig (feltéve, hogy a letörési feszültség elég nagy) nem fog levágni. A vágási feszültség megnövelhető úgy, hogy több diódát sorba kötünk, tehát pl. négy dióda kb. 2,8 voltnál vág le. Azonban ilyenkor a nyitófeszültség bizonytalansága is többszöröződik, tehát inkább 2,4...2,8 voltot kellene írunk.



32. ábra: két diódás határoló

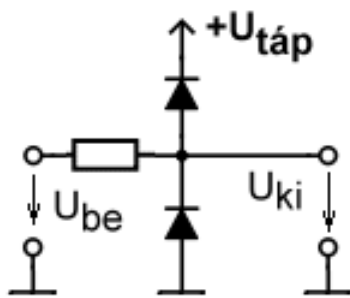
Vizsgáljuk meg, hogy működik a 32. ábra látható kapcsolás (ún. anti-parallel diódák)! Itt bármelyik irányban eléri a bejövő jel feszültsége a nyitófeszültséget, az egyik dióda kinyit és korlátoz. A kimeneti jel tehát kb. $\pm 0,7$ volton lesz határolva. A gyakorlatban ez a határérték ritkán hasznos, de megtaláljuk például néhány műveleti erősítő bemenetei között. Az ilyen fajta erősítőket arra tervezték, hogy csak negatív visszacsatolással használják, ilyenkor pedig a bemenetei között közel nulla feszültség lesz (viszont komparátort vagy oszcillátort nem tudunk az ilyen típusú erősítőtől készíteni).



33. ábra: két Z-diódás határoló

Mi történik, ha az előző kapcsolásban (32. ábra) Zener-diódákat használunk? Akármelyik irányban kezdjük el növelni a feszültséget, valamelyik dióda nyitóirányban lesz. Mivel a nyitófeszültség kisebb, mint a letörési, így kapcsolásunk ugyanazt csinálja, mint a normál diódákkal, $\pm 0,7$ volton határol.

Mi történik, ha két Zener-diódát sorba kötünk, egymáshoz képest fordítva (33. ábra)? Ekkor kellően nagy feszültségnél az egyik dióda mindig nyitóirányban, a másik záróirányban lesz előfeszítve, azaz a vágási feszültség egy nyitófeszültség és egy letörési feszültség összege lesz (az 5,1V letörési feszültségű diódánál pl. így kb. 5,8V).



34. ábra

Főleg digitális áramköröknél használják azt a megoldást, hogy pl. egy IC bemenetén egy diódát a tápfeszültség felé, egyet pedig a föld felé kötnek a 34. ábraához hasonlóan. A digitális áramköröknél a logikai jelszintek jellemzően a nulla és a tápfeszültség (vagy kéttápos rendszerben a két tápfeszültség). Így a fenti megoldással a bejövő feszültségünk nem haladhatja meg a $táp+0,7$ voltot, és nem mehet $-0,7V$ alá, ennyit pedig az áramkörnek el kell viselnie. A gyakorlatban a két védődióda gyakran az integrált áramkör belsejében, a bemeneti fokozatban található. A soros ellenállást ilyenkor is, de a külső alkalmazáskor is (ill. a korábban bemutatott Zener-diódás határolóknál is) gyakran ki szokták hagyni. Ez a gyakorlatban azért nem jelent gondot, mert az előtte lévő fokozat (pl. egy előző IC) kimeneti ellenállása (lényegében a Thévenin-helyettesítőképének a belső ellenállása) a valóságban nem nulla. Adott alkalmazásnál célszerű ellenőrizni ennek a nagyságát és szükség esetén külső ellenállást beiktatni.

1.7. *Ábrák forrásai*

3. ábra: A dióda rétegrendje, rajzjele, nyitóirányú feszültség- és áramiránya
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium.png>

5. ábra: Nyitóirányú előfeszítés, 7. ábra: Záróirányú előfeszítés
http://en.wikipedia.org/wiki/File:PN_Junction_in_Reverse_Bias.png

14. ábra: Zener-dióda karakterisztikája és rajzjelei
http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html

17. ábra: Varicap dióda rajzjelei (baloldali a szabvány szerinti) és karakterisztikája :
http://wps.prenhall.com/chet_paynter_introduct_7/30/7755/1985389.cw/content/index.html

18. ábra: Kék és zöld InGaN LED-ek spektruma,
19. ábra: Előbbi LED-ek U-I, illetve I – relatív fényerősség karakterisztikája
http://www.avagotech.com/docs/AV02-0339EN_adatlapból

20. ábra : Különböző korrelált színhőmérsékletű fehér LED-ek spektrumai :
<http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPG.pdf>
adatlapból

21. ábra: Fotodióda (napelem) karakterisztikája
<http://www.intechopen.com/source/html/38949/media/image2.png>

22. ábra: Egy fotodióda megvilágítás-áram függvénye, spektrális érzékenysége és záróirányú U-I karakterisztikája
BPW34 adatlap <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>

A következő ábrák MicroCap8 program + képszerkesztő segítségével készültek:

6. ábra Dióda karakterisztikájának nyitóirányú része (az áram- és feszültség értékek csak egy adott típusra érvényesek!)
8. ábra Dióda karakterisztikájának záróirányú része (a feltüntetett adatok nem általánosak!)
9. ábra: Dióda nyitóirányú karakterisztikája T1=0°C, T2=20°C, T3=40°C, T4=60°C hőmérséklete
11. ábra: Dióda munkapontja
12. ábra: Dióda munkapont eltolódása az U0 feszültség változása esetén
16. ábra: Zener-dióda munkapontja
24. ábra Félhullámú egyenirányító bemenete (kék) és kimenete (piros) pufferkondenzátor nélkül
25. ábra Félhullámú egyenirányító be- és kimenete pufferkondenzátorral
28. ábra: Graetz kapcsolás be- és kimeneti feszültsége pufferkondenzátor nélkül
29. ábra Graetz kapcsolás be- és kimeneti feszültsége és áramai pufferkondenzátorral
31. ábra: Zener-diódás határoló áramkör kimenő jele szinuszos bemenet esetén

A következő ábrák saját készítésűek:

10. ábra: Egyszerű munkapont beállító kapcsolás
15. ábra: Zener-diódás feszültség referencia áramkör rezisztív terheléssel
23. ábra Félhullámú egyenirányító kapcsolás ohmos terheléssel
26. ábra: Középkicsatolt transzformátoros teljes hullámú egyenirányító kapcsolás
27. ábra Graetz kapcsolású kétutas egyenirányító
30. ábra: Zener-diódás határoló (vágó) áramkör

1.8. *Felhasznált és javasolt irodalom*

- [1] Zsom Gyula: Elektronikus áramkörök I.A, BMF-KVK / OE-KVK
- [2] Zsom Gyula: Elektronikus áramkörök I.B, BMF-KVK / OE-KVK
- [3] Székely Vladimir: Elektronika I. Félvezető eszközök, Műegyetemi Kiadó
- [4] U.Tietze – Ch.Schenk: Analóg és digitális áramkörök, Műszaki Könyvkiadó (orig.: Halbleiter – Schaltungstechnik, Springer-Verlag 1985) (<http://tietze-schenk.com>)
- [5] Hainzmann – Varga – Zoltai: Elektronikus áramkörök, Nemzeti Tankönyvkiadó
- [6] Kovács Csongor: Elektronikus áramkörök, General Press kiadó
- [7] Zombori Béla: Elektronika, Nemzeti Tankönyvkiadó

1.9. *Egyéb források*

- <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2005%20Chhaged%20et%20al%20%28SPIE%20Photonics%20West%29%20Junction%20temperature%20in%20LEDs.pdf> „Junction temperature in light-emitting diodes” (LED hőmérsékletfüggése)