

Félvezetők – Az Alkalmazott fizika I. előadás alapján

Balázs Ádám

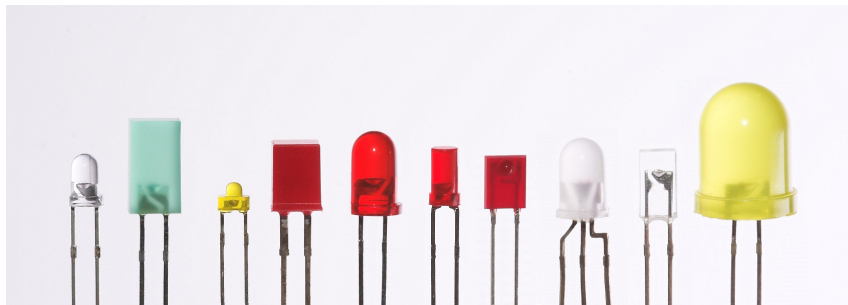
2016. január 29.

Bevezető

Félvezetőknek azokat a kristályos, vagy amorf anyagokat nevezzük, amelyek fajlagos vezetőképességük alapján a szigetelő anyagok és a fémek közé esnek. Szobahőmérsékleten ez az érték nagyságrendileg $10^{-9} \frac{1}{\Omega cm}$ és $10^3 \frac{1}{\Omega cm}$ között van, vagyis gyengén vezetnek az áramot, de szigetelőnek nem jók. Egyik fontos jellemzőjük, hogy az ellenállásuk hőmérsékletfüggése ellentétes a fémekével. Míg a fémek esetében a hőmérsékletet növelve az ellenállás növekszik (egy széles tartományon lineárisan), ezzel szemben a félvezetők ellenállása melegítés hatására exponenciálisan csökkenni kezd. A félvezető anyagokba az iparban és a kutatásokban gyakran adalékanyagokat juttatnak, ezt a műveletet szennyezésnek, vagy más néven dópolásnak hívják, és ennek során a vezetési tulajdonságok megváltoznak. A félvezetők a legtöbb mai elektromos eszközben megtalálhatók, például az egyenirányító diódákban, a tranzisztorokban (1.ábra), a LED-ekben (2.ábra), a különböző fénydetektorokban, a napelemekben és az integrált áramkörökben is. (3.ábra) A félvezető a XX. és XXI. században az egyik meghatározó technológia lett. [1] [2] [3] [4]

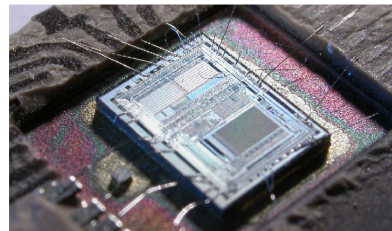
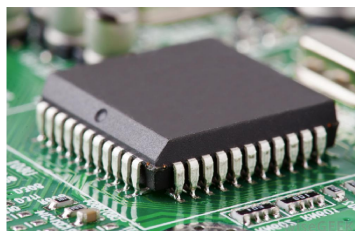


1. ábra. A dióda (balra) két-, a tranzisztor (jobbra) háromrétegű félvezető eszköz



2. ábra. Különböző típusú LED-ek, vagyis fényemittáló diódák

A félvezetőket szilíciumból készítik, ami a homok egyik összetevője, és az oxigén után a földkéreg második leggyakoribb eleme, vagyis nagy mennyiségben áll rendelkezésre alapanyagként. A szilícium mellett germániumból és gallium-arszénből (GaAs) is készítenek félvezetőket. A jegyzetben először áttekintjük a félvezetők fizikáját, majd a dióda, a LED, és a tranzisztor működése után a számítógépek központi vezérlő egységének, a CPU-nak a gyártását követjük végig. A félvezetők témakörét pedig a Moore-törvény ismertetésével zárjuk le.

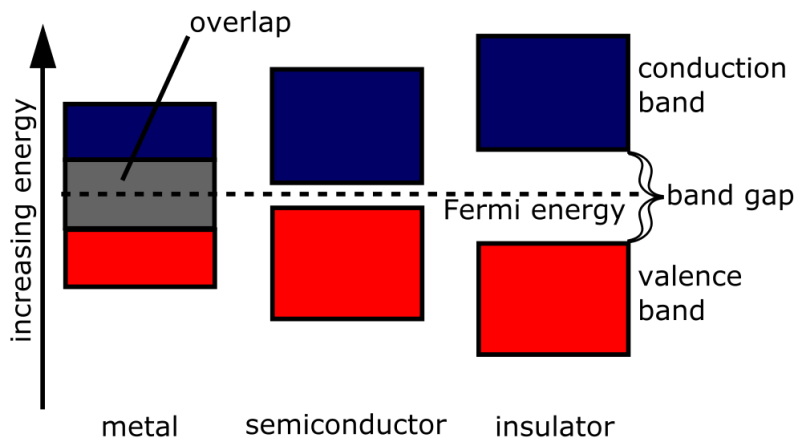


3. ábra. A nyomtatott áramkörökön lévő IC-eket (jobbra) leggyakrabban fekete műanyag tokozással látják el. A belső felépítés balra látható

A félvezetők tulajdonságai

A szilárd anyagok csoportosítása

Az elektromos vezetéshez az anyagban szabad töltéshordozóknak kell lenniük, a szilárd anyagok esetében ez azt jelenti, hogy elektronoknak kell lenni a vezetési sávban, ami a sáv szerkezeti modellben a vegyértéksáv fölött helyezkedik el. Ez utóbbiban vannak a kötött elektronok, és a két sávot a tiltott sáv választja el egymástól. A szilárd anyagokat ezen tiltott sáv (elektronvoltage megadott) nagysága alapján tudjuk csoportosítani (4. ábra). Ha a tiltott sáv nagysága kicsi, vagy a vegyértéksáv és a vezetési sáv átfed egymással, akkor az anyag vezető (pl.: fém), ilyenkor a Fermi-szint a tiltott sávba esik. Ha a tiltott sáv nagy (kb. 3 eV feletti), akkor az anyag szigetelő, ugyanis a tiltott sáv nagyságának jelentése éppen az, hogy mennyi energiát kell egy elektronnal minimálisan közölni kell ahhoz, hogy az a kötött állapotból a vezetési sávba lépjen, ezáltal szabad töltéshordozóvá váljon. A félvezetők esetén ez a tiltott sáv kb. 0.5 eV és 3 eV közé esik.



4. ábra. A szilárd anyagok csoportosítása a vezetési sáv és a vegyértéksáv nagysága alapján. A Fermi-szint jelöli, hogy meddig vannak alulról elektronokkal betölve az állapotok. Piros színnel a vegyértéksáv, kézzel a vezetési sáv látható.

A vezetőképesség hőmérsékletfüggése

Az E_g alapján csoportosíthatjuk az anyagokat, ezen adatok láthatóak az 5. ábrán. Azonban az elektromos viselkedés, vagyis a vezetőképesség függ a hőmérséklettől is.

Elem	E_g (eV)	Vegyület	E_g (eV)
C (gyémánt)	5,48	GaAs	1,43
Si	1,11	ZnS	3,56
Ge	0,67	InSb	0,18
		GaN	3,44

5. ábra. Az E_g nagysága szén, szilícium, germánium és néhány vegyületek esetén

A hőmérséklet szerepe egy egyszerű kísérletben demonstrálható. Első lépésként sorosan összekapcsolunk két izzót, amelyek közül az egyiket összetörtük és az izzószálat eltávolítottuk. Ekkor a kapcsolás nyitott, vagyis az izzó nem világít, mikor feszültséget kapcsolunk az izzókra, ahogy az a 6. ábrán látható.

Hevítve az összetört izzót, egy idő után a másik izzó világítani kezd, jelezve, hogy az áramkör zárt, vagyis az üveg vezetőként viselkedett (7.ábra). A kísérlet mikroszkópikus magyarázata, hogy egyre több elektron került fel a vezetési sávba, így az anyag vezetővé vált. Látható, hogy a fent leírt csoportosítás nem abszolút, a hőmérséklettől erősen függhet az anyag elektromos tulajdonsága.



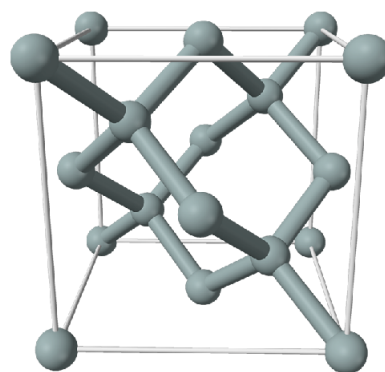
6. ábra. Egy izzót sorba kötöttünk egy olyan izzóval, amit előzőleg összetörtünk



7. ábra. A hevített üvegdarab vezetőként viselkedett és zárta az áramkört

A szilícium tulajdonságai

Nézzük meg a 8. ábrán, hogy milyen a szilícium kristályszerkezete! A gyémántéhoz hasonló tetraéderes a kristályrácsa, és minden atomhoz 4 másik kapcsolódik kovalens kötésekkel. A szilíciumnak 4 elektronja van a külső elektronhéján, és így 4 másikkal kialakítva a kötést stabil szerkezet alakul ki, hiszen 8 elektron a legkülső elektronhéjon (a nemesgáz elektronszerkezethez hasonlóan) stabil állapotot jelent. Külsőre sötétszürke, fémesen csillogó elem, mely alacsony hőmérsékleten szigetel, magasabb hőmérsékleten vezeti az áramot, ezért a félvezetőkhez tartozik. [5] [6] [7]



8. ábra. A szilícium külső megjelenése és kristályszerkezete

Vezetési tulajdonságok

Az intrinszik félvezetők

Az elektron fermion, ezért az állapotát a Fermi-Dirac statisztikával lehet leírni. A részecskeszám-sűrűség az energia függvényében a következő módon írható fel:

$$f_0(E) = \bar{n}_E = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1} \quad (1)$$

Ahol a μ az adott félvezető kémiai potenciálja, k a Boltzmann-állandó, értéke $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$ és T a hőmérséklet Kelvinben. Két esetet különböztetünk meg, az egyikben az energia és a kémiai potenciál különbsége jóval nagyobb mint a kT .

$$E - \mu \gg kT \quad (2)$$

Ekkor az egyrészecske állapotban a nevezőben lévő exponenciális jóval nagyobb, mint az 1, ezért közelíthető az alábbi módon:

$$f_0(E) \approx e^{-\frac{E-\mu}{kT}} \quad (3)$$

Ha viszont a különbség kicsi, akkor az exponenciális értéke is kicsi, ezért közelíthető a Taylor-sorának első két tagjával, vagyis ha a $\frac{1}{1+x} \approx 1 - x$ közelítést felhasználjuk:

$$f_0(E) \approx 1 - e^{-\frac{E-\mu}{kT}} \quad (4)$$

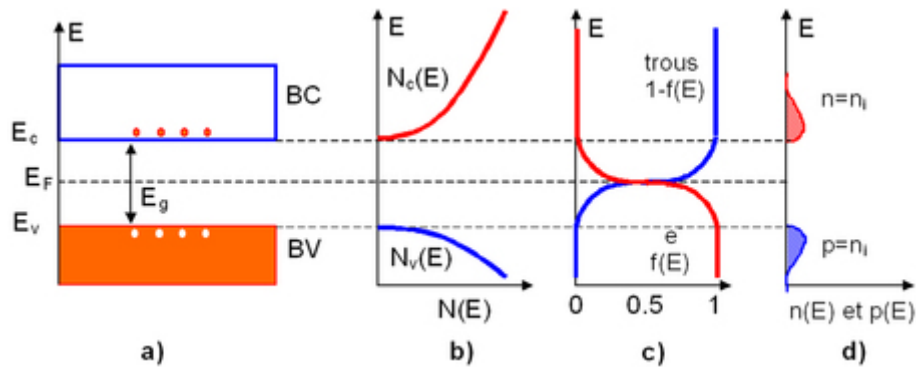
A gerjesztett elektronok száma az alábbi módon adható meg:

$$n = N_0 \cdot e^{-\frac{E_C - \mu}{kT}} \quad (5)$$

A lyukak számára az adódik, hogy:

$$p = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu - E_V}{kT}} \quad (6)$$

Mivel a félvezetőben a lyukak és gerjesztett elektronok párosával keletkeznek, illetve



9. ábra. Az intrinszik félvezető állapotainak betöltöttsége

szűnnek meg, ezért számuk megegyezik, vagyis $n = p$. Ennek alapján adódik, hogy az összes gerjesztett részecske száma:

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{P_0 \cdot N_0} \cdot e^{-\frac{E_C - E_V}{2kT}} = C \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (7)$$

Vagyis az E_g gap energia függvényében változik a vezető elektronok száma. A Drude-modell alapján a vezetőképességre az adódik, hogy

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m} = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (8)$$

A 10. ábrán lévő táblázat foglalja össze ezeket az értékeket egyes anyagokra:

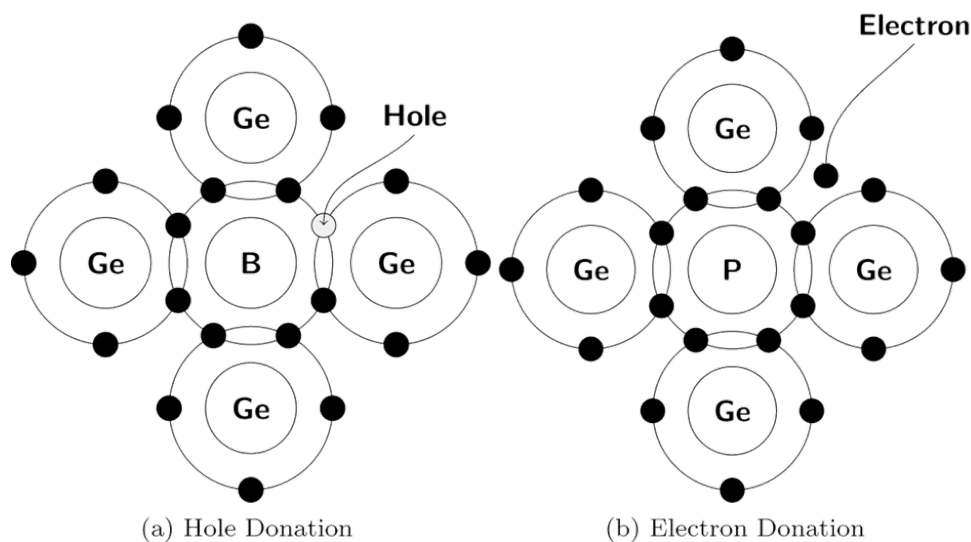
Elem	E_g (eV)	$\exp(-E_g/2kT)$	Vezetőképesség (S/m)
C (gyémánt)	5,48	10^{-47}	$\sim 10^{-13}$
Si	1,11	$2 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Ge	0,67	$1,5 \cdot 10^{-6}$	2,17
GaAs	1,43	$4 \cdot 10^{-13}$	10^{-7}

10. ábra. Keressünk összefüggést a vezetőképesség és az exponenciális értékek között

A leírt esetben lyukak is vezethetnek, de a driftsebesség és a τ relaxációs idő is különbözhet. Ez a tiszta, nem szennyezett, ún. intrinszik félvezetők vezetése. Ez a fajta vezetés valósul meg a HPGe típusú félvezető detektorokban.

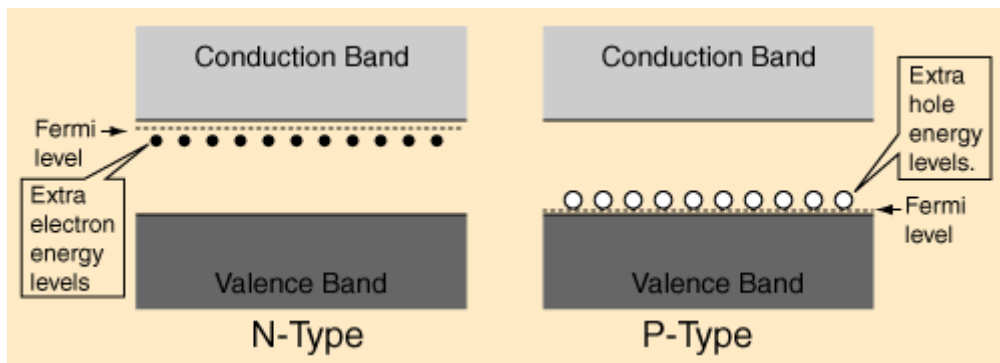
Az extrinszik félvezetők

A szennyezett félvezetők úgy készülnek, hogy a kristályrács egyes atomjait kicserélik valamilyen más atomra. Ezeket nevezzük extrinszik félvezetőknek. Két típust különböztetünk meg attól függően, hogy a behelyezett atom a periódusos rendszer III. vagy az V. főcsoportjából való. Ha a III. főcsoportból választunk, (például: B, Al, In) akkor akceptor atomról beszélünk, mely egy extra lyukkal járul hozzá a vezetéshez. Az így kapott félvezetőt p-típusú vezetőnek hívjuk. A lyukba más elektron bele tud ugrani, így a lyuk tulajdonképpen mozog. Ha az adalék az V. főcsoportból kerül ki (P, As), akkor donor atomról beszélünk ami egy extra elektront jelent. Ezt n-típusú szennyezésnek hívjuk. Fontos megjegyezni, hogy maga az anyag a dőpolás következtében továbbra is semleges marad, annak ellenére, hogy egy töltést adtunk hozzá, hiszen az elhelyezett szennyező atomnak más a rendszáma (protonszáma), vagyis a p-típusú szennyező esetén eggyel kevesebb protonja van, mint a félvezető anyagának. Tehát a bórnak eggyel kevesebb protonja van, mint a germániumnak, de van helyette egy pozitív lyuk, vagyis a félvezető semleges maradt.



11. ábra. Az extrinszik félvezetők két típusa

Az extrinszik félvezetőkben az extra elektron a donor atomhoz, illetve a lyuk az akceptorhoz úgy van kötve mint egy protonhoz, de a kristályrács hatását is figyelembe kell venni, ezért kb. 10-20 meV energia kell a gerjesztettséghez. Vagyis n-típus esetén az elektronok közel 10-20 meV gerjesztettséggel a vezetési sávra ugranak, míg a p-típusnál ugyanennyi energiától a lyukba kerülnek.



12. ábra. Az n és a p-típusú félvezetők sávszerkezete

A szennyezések és így az energiaszintek is lokalizáltak, ezért a vezetéshez nem járulnak hozzá, ezért az n-típusú félvezetőben negatív töltések elektronok vezetnek, p-típusúban a pozitív töltésű lyukak. Ezekhez hasonló hatás érhető el a gallium-arzenid (GaAs) anyag esetében olyankor, ha a gallium és arzén nem 1:1 arányban van jelen a vegyületben.

A Hall-effektus segítségével könnyedén megállapítható, hogy melyik típusú félvezetővel van dolgunk. A Hall-ellenállást felírhatjuk a q töltés és az n töltéshordozó-koncentráció segítségével:

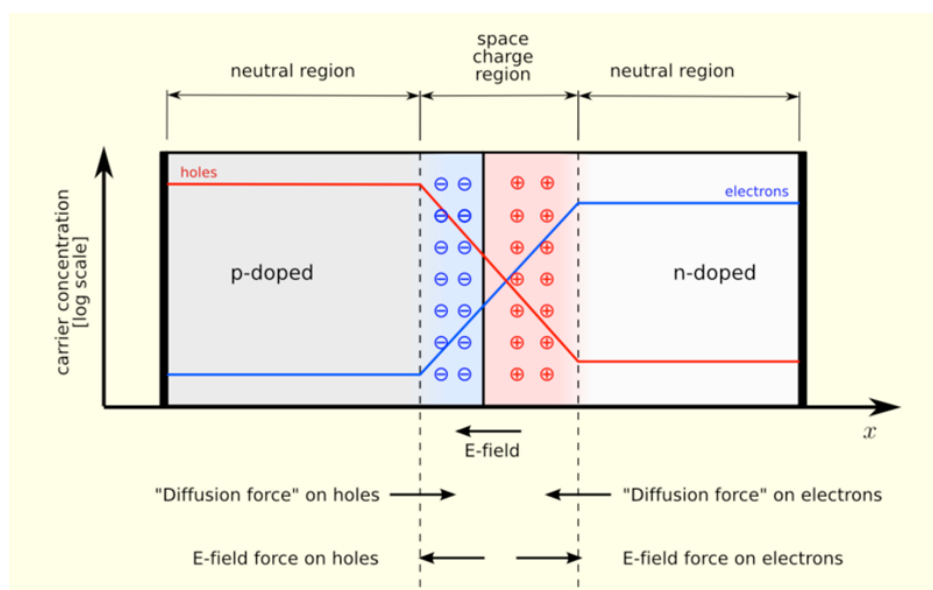
$$R_H = \frac{1}{qn} \quad (9)$$

A Hall-ellenállás értéke az n-típusnál negatívnak, a p-típusnál pozitívnak adódik.[8][9][10][11]

A diódák és alkalmazásaik

Az n-p átmenet

Egy n és egy p-típusú félvezető összeillesztése során az elektronok rekombinálódnak a lyukakkal és az illesztés mentén töltött tartományok jönnek létre, ezt nevezzük kiürített tartománynak. A jelen lévő töltések elektromos teret keltenek, melynek nagysága közelítőleg $U_0 \sim 0.7V$. Ennek a tartománynak a vastagsága $\sim 100nm$.

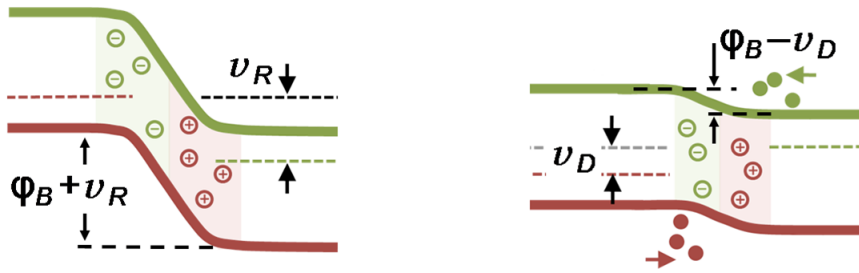


13. ábra. Az n-p átmenet szerkezete. Középen látható a kiürített réteg

A dióda két sarkára U feszültséget kötve két eset lehetséges:

Ha $U < 0$, akkor a kisebbségi töltéshordozók vezetnek, de azok nagyon kevesen vannak: a dióda zárt. A kiürített tartomány mérete egyre inkább megnő. Ez látható a 14. ábrán balra.

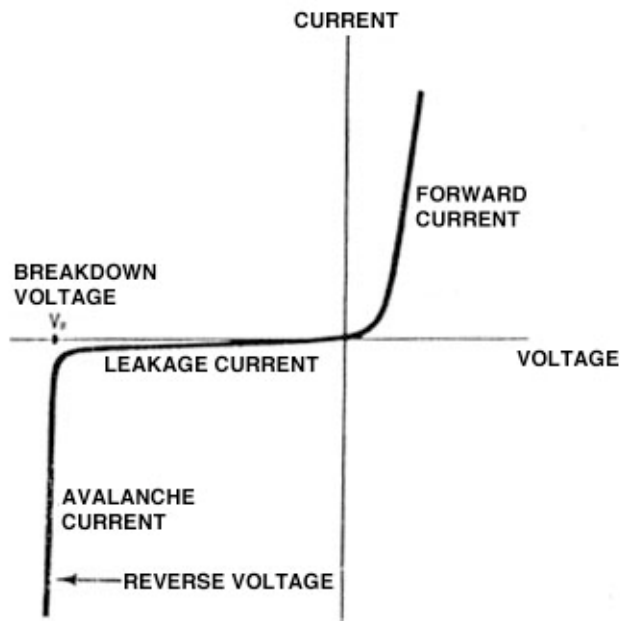
Ha $U > 0$, akkor a kiürített tartomány keskenyebb lesz és a szabadon mozgó elektronok energiája alacsonyabb lesz a p-típusú részen, ezért könnyebben átjutnak a töltéshordozók. Ha az elektronok átjutottak, akkor rekombinálódnak a lyukakkal. A többségi töltéshordozók vezetnek: a dióda nyitott. Ez látható a 14. ábrán jobbra.



14. ábra. Az n-p átmenet sávszerkezete feszültség hatására

A dióda feszültség-áram karakterisztikája a 15. ábrán látható, és a letörési tartományt leszámítva az áramerősség egy exponenciális függvénnyel írható le:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (10)$$



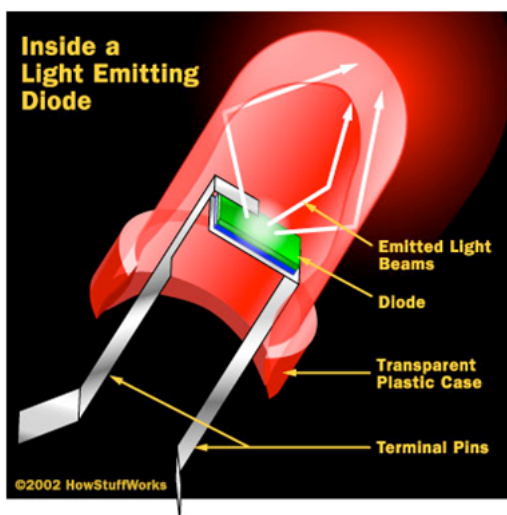
15. ábra. Az n-p átmenet feszültség- áramerősség karakterisztikája

A LED működése

Egy elektron és egy lyuk találkozásakor energia szabadul fel melynek értéke éppen a gap energiájával azonos. A rekombináció során fotonok formájában távozik az energia egy része, a többi melegedésre fordítódik. A nyitott diódánál az elektronok átjutnak a p részbe, és ott egy lyukba „beleesnek”. A látható fény fotonjainak energiája 1.7-3.4 eV között van, és az egyes félvezetők gap energiája a következő módon alakul:

Félvezető típusa	E_G	Ennek megfelelő szín
Si	1.1eV	-
GaAs	1.4 eV	infravörös
GaP	2.26 eV	zöld
GaN	3.4 eV	kék

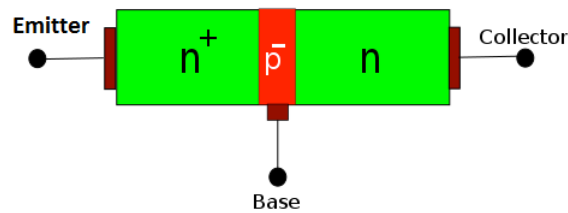
A fehér fény előállításához foszforeszkáló réteget használnak. Így a kéken világító LED és sárga színű foszforeszkáló réteg együttesen fehérnek tűnő fényt bocsájt ki.



16. ábra. Az LED belső felépítése

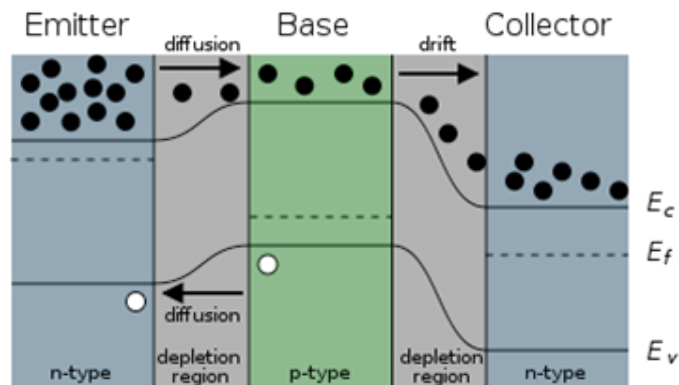
A tranzisztorok

A tranzisztor olyan, mint két egymással szembekapcsolt dióda, de a p réteg nagyon vékony: $l \ll d$, ahol l a vastagság és d a diffúziós hossz. A tranzisztor lábainak elnevezése a következő: a középső p-réteg: bázis (B), az egyik n-réteg: emitter (E), a másik n-réteg: kollektor (C).



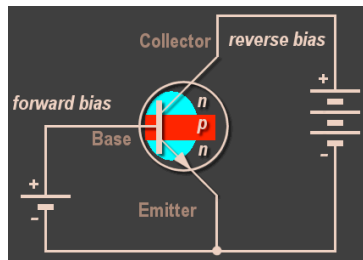
17. ábra. A tranzisztor lábainak elnevezése

A tranzisztor a következő módon működik: Az emitter földelt. Ha a bázis is földelt, akkor bármilyen nagy is a kollektor feszültsége, nem folyik áram. Amennyiben a bázison feszültség van, akkor az elektronok bejutnak a p-rétegbe, de mivel a p-rétegben kevés a lyuk, ezért nem tud mind rekombinálódni, így a feszültség hatására továbbmennek a kollektorba.



18. ábra. A tranzisztor működése

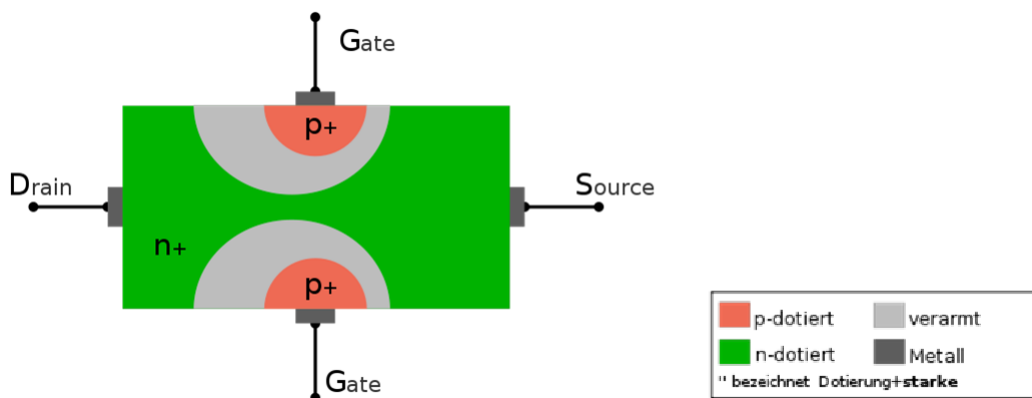
A tranzisztor olyan, mint egy kis kapcsoló. Jelek erősítésére lehet használni. A bázisfeszültség kisebb, mint a kollektorfeszültség és a bázisáram sokkal (10-100x) kisebb, mint a kollektoráram. Így a bázisfeszültséggel kapcsolgatjuk a kollektoráramot. Előnyei, hogy kicsi, nincs benne mozgó alkatrész és megbízható, olcsó.



19. ábra. A bázisra kapcsolt feszültség változtatásával a kollektoráram vezérelhető

A FET működése

Egy speciális félvezető elem a Field Electric Transistor, röviden FET, amelynek működése hasonló, mint a mint az npn tranzisztoré, de az elv picit különböző. A kapufeszültség (mint a bázis) a kiürített tartomány méretét (20. ábrán szürke színnel) szabályozza. Megfelelő értéknél a tranzisztor vezetni kezd forrás és a nyelő között.



20. ábra. A FET működése

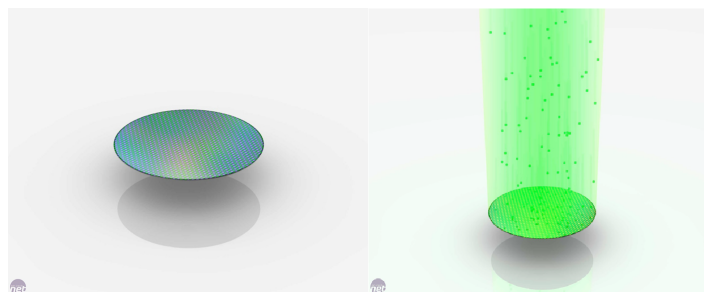
A CPU gyártása

A CPU elkészítéséhez szükség van szilíciumra, mely anyag a kavics, a homok, az agyag, a kova, és a kvarc egyik alkotóeleme, és olyan gyakori, hogy földkéreg tömegének egynegyedét adja. Első lépésként a homokból SiO_2 tiszta szilícium olvadékat készítenek egy kemencében. A kör alakú tárolóban lévő olvadék közepébe egy kis méretű kezdeti kristályt (seed crystal) merítenek, és azt felfelé húzni kezdik, így egy nagy, 99.999999 %-os tisztaságú szilícium egykristályt hoznak létre. A kihúzás sebességével állítható be az átmérő. A következő lépésben a hengeres alakú



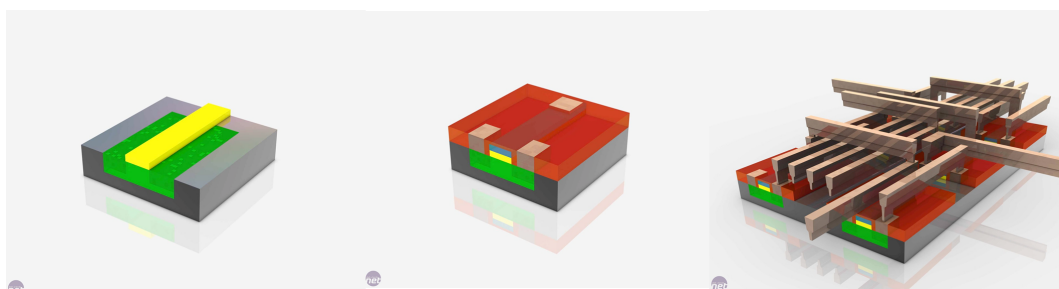
21. ábra. A homokból készült egykristályt feldarabolják

egykristályt pont 30 cm átmérőjűre vágják, majd ezt 1 mm vastagságú darabokra szeletelik. Ezeket a korongokat kémiai és fizikai úton is polírozzák, hogy teljesen simák legyenek, és az így elkészült terméket Si wafer-nek nevezik, ez az integrált áramkörök alapanyaga.



22. ábra. A wafert polírozzák, ionokat helyeznek rá

A következő lépés az ún. fotolitográfia, mely során a wafer felületére egy reziszt réteget visznek fel, amire egy maszkot helyeznek, mely fény hatására eltávolíthatóvá válik. Az elkészítendő minta sablonján (stencil) át UV-sugárzással (régábban fényvel) világítanak rá a waferre, így a fényérzékeny maszk eltávolítódik a megfelelő helyeken és kialakítják szükséges mintázatokat a lap felületén. Ez után ionokat implantálnak a rétegre, ez lehet n és p-típusú réteg is. A következő lépések a levá-



23. ábra. Leválasztás, litográfia, marás, polírozás, összeköttetések elkészítése

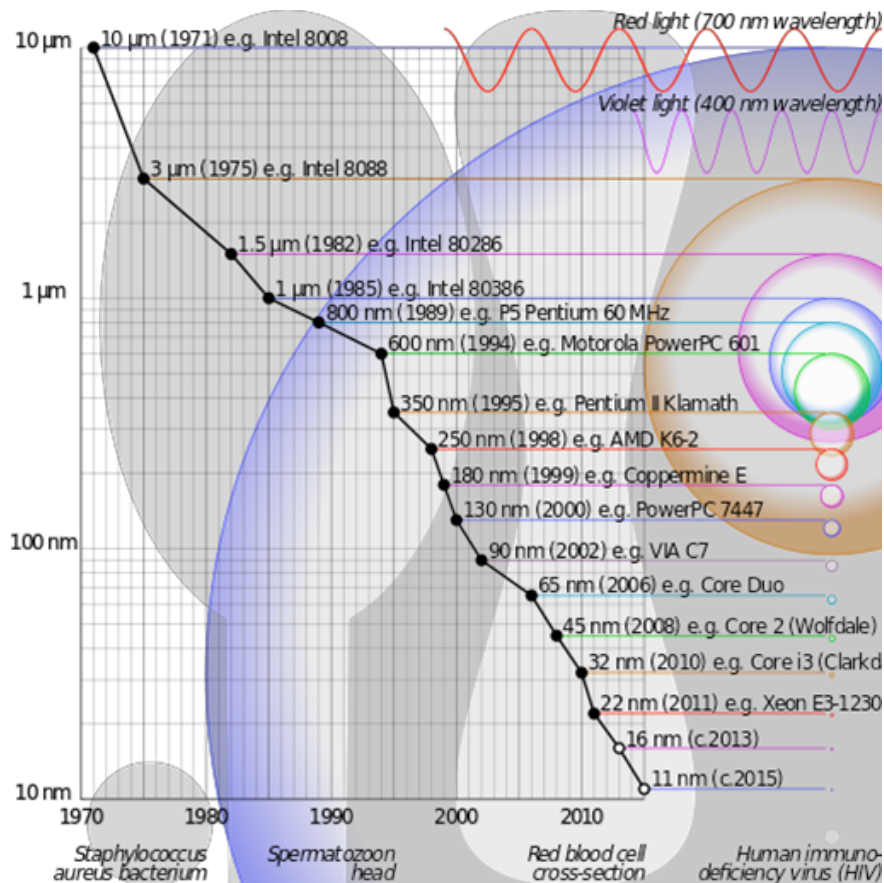
lasztás, litográfia, maratás és polírozás, így elkészülnek a tranzisztorok a lapkán 3 réz kivezetéssel, és szigetelővel bevonva. Ez után kialakítják az egyes elemek között az összeköttetéseket, amik 30 szint magasságú is lehet, majd kivágják a kész IC-eket. Utolsó lépésként elkészítik a tokozást, az elektromos kivezetéseket elhelyezik, a hőelvezetést csatlakoztatják, majd a kész CPU-kat csomagolják. [12]



24. ábra. Kivágják az IC-eket és a tokozás elkészítése után csomagolják

Az IC technológia fejlődése

A Moore-törvénynek nevezett tapasztalati megfigyelés és egyben előrejelzés szerint az integrált áramkörök idővel egyre összetettebbek lesznek, a rajtuk lévő tranzisztorok száma kb. 18 hónaponként kétszeresére növekedik. 1965-ben Gordon Moore az Intel egyik alapítója először évenkénti, 1975-ben pedig kétévenkénti duplázódásról beszélt a tranzisztorok számát illetően. 2015-ben pedig Moore szerint a törvény a következő évtizedben már nem lesz érvényes. Hasonló megfigyelés igaz az memlemezek egységárra jutó tárolókapacitásának változásában is, illetve a digitális kamerák pixelszáma és azok mérete is követi ezt a tendenciát.



25. ábra. A Moore-törvény

Hivatkozások

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor> (letöltve: 2016. január)
- [2] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szil%C3%ADcium> (letöltve: 2016. január)
- [3] <https://hu.wikipedia.org/wiki/D%C3%B3pol%C3%A1s> (letöltve: 2016. január)
- [4] <https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9lvezet%C5%91>
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Band_gap (letöltve: 2016. január)
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=HBnICnUhTZI> (letöltve: 2016. január)
- [8] http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M05_C02/co/Contenu_03.html
- [9] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Gallium-arzenid> (letöltve: 2016. január)
- [10] <http://fizipedia.bme.hu/index.php/Hall-effektus>
- [11] uni-obuda.hu/users/horvath.mark/kando/elektrotech/Dioda_v21.doc
- [12] http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2014/honlap/Kocsis_Vilmos_hu.htm (letöltve: 2016. január)
- [13] <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/gordon-moore-the-man-whose-name-means-progress> (letöltve: 2016. január)
- [14] <http://www.cnet.com/news/end-of-moores-law-its-not-just-about-physics/> (letöltve: 2016. január)