

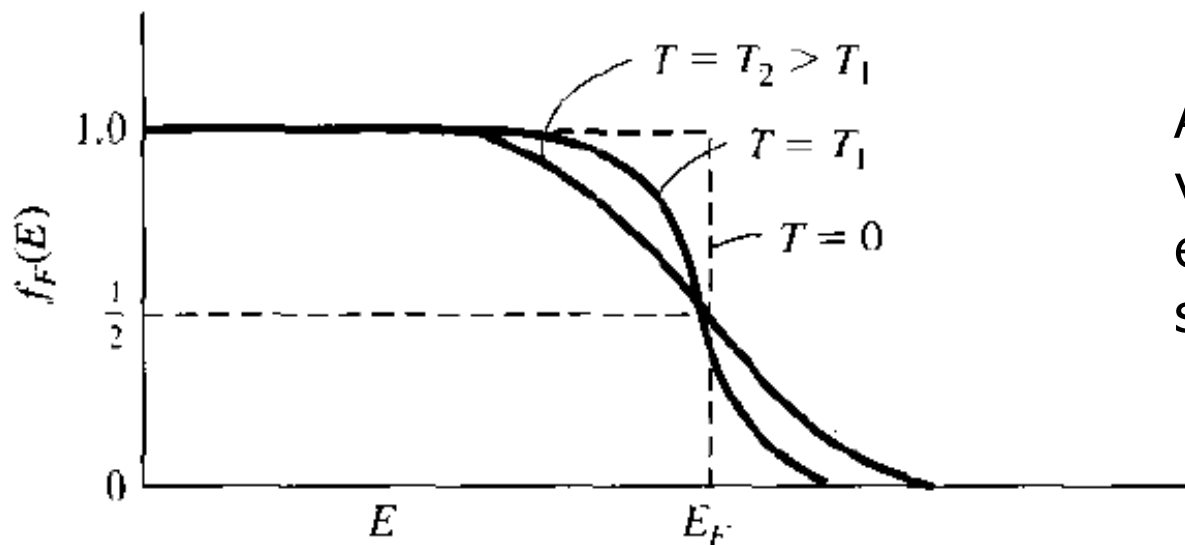
Szilárdtestfizikai összefoglaló II.

Az energiaállapotok betöltöttsége

Abszolút nulla fok esetén a kristály alapállapotban van, az elektronok a legkisebb energiájú állapotokat töltik be. Azt az energiát, amely alatt abszolút nulla fokon az összes energiaállapot betöltött, Fermi-szintnek nevezzük (E_F)*. Magasabb hőmérsékleten az elektronok egy része magasabb energiállapotba kerül. Az energiaállapotok elektronokkal való betöltöttségének valószínűsége a Fermi-Dirac eloszlással írható le:

$$f_{Fe}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$

k - Boltzmann állandó
 $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K

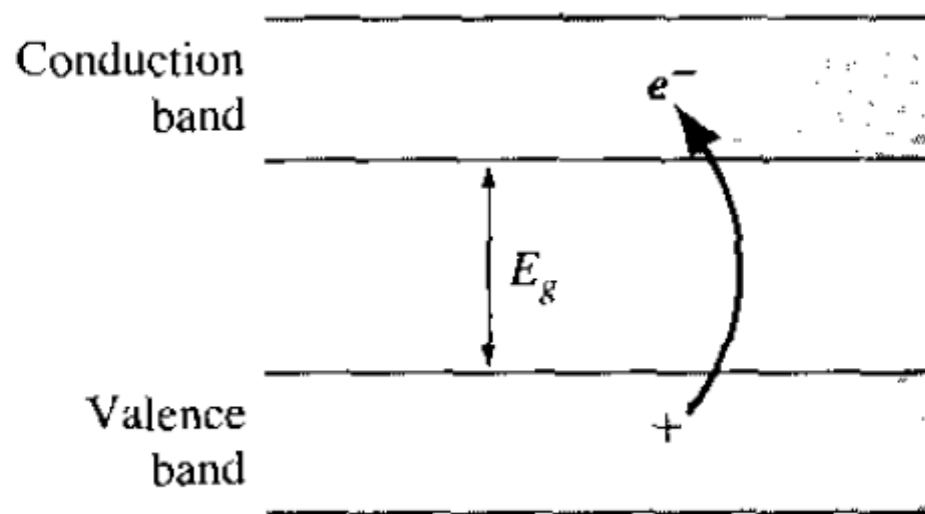
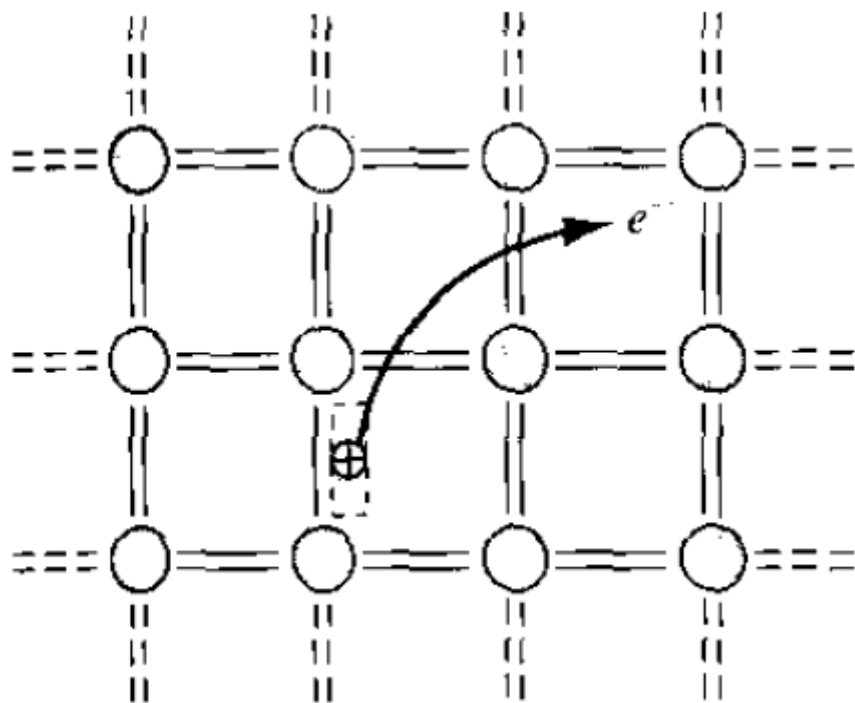


A Fermi-szint fémeknél a vezetési sávban, félvezetőknél és szigetelőknél a tiltott sávban helyezkedik el.

*A Fermi-szintnek a fenti meghatározása csak abszolút nulla fok esetén érvényes.

A pozitív töltéshordozók (lyukak)

Ha az elektronok a félvezetőben a vegyértéksávból a vezetési sávba jutnak, a helyükön pontszerű pozitív töltések maradnak vissza (az ionizált atomtörzsek töltései). A kiszabadult elektronok helyére át tudnak ugrani a szomszéd elektronok, így a pontszerű pozitív töltések mozogni tudnak a kristályon belül, azaz pozitív töltéshordozóként viselkednek. Az így létrejövő pozitív töltéshordozókat lyukaknak nevezzük.



A lyukak keletkezésének szemléltetése a Si kristály sematikus szerkezetében és a sávdigramban.

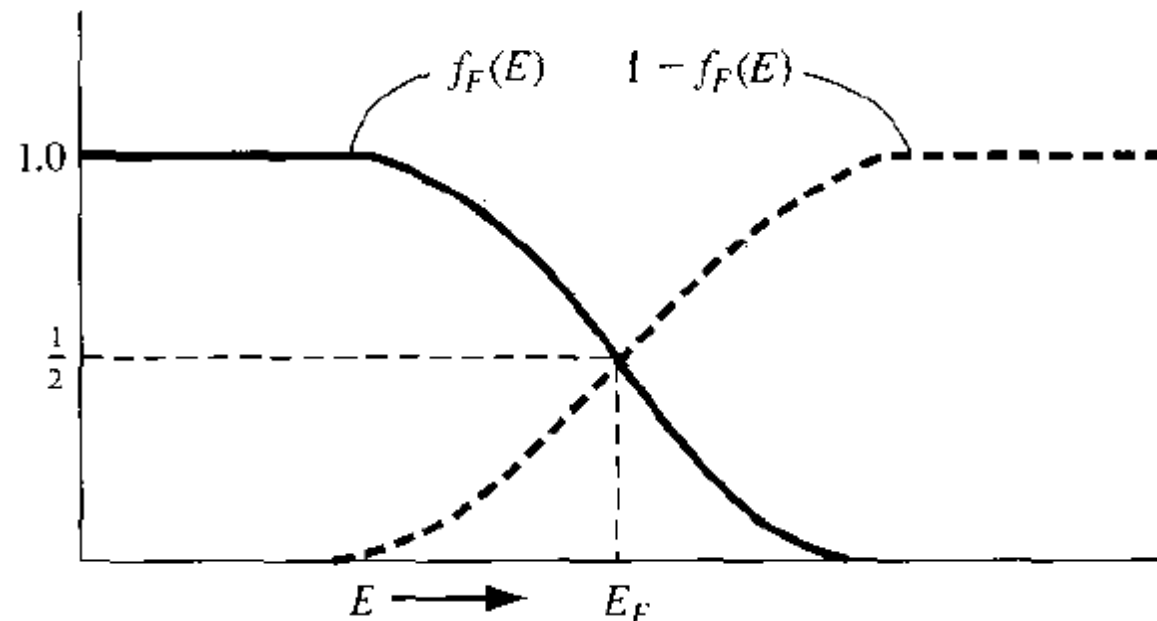
A lyukak Fermi-Dirac eloszlása

Egy adott energiállapot vagy elektronnal vagy lyukkal (elektronhiány) van betöltve. Így az elektronnal vagy lyukkal való betöltöttség valószínűségének összege 1. Ebből a lyukkal való betöltöttség valószínűsége:

$$f_{Fh}(E) = 1 - f_{Fe}(E) = 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$

$$f_{Fh}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) + 1}$$

A Fermi-szint az az energiaérték, ahol az elektronnal és lyukkal való betöltöttség valószínűsége megegyezik (1/2).



A szabad töltéshordozók energia szerinti eloszlása

Az elektronok energia szerinti eloszlása a vezetési sávban:

$$n(E) = g_c(E) f_{Fe}(E)$$

ahol g_c az állapotsűrűség a vezetési sávban:

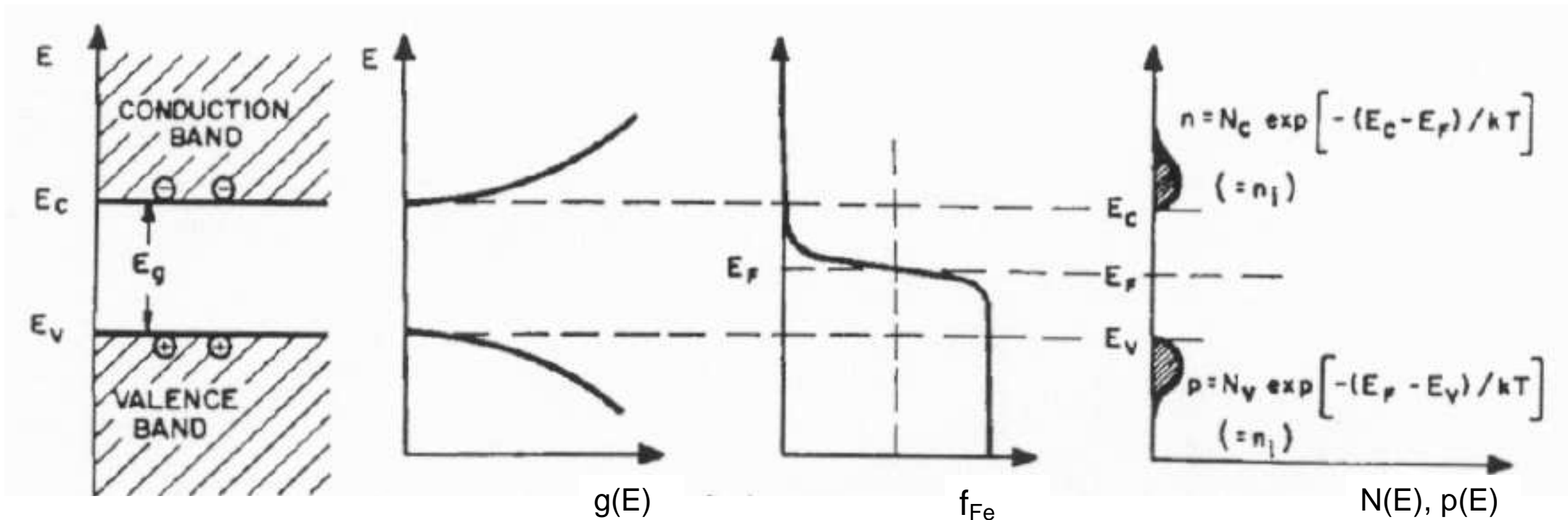
$$g_c(E) \sim (E - E_c)^{1/2}$$

Hasonló módon a lyukak energia szerinti eloszlása a vegyérték sávban:

$$p(E) = g_v(E) f_{Fh}(E)$$

ahol g_v az állapotsűrűség a vegyérték sávban:

$$g_v(E) \sim (E_v - E)^{1/2}$$



A töltéshordozó koncentrációk

Az elektronkoncentrációt (a szabad elektronok számát egységnyi térfogatban) az $n(E)$ függvény energia szerinti integrálásával kapjuk:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} n(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) f_{Fe}(E) dE \cong N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

ha $E_c - E_F > 3kT$; N_c az effektív állapotsűrűség a vezetési sávban.
Analog módon a lyukkonzentráció:

$$p = \int_{E_c}^{\infty} p(E) dE = \int_{-\infty}^{E_v} g_v(E) f_{Fh}(E) dE \cong N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

ha $E_F - E_v > 3kT$; N_v az effektív állapotsűrűség a vegyérték sávban.

A fenti effektív állapotsűrűségek erősen hőmérsékletfüggőek:

$$N_c \sim T^{3/2} \quad N_v \sim T^{3/2}$$

A szabad elektronok és lyukak folyamatosan keletkeznek és megszűnnek, nem ugyanazok az elektronok vannak állandóan a vezetési sávban. Ezért az elektron- és lyukkonzentráció dinamikus egyensúlyi értékek, melyektől a pillanatnyi értékek kis mértékben eltérhetnek.

Adalékolatlan félvezetők

Adalékolatlan (szerkezeti, intrinsic) félvezetők esetében az elektron- és a lyukkonzentráció megegyezik:

$$n_i = p_i$$

Ezen feltétel alapján az előbbi kifejezések felhasználásával meghatározható a Fermi-szint energiahelyzete:

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

Az intrinsic félvezető Fermi-szintje gyakorlatilag a tiltott sáv közepén helyezkedik el.

Az elektron és lyukkonzentráció szorzatából meghatározható az intrinsic koncentráció:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right)$$

ahol $E_c - E_v = E_g$, a tiltott sáv szélessége.

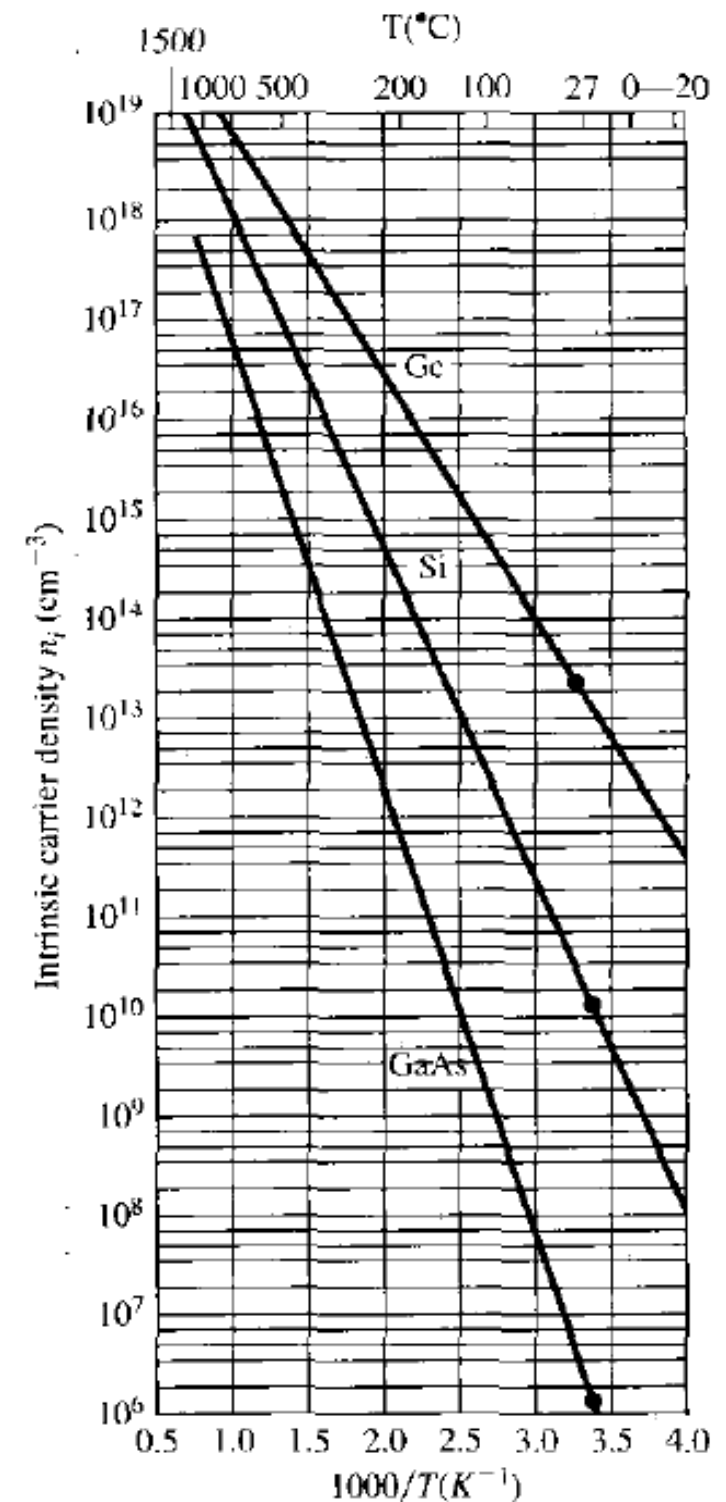
A tiltott sáv és a hőmérséklet hatása

Minél szélesebb a tiltott sáv, annál kisebb az intrinsic koncentráció értéke és annál nagyobb a hőmérsékletfüggése.

Az effektív állapotűrűségek és az intrinsic koncentráció Si-ban és GaAs-ben 300 K-en

	N_c [cm^{-3}]	N_v [cm^{-3}]	n_i [cm^{-3}]
Si	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,0 \cdot 10^{19}$	$1,45 \cdot 10^{10}$
GaAs	$4,7 \cdot 10^{17}$	$7,0 \cdot 10^{17}$	$1,8 \cdot 10^6$

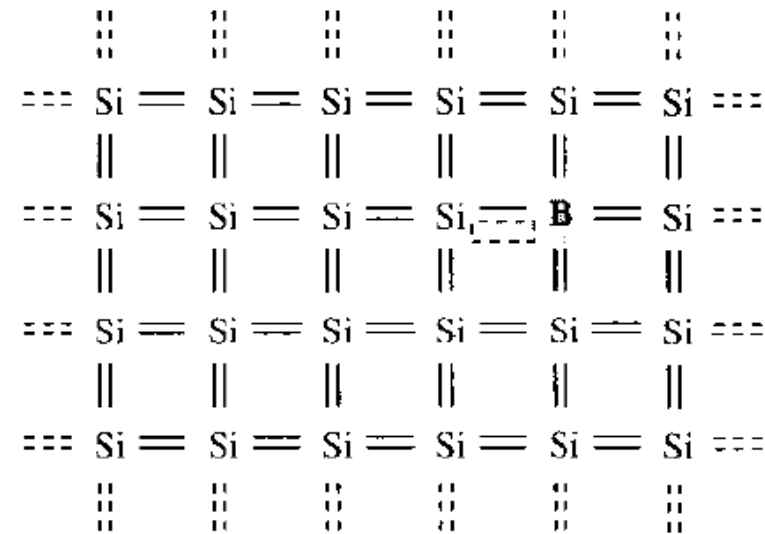
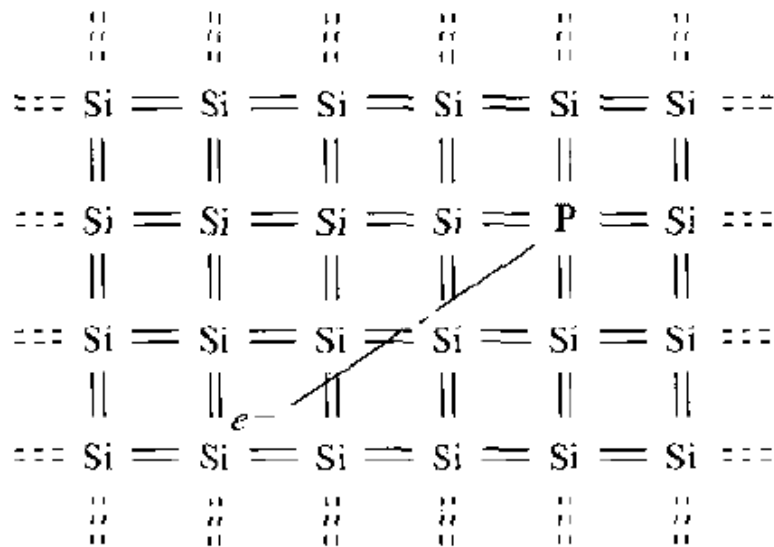
Az intrinsic koncentráció
hőmérsékletfüggése
Ge-ban, Si-ban és GaAs-ben



Adalékolt félvezetők

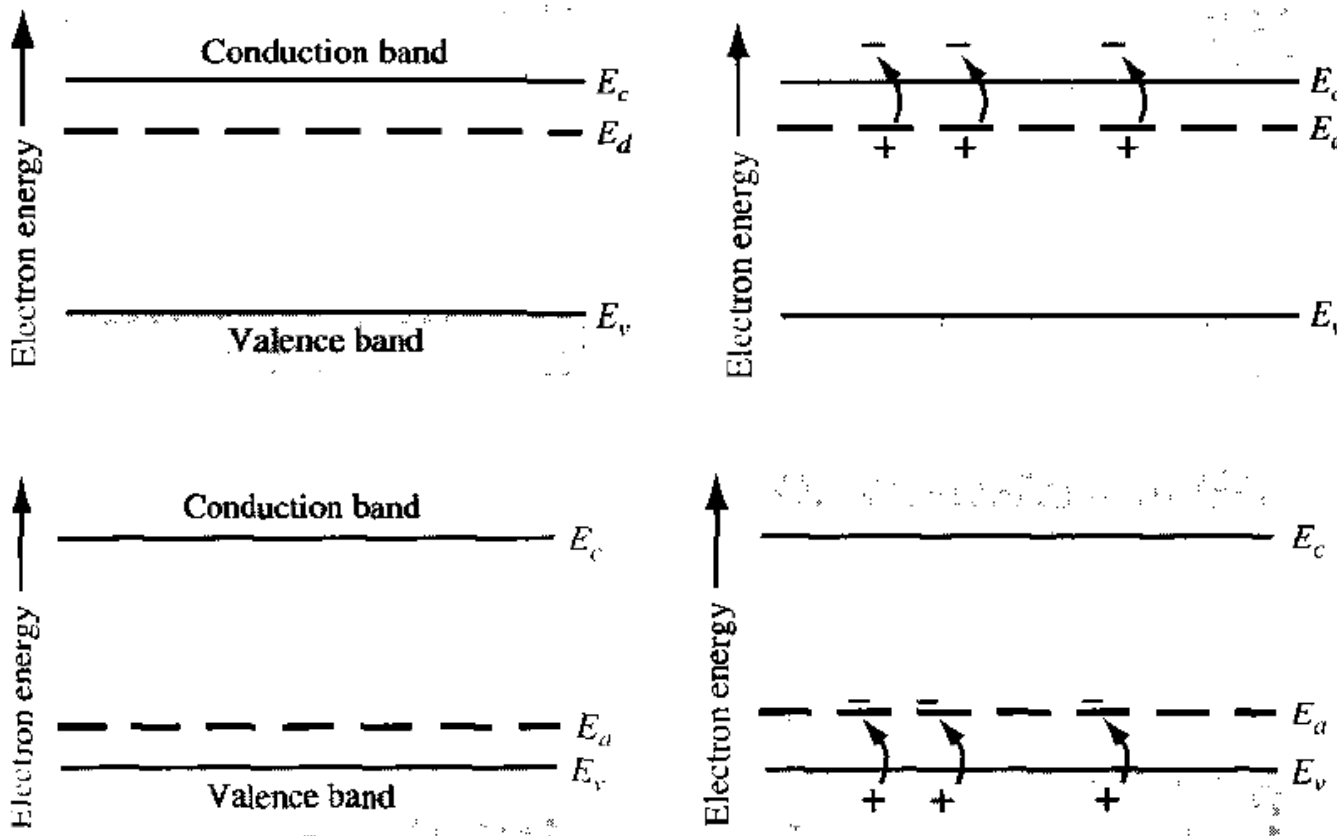
Ha a négyvegyértékű Si rácsába ötvegyértékű atom épül be (pl. P), az ötödik elektron könnyen leszakad és feljut a vezetési sávba: donor adalék - n-típusú félvezető jön létre.

Ha a Si rácsába három vegyértékű atom (pl. B) épül be, az atom környezetében elektronhiány (lyuk) keletkezik, amely könnyen elszakad az atomtól: akceptor adalék - p-típusú félvezető jön létre.



Adalékszintek

Az elektron többlet (donor) ill. elektronhiány (akceptor) miatt a sávszerkezetben lokalizált (az adalékatomokhoz kötött) energiaállapotok jönnek létre a sávélékhez közel, melyek könnyen ionizálódnak. Az ionizációs energiájuk szobahőmérséklet környékén $1-2 kT$ körül van.



Ionizációs energiák Si-ban [eV]	
Impurity	Si
<i>Donors</i>	
Phosphorus	0.045
Arsenic	0.05
<i>Acceptors</i>	
Boron	0.045
Aluminum	0.06

Töltéshordozó koncentrációk adalékolt félvezetőkben szobahőmérséketen

Ha csak akceptor adalék van: $p=N_A$, ahol N_A az akceptorkoncentráció

Ha csak donor adalék van: $n=N_D$, ahol N_D a donorkoncentráció

Ha akceptor és donor adalék is van:

$$p=N_A-N_D, \text{ ha } N_A>N_D$$

$$n=N_D-N_A, \text{ ha } N_D>N_A$$

$$n=p=n_i, \text{ ha } N_A=N_D$$

Ha $N_A=N_D$, kompenzált félvezető, intrinsic-ként viselkedik, de kisebb a töltéshordozók mozgékonyasága.

Adalékok:

Si - akceptor: **B**, Al, Ga, In (III. oszlop)

donor: **P**, As, Sb (V. oszlop)

GaAs - akceptor: Be, Zn (II. oszlop) - Ga helyére épül be

C (IV. oszlop) - As helyére épül be

donor: Si (IV. oszlop) - Ga helyére épül be

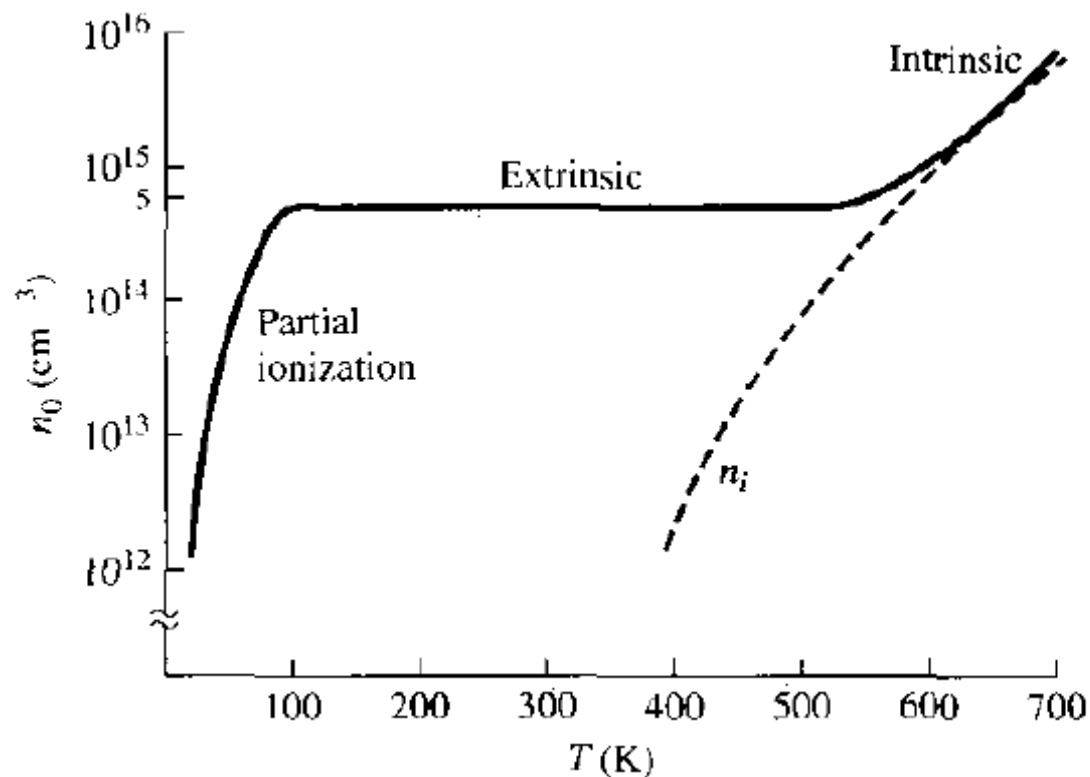
S, Se, Te (VI. oszlop) - As helyére épül be

A töltéshordozó koncentráció hőmérsékletfüggése adalékolt félvezetőben

Szobahőmérséklet környékén az adalékkoncentráció határozza meg, széles hőmérséklettartományban állandó.

Alacsony hőmérsékleten a hőmozgás energiája már nem elegendő az összes adalékatom ionizációjára, a koncentráció csökken - kifagyás.

Magas hőmérsékleten az intrinsic koncentráció eléri, majd meghaladja az adalékkoncentrációt, a koncentráció nő.



A Fermi-szint adalékolt félvezetőkben

Adalékolt félvezetőkben a Fermi-szint nem a tiltott sáv közepén helyezkedik el. Helyzete függ az adalékolás típusától és mértékétől (N_D és N_A) és a hőmérséklettől.

Töltéssemlegesség a félvezetőben:

$$q(n+N_A^-)=q(p+N_D^+)$$

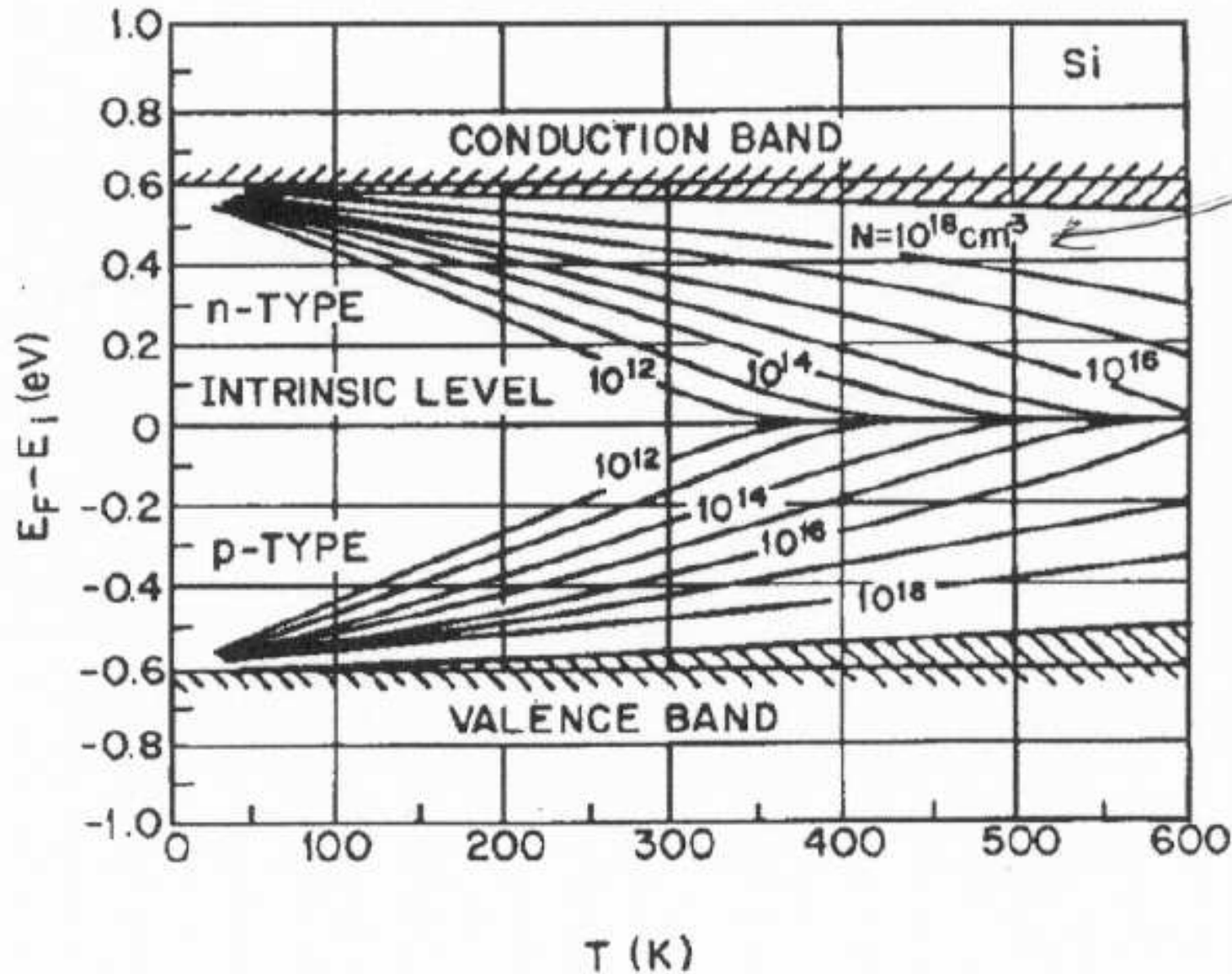
ahol N_A^- és N_D^+ az ionizált adalékatomok koncentrációja.

n és p értékére a korábban kapott kifejezéseket behelyettesítve meghatározható a Fermi szint helyzete az adalékolás és a hőmérséklet függvényében.

n -típusú félvezetőben a Fermi-szint a tiltott sáv felső felében, p -típusú félvezetőben a tiltott sáv alsó felében helyezkedik el. Az adalékolás növelésével a Fermi-szint a sávélék felé mozdul el, a hőmérséklet növekedésével fordítva, a sáv közepe felé mozdul.

A Fermi-szint helyzetét adott adalékszint és adott hőmérséklet esetén az adalékok ionizációjával keletkező töltéshordozók koncentrációja és az intrinsic koncentráció aránya határozza meg. (Az adalékok ionizációjával keletkező töltéshordozók koncentrációja széles hőmérséklet tartományban nem függ a hőmérséklettől, az intrinsic koncentráció erősen függ a hőmérséklettől.)

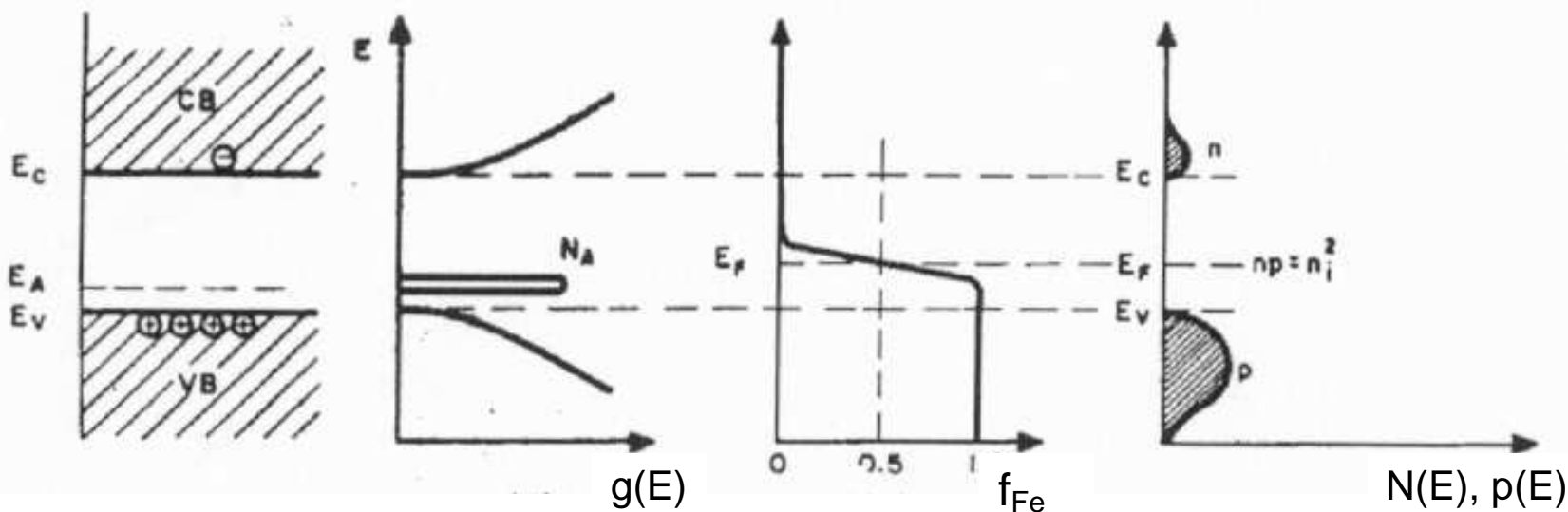
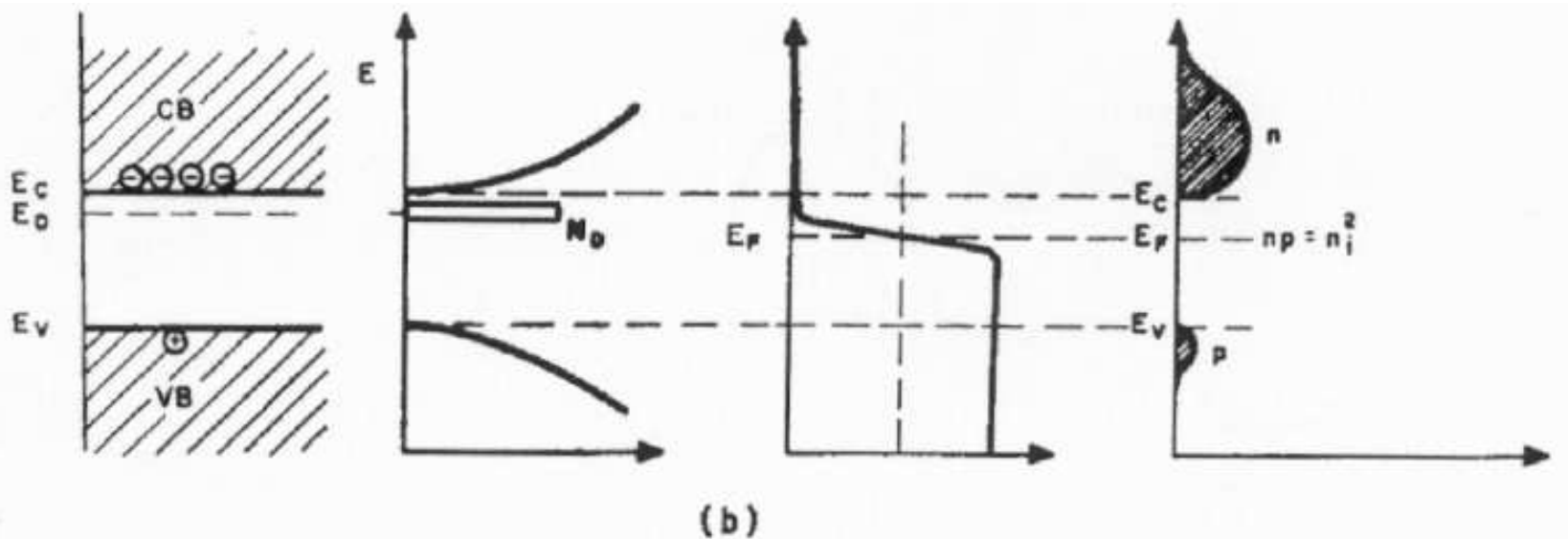
A Si Fermi-szintje



Ha $N_A = 0$,
 $E_F = E_C - kT \ln(N_C / N_D)$
($E_{Fi} < E_F < E_D$ -
néhány kT)

Ha $N_D = 0$,
 $E_F = E_V + kT \ln(N_V / N_A)$
($E_{Fi} > E_F > E_A$ -
néhány kT)

A töltéshordozók energia szerinti eloszlása adalékolt félvezetőkben



A tömeghatás törvénye

Az elektron-koncentrációra és a lyuk-koncentrációra kapott korábbi kifejezések szorzata megegyezik az intrinsic koncentráció négyzetével, vagyis:

$$np = n_i^2$$

Ez az összefüggés széles koncentráció tartományban érvényes ($E_C - E_F > 3kT$ és $E_F - E_V > 3kT$).

Generáció és rekombináció

Stacionárius állapot

A szabad elektronok és lyukak folyamatosan keletkeznek - generálódnak - és megszűnnek - rekombinálódnak.

A töltéshordozók generációjától a rekombinációjukig eltelt átlagos időt élettartamnak nevezzük (elektron és lyuk élettartam).

Egyensúlyi - stacionárius (időben állandó) - állapotban a generációs (g) és rekombinációs (r) sebesség megegyezik egymással:

$$g=r$$

Termikus egyensúlynak azt az állapotot nevezzük, amikor csak a hőmozgás által generált szabad töltéshordozók vannak jelen a félvezetőben. A termikus egyensúly stacionárius állapot.

Stacionárius állapotban a koncentráció egyenlő a generációs (rekombinációs) sebesség és az élettartam (τ) szorzatával:

$$n=g\tau_n, p=g\tau_p, n=r\tau_n, p=r\tau_p$$

Innen:

$$r=g=n/\tau_n, r=g=p/\tau_p$$
$$\tau_n=n/g, \tau_p=p/g, \tau_n=n/r, \tau_p=p/r$$

Nemstacionárius állapot

Ha a félvezetőben a termikus egyensúlyi állapoton felüli szabad töltéshordozókat keltünk (pl. megvilágítással) vagy juttatunk be, akkor a nagyobb koncentráció következtében megnő a rekombinációs sebessége azon típusú töltéshordozóknak, amelyeneket keltettünk vagy bejuttattunk. A rekombinációs és generációs sebesség különbségét nettó rekombinációs rátának nevezzük:

$$U_n = r_n - g, \quad U_p = r_p - g$$

A nettó rekombinációs ráta a termikus egyensúly feletti töltéshordozó koncentrációval arányos:

$$U_n = (n - n_0) / \tau_n, \quad U_p = (p - p_0) / \tau_p$$

A töltéshordozók élettartama a μs – ms tartományba esik.

Rekombinációs mechanizmusok

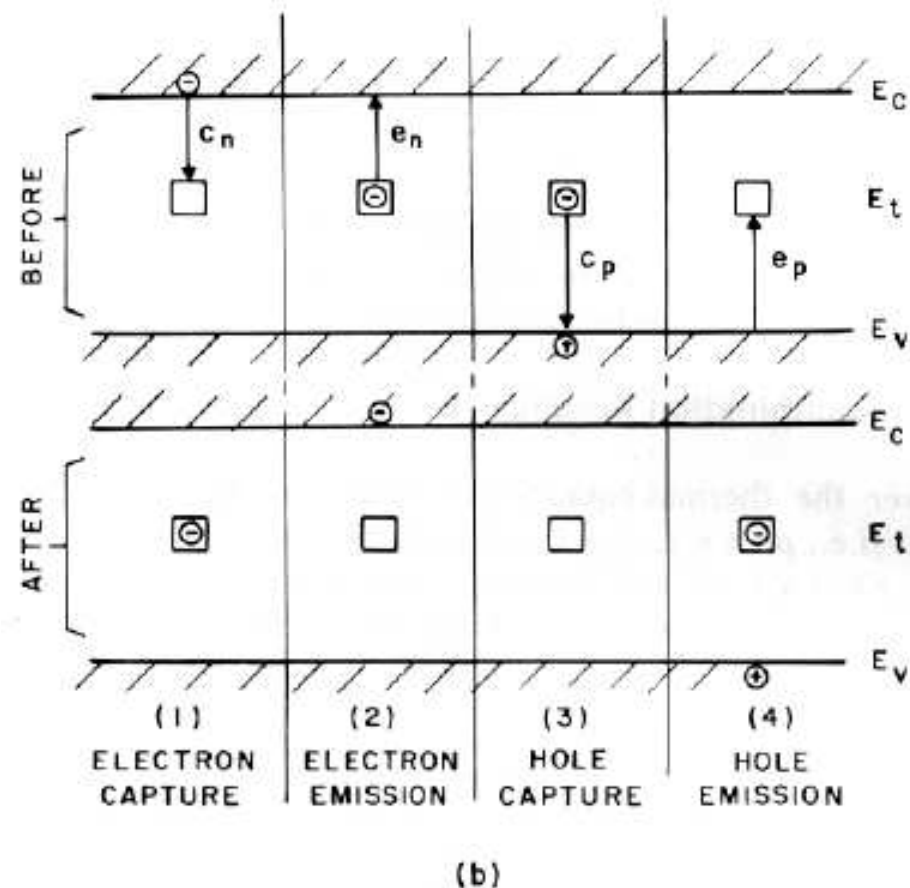
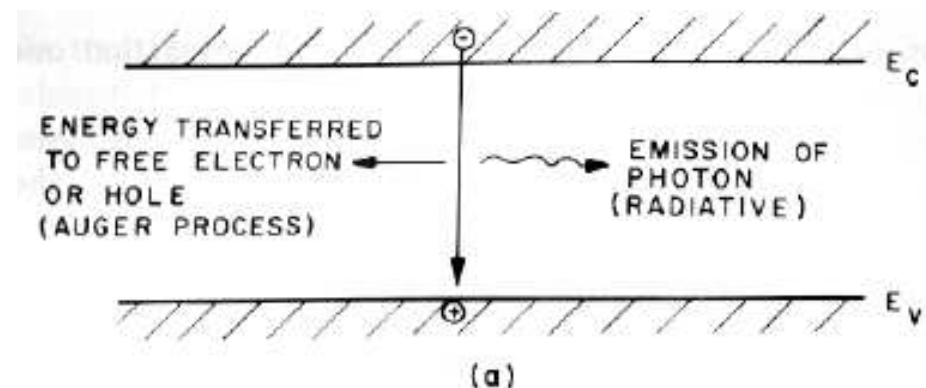
A rekombinációs mechanizmusok két csoportba oszthatók: közvetlen (direkt) és közvetett (indirekt) rekombináció:

Közvetlen rekombináció - sáv-sáv átmenet: az elektron leesik a vezetési sávból a vegyértéksávba

- sugárzásos (foton emisszió) - direkt sávú félvezetők, az elektron impulzusa nem változik, az energiáját a foton viszi el

- Auger rekombináció - mind az energiát, mind az impulzust másik elektron vagy lyuk veszi át

Közvetett rekombináció - a tiltott sáv közepe környékén elhelyezkedő energiaállapotokon (csapdákon) keresztül történik a rekombináció.



Rekombinációs mechanizmusok:
közvetlen(a) és közvetett (b)

Élettartam

Az élettartam függ

- a rekombináció mechanizmusától,
- a töltéshordozók koncentrációjától,
- a csapdák számától,
- a csapdák energiahelyzetétől

A félvezetők felülete sok csapdát tartalmaz, nagy a rekombinációs sebesség a felületen, ami csökkenti az élettartamot. A felületet passziválni kell, le kell csökkenteni a csapdák számát.

Sodródás

Az elektronok és lyukak a kristályban a hőmozgás következtében kaotikus mozgást végeznek. Ha a kristályra külső elektromos teret kapcsolunk, a kaotikus hőmozgásra ráül egy, az elektromos térrel azonos (lyukak) vagy ellentétes (elektronok) irányú kollektív mozgás, amit sodródásnak vagy driftnek nevezünk. A driftsebesség jóval kisebb a hőmozgás sebességénél.

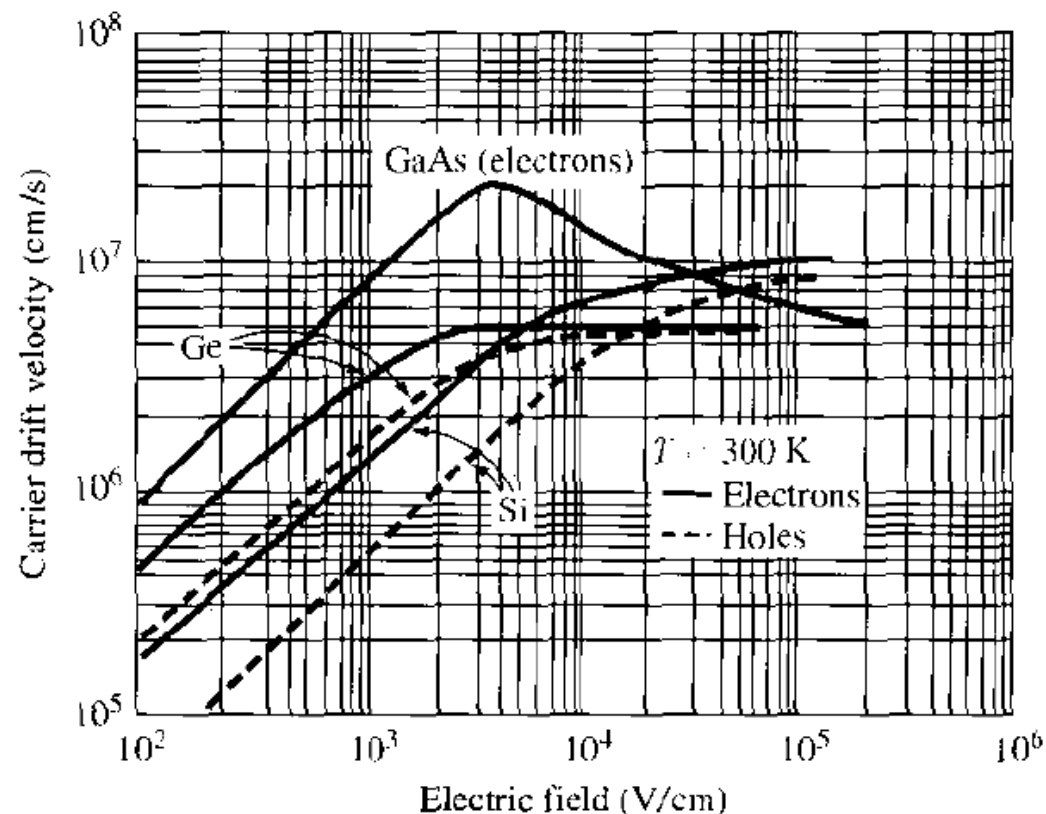
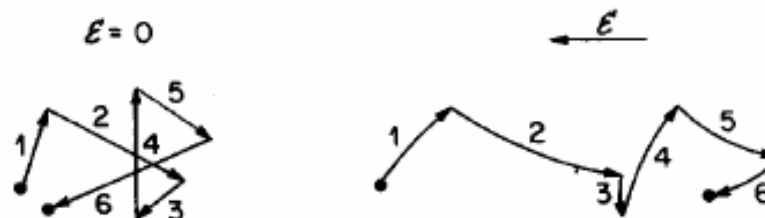
A driftsebesség:

$$v_d = \mu E$$

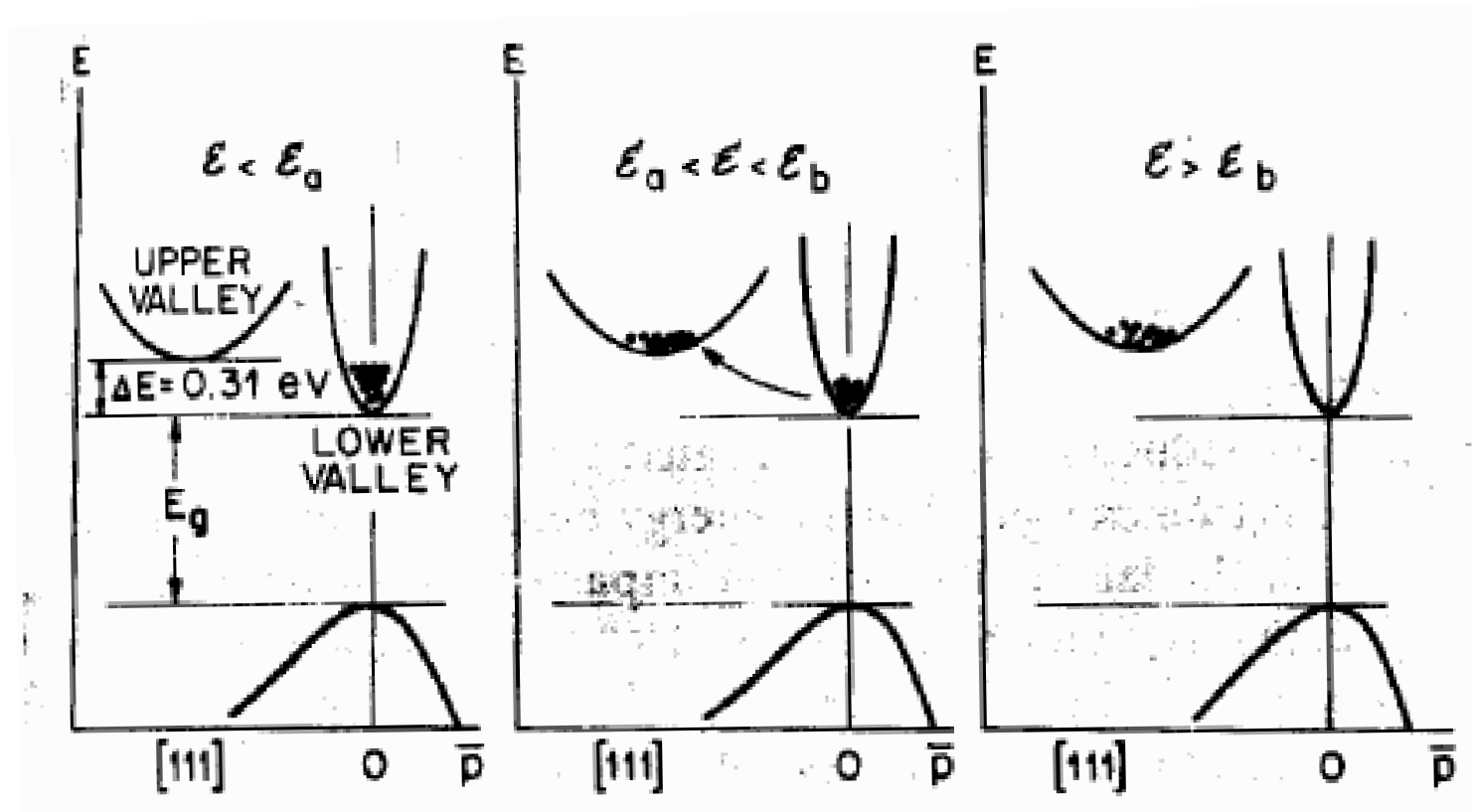
ahol μ a mozgékonyosság, E az elektromos térerősség.

Az elektron hőmozgása elektromos tér nélkül és elektromos térben (fent).

Az elektronok és lyukak driftsebessége az elektromos térerősség függvényében Ge-ban, Si-ban és GaAs-ben (lent).



Driftsebesség és mozgékonyság



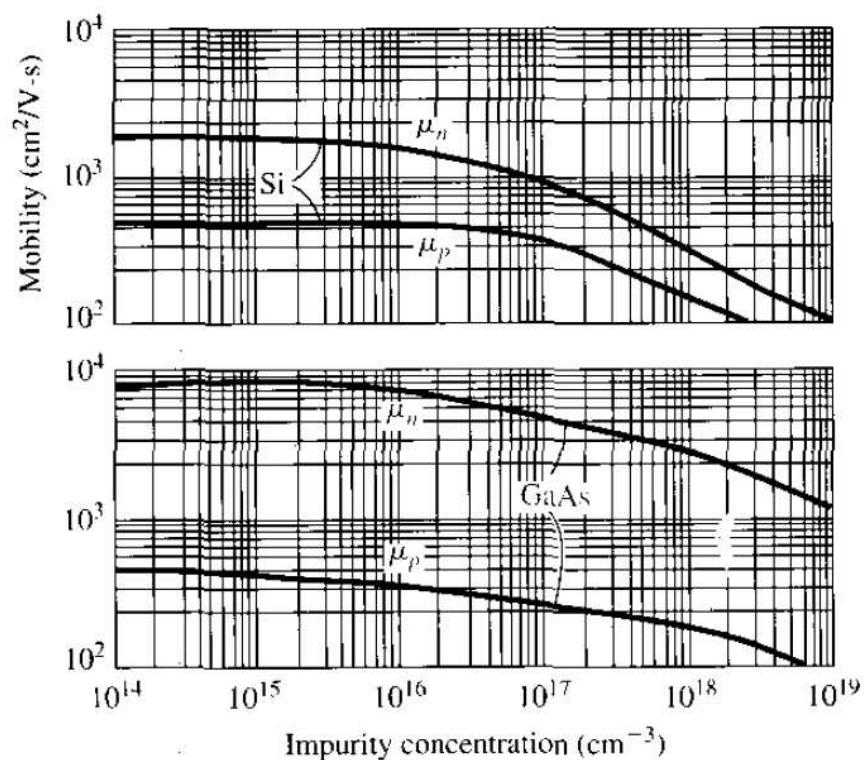
A vezetési sáv
betöltöttsége
GaAs-ben

A driftsebesség nem lineárisan függ a térerősségtől, így a mozgékonyság is függ a térerősségtől. A driftsebesség nagy elektromos tereknél telítésbe megy, mert az elektronok a szóródás során nagy energiájú optikai fononokat keltenek. GaAs-ban (és pl. InP-ban) a driftsebesség azért csökken nagy elektromos tér esetén, mert az elektronok átszóródnak a Γ völgyből az L völgybe, ahol nagyobb az effektív tömeg, ezért lelassulnak.

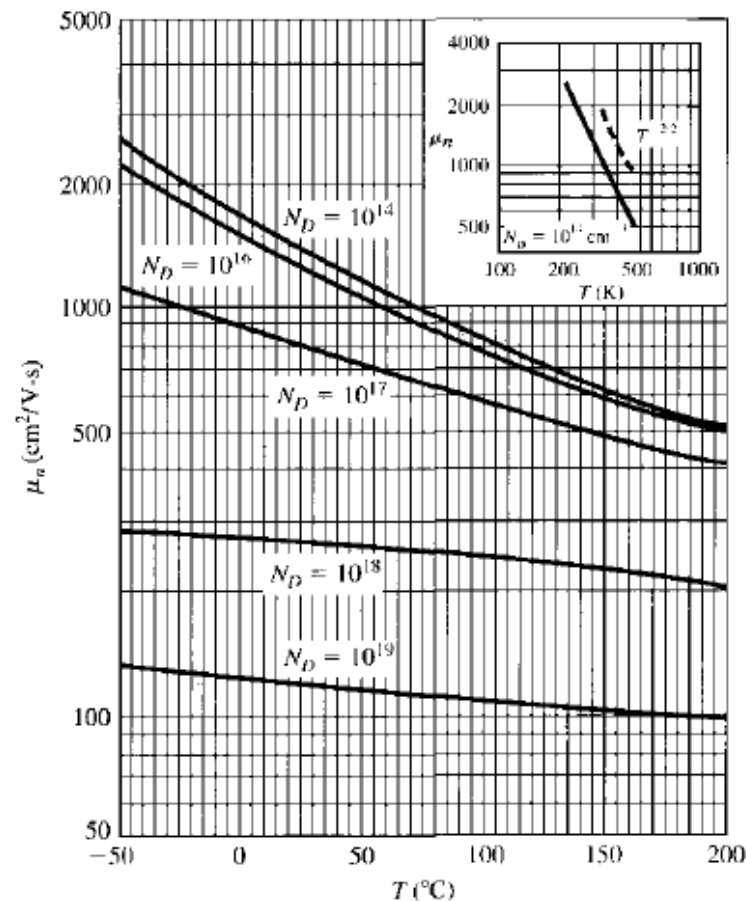
Szóródás

Két szóródás között megtett átlagos távolságot szabad úthossznak nevezik.

A töltéshordozók sebességét a szóródás (ütközés) korlátozza. Szóródás során a mozgási energiájuk egy részét átadják a kristályrácsonak. A szóródás leggyakrabban a rácsrezgéseken (fononokon) és rácshibákon megy végbe. Ezért a mozgékonyosság csökken az adalékkoncentrációval és a hőmérséklettel.



A mozgékonyosság az adalékkoncentráció függvényében Si-ban és GaAs-ben



A mozgékonyosság n-Si-ban a hőmérséklet és az adalékkoncentráció függvényében

Drift áram a félvezetőkben

Az Ohm törvény differenciális alakja:

$$J = \sigma E$$

ahol J az áramsűrűség, σ a fajlagos vezetőképesség és E az elektromos térerősség.

Drift áram esetén az áramsűrűség arányos a drift sebességgel. Elektronáram esetében a drift áramsűrűség:

$$J_{ndrift} = qn v_{dn}$$

ahol q az elemi töltés, n az elektronkoncentráció és v_{dn} az elektronok drift sebessége.

A drift sebességet az elektromos térerősségen keresztül kifejezve:

$$J_{ndrift} = qn \mu_n E$$

ahol μ_n az elektron mozgékonyág.

Hasonló módon a lyukakra:

$$J_{pdrift} = qp \mu_p E$$

A teljes drift áram:

$$J_{drift} = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

A fajlagos vezetőképesség:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

Adalékolt esetben a kisebbségi töltéshordozók drift árama elhanyagolható, intrinsic esetben mindkét töltéshordozó áramával számolni kell.

Diffúziós áram a félvezetőkben

Ha valamelyik töltéshordozó koncentráció helyileg nagyobb, mint a félvezető többi részén, diffúziós áram indul meg. A diffúzió hajtóereje a hőmozgás.

A diffúziós áramok:

$$J_{ndiff} = qD_n dn/dx$$

$$J_{pdiff} = -qD_p dp/dx$$

Einstein összefüggés:

$$D_n = (kT/q)\mu_n$$

$$D_p = (kT/q)\mu_p$$

ahol D_n és D_p az elektronok és lyukak diffúziós állandója, dn/dx és dp/dx a koncentrációk koordináta szerinti deriváltja. Az elektronáram a koncentráció gradiens irányába folyik, a lyukáram ellentétes irányban. (A töltéshordozók áramlása ellentétes a gradienssel.)

A teljes áram a félvezetőkben:

$$J = J_{drift} + J_{diff} = q[(n\mu_n + p\mu_p)E + D_n dn/dx - D_p dp/dx]$$

Mozgékonyosság [cm^2/Vs] és diffúziós állandó [cm^2/s] adatok 300 K-en

	μ_m	D_n	μ_p	D_p
Silicon	1350	35	480	12.4
Gallium arsenide	8500	220	400	10.4
Germanium	3900	101	1900	49.2

Folytonossági egyenlet

Egy adott részecskefajta adott elemi térfogathoz rendelt koncentrációjának időbeli változását (sebességét) írja le.

Elektronok esetében:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - r + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx}$$

Lyukak esetében:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g - r + \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx}$$

Az első két tag a generációs és rekombinációs sebesség különbségét, a harmadik tag a befolyó és kifolyó áram különbségét veszi figyelembe.

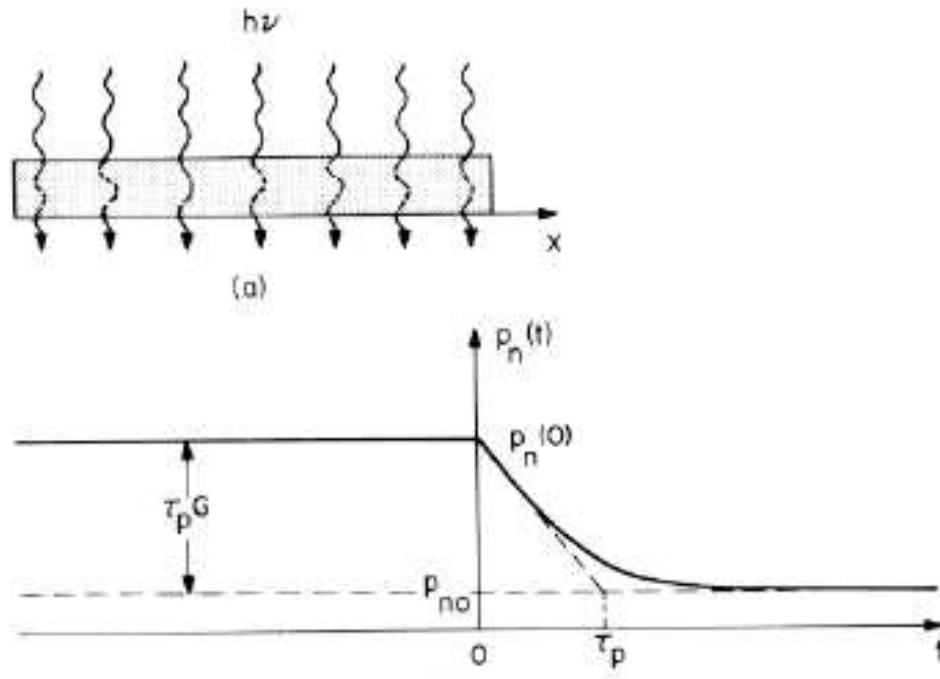
Az elektron- ill. lyukáramot megderiválva és behelyettesítve:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - r + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g - r - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_{np} E \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Itt a harmadik és negyedik tag a drift árammal, az ötödik tag a diffúziós árammal kapcsolatos.

Töltéshordozó koncentráció relaxáció megvilágítás kikapcsolása után



Megvilágítás hatására termikus egyensúly feletti töltéshordozó koncentráció alakul ki. Kikapcsolás utáni esetre a folytonossági egyenlet:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = g - r = -U_p = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

Határfeltételek:

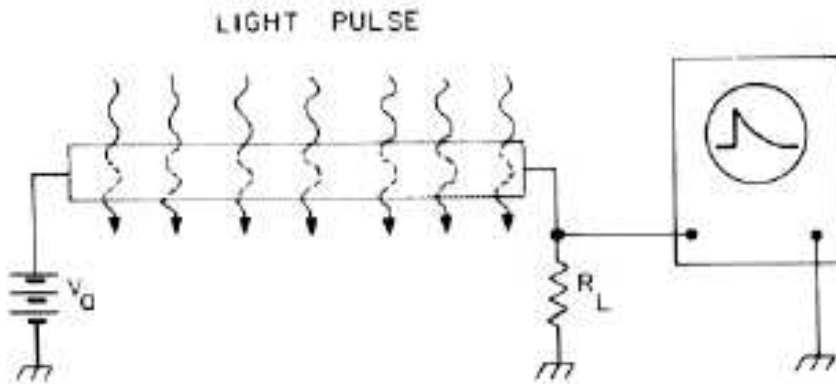
$$p_n(t=0) = p_n(0) \text{ és } p(t=\infty) = p_{n0}$$

Megoldás:

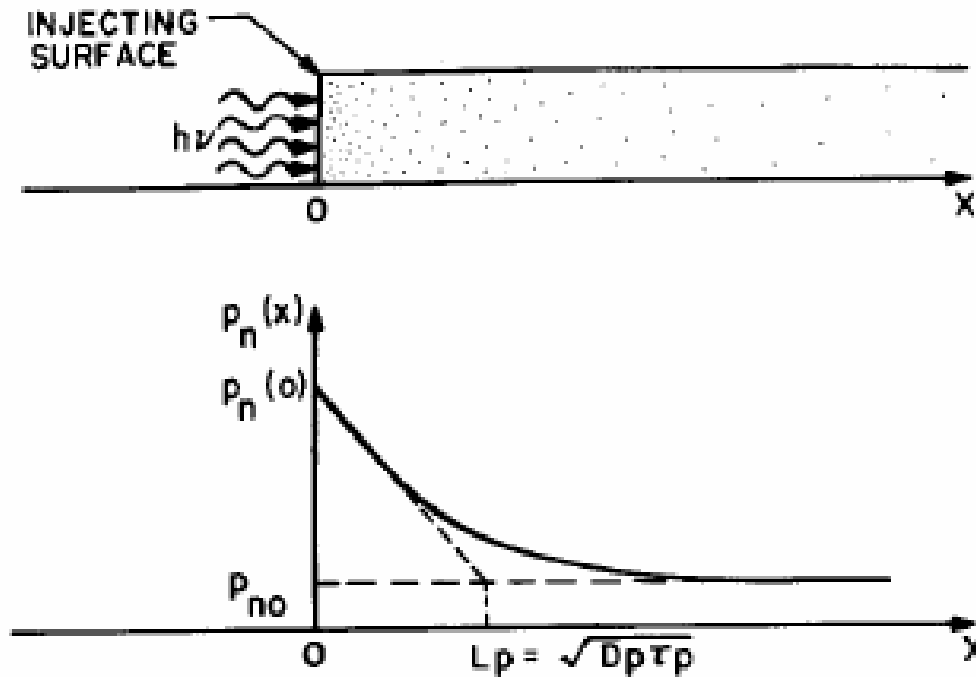
$$p_n = p_{n0} + [p_n(0) - p_{n0}] \exp(-t/\tau_p)$$

A $p_n(0) - p_{n0}$ különbség exponenciálisan csökken (τ_p idő alatt e-ad részére).

A jelenséget a kisebbségi töltéshordozók élettartam mérésére használják.



Töltéshordozó koncentráció mélységbeli eloszlása injekció esetén



Határfeltételek:

$$p_n(x=0) = p_n(0) \text{ és } p(x=\infty) = p_{n0}$$

A $p_n(0) - p_{n0}$ különbség a diffúziós hossz alatt e-ad részére csökken.

A félvezető egyik oldalán egyenletes sebességgel töltéshordozókat juttatunk be (injektálunk). Az injektált hordozók a félvezető térfogata felé diffundálnak, közben egy részük folyamatosan rekombinálódik. Stacionárius állapot alakul ki. A folytonossági egyenlet:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = g - r + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} = 0$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

Megoldás:

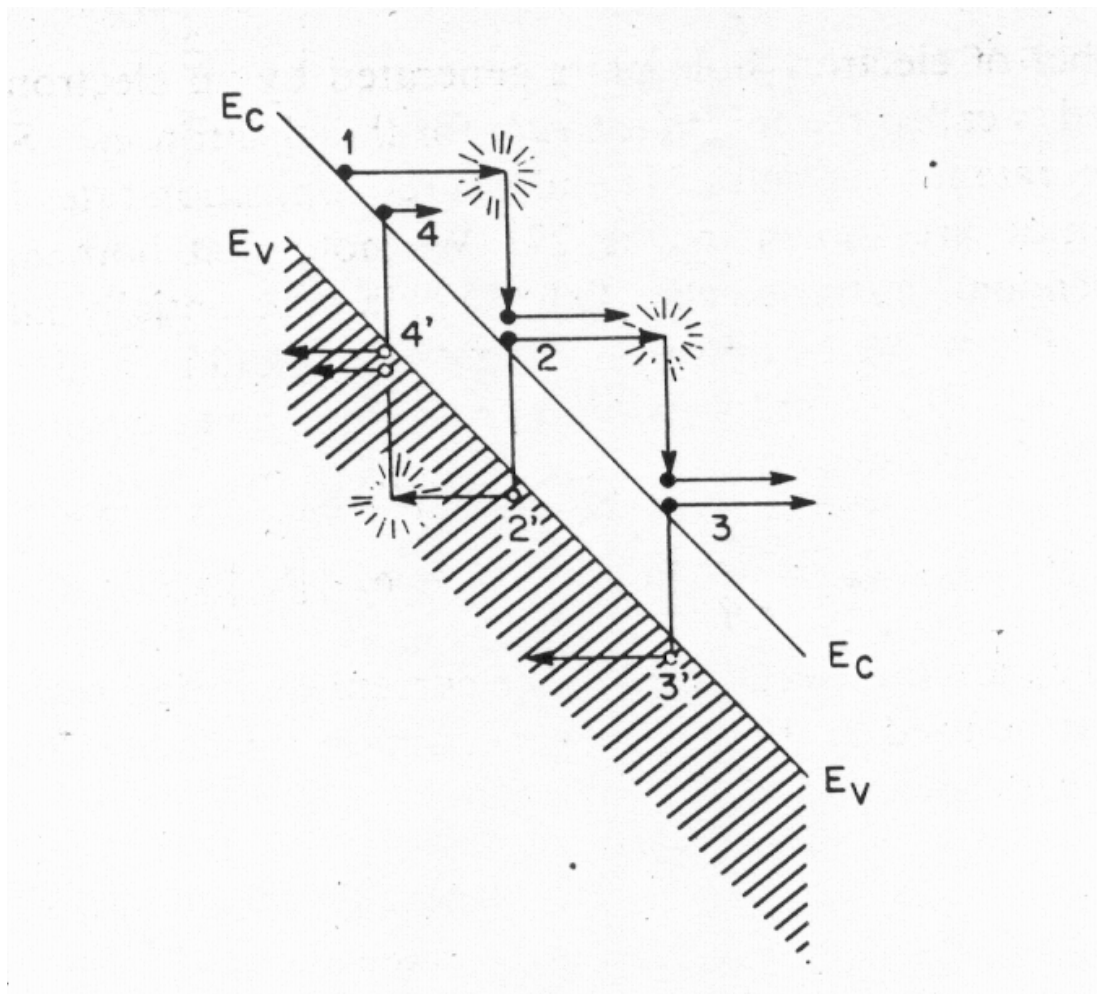
$$p_n = p_{n0} + [p_n(0) - p_{n0}] \exp(-x/L_p)$$

ahol L_p a lyukak diffúziós hossza:

$$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$$

Lavina letörés

Ha a töltéshordozók két szóródás között nagyobb mozgási energiát tudnak felhalmozni, mint a tiltott sáv szélessége, ütközéskor elektron-lyuk párokat keltenek és megindul a töltéshordozók lavinaszerű sokszorozódása, az áram ugrásszerűen megnő, dI/dU a végtelenhez tart.



Hall effektus

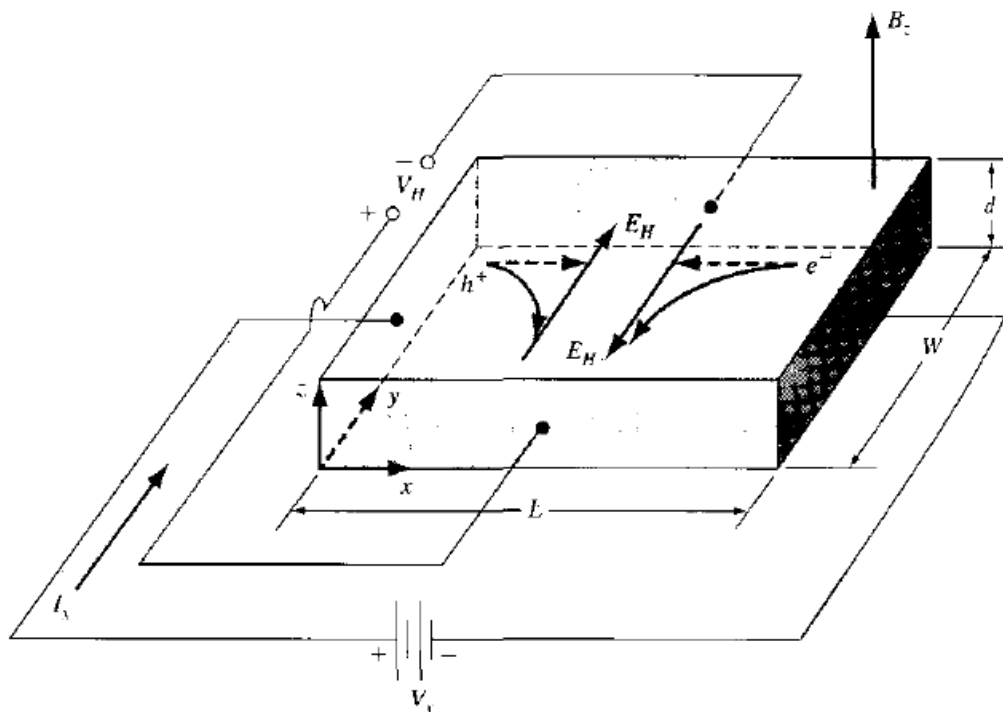
A Lorentz erő:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

A mozgó töltéshordozókra a mozgás irányára merőleges erő hat, ami eltéríti őket. Ha n és p különböző, keresztirányban Hall feszültség lép fel. A keresztirányú elektromos tér:

$$E_y = R_H J_x B_z$$

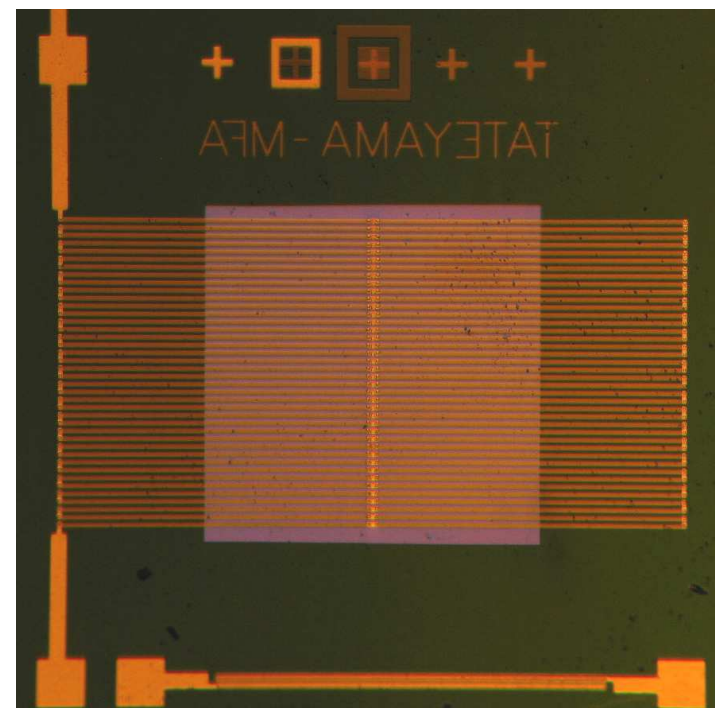
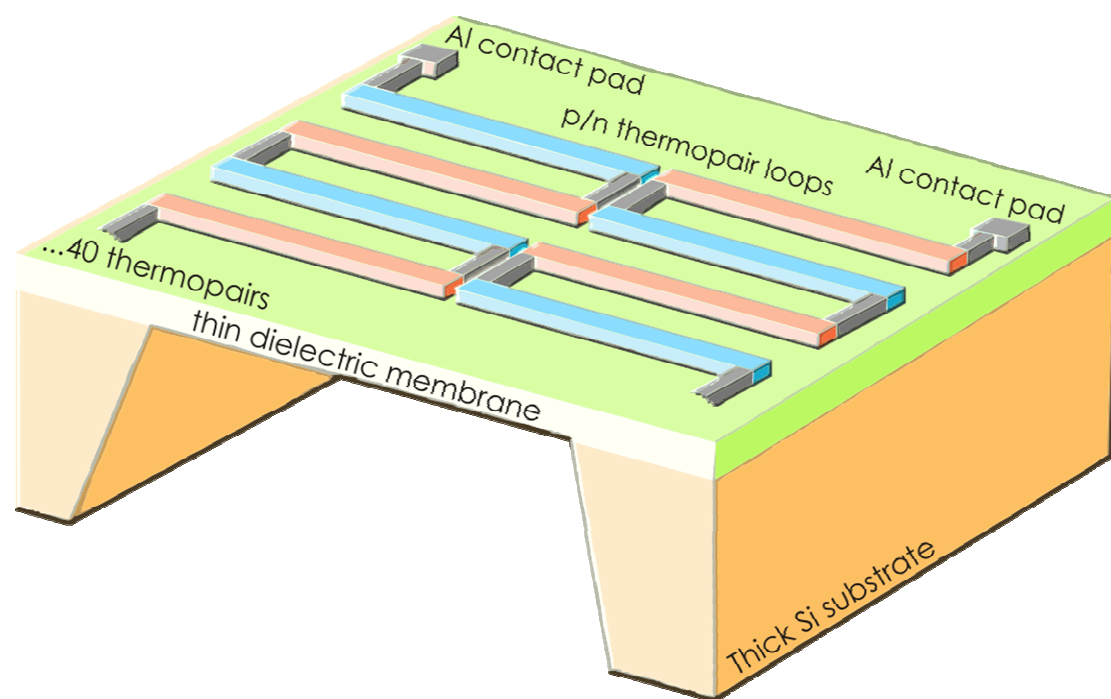
ahol R_H a Hall állandó: $R_H = \frac{1}{qn}$ vagy $R_H = \frac{1}{qp}$ (n- vagy p-típusú félvezető).



Mágneses tér érzékelésére és mérésére használják. A félvezető technikában a koncentrációt és a mozgékonyt határozzák meg vele.

Termoelektromos feszültség

A félvezetőben a különböző hőmérsékletű pontok között elektromos feszültség keletkezik. Oka a töltéshordozók diffúziós tényezőinek és a Fermi-szint hőmérsékletfüggése. n-típusú félvezető esetén a hidegebb rész a pozitív, p-típusú esetben fordítva. Felhasználás termoelemként, hőmérőként.



Az MTA MFA-ban kifejlesztett termoelem sematikus képe és az elkészült csip

Ellenőrző kérdések

Mi jellemzi az intrinsic félvezetőt?

Mi a tömeghatás törvénye?

Mi a Fermi-szint?

Hogy függ a Fermi-szint a hőmérséklettől?

Hol helyezkedik el az intrinsic félvezető Fermi-szintje?

Mi a szabad elektron- és lyukkonzentráció közötti összefüggés?

Mi a kompenzált félvezető?

Mi az összefüggés az állapotsűrűség és a szabad töltéshordozók koncentrációja között?

Mi a neve az n- és a p-típusú adaléknak?

Hogy függ az intrinsic koncentráció a tiltott sáv szélességétől?

Mekkora a szabad elektronok koncentrációja az n-típusú félvezetőben szobahőmérséklet környékén?

Mekkora a lyukkonzentráció n-típusú félvezetőben szobahőmérséklet környékén?

Mekkora az elektronkoncentráció p-típusú félvezetőben szobahőmérséklet környékén?

Miért nem függ a szabad töltéshordozók koncentrációja az adalékkonzentrációtól magas hőmérsékleten?

Mi a különbség az adalékok és a szennyezők között a félvezetők esetében?

Mi az összefüggés az elektronokra és a lyukakra vonatkozó Fermi-Dirac eloszlásfüggvény között?

A szilíciumban használt n-típusú adalékanyagok a periódusos rendszer hányadik oszlopából kerülnek ki?

A szilíciumban használt donor adalékanyagok a periódusos rendszer melyik oszlopában vannak?

A szilíciumban használt p-típusú adalékanyagok a periódusos rendszer melyik oszlopában vannak?

Mitől függ az elektronkoncentráció n-típusú félvezetőben?

Mi a termikus egyensúly a félvezetők esetében?

Mi jellemzi a termikus egyensúlyt?

Mi a töltéshordozók élettartama?

Mi a mozgékonyosság?

Hogy függ a mozgékonyosság a hőmérséklettől?

Miért függ a mozgékonyosság a hőmérséklettől?

Mi az összefüggés a mozgékonyosság és a rácsrezgések között?

Miért függ a mozgékonyosság az adalékkoncentrációtól?

Mi a rekombinációs sebesség?

Milyen rekombinációs mechanizmusokat ismer?

Mi az összefüggés a generációs és rekombinációs sebesség között termikus egyensúly esetén?

Milyen szóródási mechanizmusokat ismer?

Mi a közvetett rekombináció?

Hogy függ a szabad töltéshordozók száma a hőmérséklettől?

Mi az összefüggés a generációs sebesség és az élettertam között termikus egyensúlyban?

Mi az összefüggés a koncentráció, a rekombinációs sebesség és az élettertam között termikus egyensúlyban?

Mi a töltéshordozók szóródása, és mi az oka?

Mi okozza a diffúziós áramot?

Milyen összetevői vannak az elektromos áramnak a félvezetőkben?

Mi az összefüggés a mozgékony és a driftáram között?

Írja fel az Ohm-törvény differenciális alakját!

Mi a lavina sokszorozódás feltétele?

Milyen paraméterek határozhatók meg a Hall-effektus alapján?

Hogy függ a félvezető vezetőképessége az adalékkoncentrációtól?

Mi a különbség a szennyezők és az adalékok között?

Mitől függ a vezetőképesség?