

Dopning

19 okt. 2026, 6 min läsning

UTKAST

#fysik #fasta-tillståndets-fysik #metod

Kurs: F0005T Förkunskaper: Halvledare

Genom att byta ut enstaka atomer i halvledarkristallen mot grundämnen med annat antal valenselektroner styrs ledningen. En donator med fem valenselektroner — N, P, As — ger en extra elektron och därmed n-dopning med elektronledning. En acceptor med tre valenselektroner — B, Al, Ga — saknar en elektron och ger p-dopning med hålledning. Kombinationen av n- och p-dopade områden är grunden för halvledarkomponenter.

Formeln, symbol för symbol

$$\underbrace{E_d}_{\substack{\text{donators} \\ \text{bindningsenergi}}} \approx \underbrace{\frac{\overbrace{m^*/m_e}^{\text{lättare}}}{K^2}}_{\substack{\text{skärmning,} \\ K \approx 11,7}} \cdot \underbrace{13,6 \text{ eV}}_{\text{väte}}$$
$$\underbrace{I}_{\text{ström}} = \underbrace{I_S}_{\substack{\text{mättnads-} \\ \text{ström}}} \left(\underbrace{e^{eV/kT}}_{\substack{\text{växer snabbt} \\ \text{i framriktning}}} - 1 \right)$$

Donatorn är en väteatom inne i kristallen: elektronens effektiva massa är mindre och kislet skärmar laddningen, så bindningen blir omkring femhundra gånger svagare än i väte och av samma storlek som kT . Diodlagen säger att strömmen växer exponentiellt med spänningen i framriktningen och stannar vid $-I_S$ i backriktningen.

1. Donatorer

I kisel binder varje atom till fyra grannar med sina fyra valenselektroner. En fosforatom på en kiselplats (en substitutionell **punktdefekt**) använder fyra av sina fem elektroner till bindningarna. Den femte blir över och är bara svagt bunden till P^+ -jonen.

Hur svagt kan vi uppskatta med **Bohrs modell**: den femte elektronen kretsar kring en positiv laddning, precis som i väte. Två saker skiljer sig. Kislet runt omkring skärmar av laddningen med den dielektriska konstanten $K \approx 11,7$, och elektronen rör sig i kristallen som om den hade en **effektiv massa** m^* som är mindre än m_e .

Härledning av donatornivån med vätemodellen

I väte är jonisationsenergin och radien

$$E_1 = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = 13,6 \text{ eV}, \quad a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 0,0529 \text{ nm}$$

Fysika: Fd3 (väteliknande E_n och r_n), Te (E_H , a_0)

I kristallen ersätts ϵ_0 med $K \epsilon_0$ och m_e med m^* :

$$E_d = \frac{m^* e^4}{8 K^2 \epsilon_0^2 h^2} = \frac{m^*/m_e}{K^2} \cdot 13,6 \text{ eV}$$

$$r_d = \frac{K \epsilon_0 h^2}{\pi m^* e^2} = \frac{K}{m^*/m_e} \cdot a_0$$

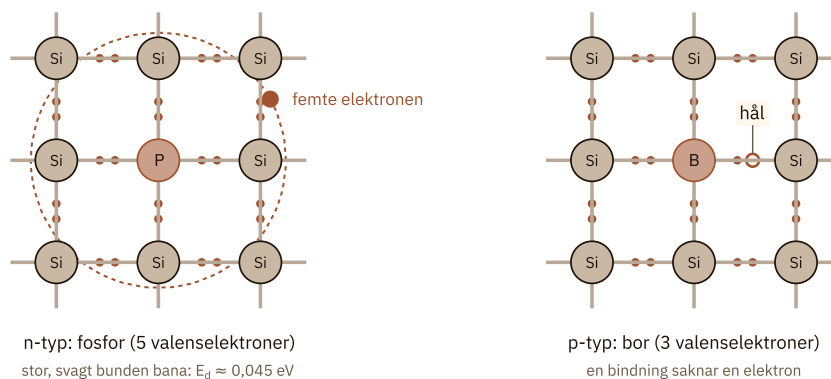
$$E_d \approx \frac{m^*/m_e}{K^2} \cdot 13,6 \text{ eV}$$

Med $m^* = 0,26 m_e$ för kisel blir $E_d \approx 0,026 \text{ eV}$ och banans radie 2,4 nm, ungefär tio atomavstånd. Uppskattningen är grov men storleksordningen stämmer: uppmätta donatornivåer i kisel ligger 0,01–0,05 eV under ledningsbandets botten. Det är av samma storlek som kT vid rumstemperatur, så nästan alla donatorer har lämnat ifrån sig sin elektron till ledningsbandet. Materialet blir **n-dopat**, med elektroner som laddningsbärare.

2. Acceptorer

En boratom har bara tre valenselektroner. En av de fyra bindningarna till grannarna saknar en elektron. Det krävs bara lite energi för att en elektron från valensbandet ska hoppa in och fylla bindningen. Acceptor-nivån ligger därför strax *ovanför* valensbandets topp, och när den fylls lämnar elektronen ett hål efter sig i valensbandet. Materialet blir **p-dopat**, med hål som laddningsbärare.

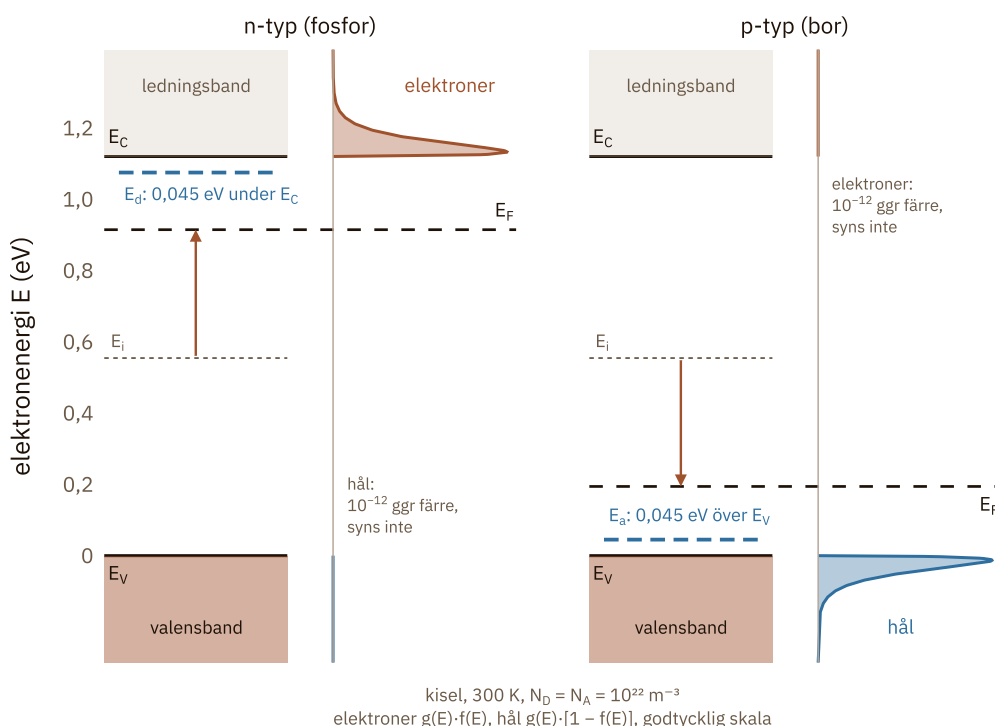
Donator och acceptor är varandras spegelbilder: en nivå strax under ledningsbandet som ger bort elektroner, respektive en nivå strax över valensbandet som tar emot dem.



Kisel med en fosfor- och en boratom. Fosfor har en elektron för mycket för de fyra bindingarna, och den femte kretsar i en stor, svagt bunden bana. Bor har en för lite, och den tomma platsen i en bindning är ett hål.

3. Majoritets- och minoritetsbärare

I ett n-dopat material är elektronerna **majoritetsbärare** och hålen **minoritetsbärare**. I ett p-dopat material är det tvärtom. Ferminivån flyttar sig från mitten av gapet mot ledningsbandet i n-dopat material och mot valensbandet i p-dopat.



Fosfor- respektive bordopat kisel vid 300 K. Donatornivån ligger strax under E_C och acceptornivån strax över E_V , och fermi-nivån har flyttat från E_i mot respektive band. Till höger om varje banddiagram syns bärarfördelningen: majoritetsbärarna samlas nära bandkanten, och minoritetsbärarna är för få för

att synas.

Materialet är fortfarande elektriskt neutralt. Varje fri elektron i n-dopat kisel motsvaras av en fast P^+ -jon i gittret, och varje hål i p-dopat kisel av en fast B^- -jon.

4. pn-övergången

Där ett p-dopat och ett n-dopat område möts diffunderar elektroner från n-sidan in i p-sidan och hål åt andra hållet, och de förintar varandra. Kvar blir ett tunt **utarmningsskikt** utan fria laddningsbärare, där de fasta jonerna ger ett elektriskt fält som bromsar diffusionen. Läger vi på en spänning V i framriktningen, med p-sidan positiv, sänks barriären och strömmen växer exponentiellt. I backriktningen höjs den, och bara en liten mättnadsström I_S går:

$$I = I_S (e^{eV/kT} - 1)$$

Det e som står i exponenten är elementarladdningen. Kvoten kT/e är 0,0259 V vid rumstemperatur, så redan en spänning på några tiondels volt ger en ström som är tiotusentals gånger större än I_S .

Samma övergång används på två sätt till: i en **lysdiod** faller elektronerna ner i hålen och sänder ut ljus med $hf \approx E_g$, och i en **solcell** skapar ljuset par av elektroner och hål som fältet i utarmningsskiktet drar isär.

Vanliga fel

- **“p-dopat är positivt laddat.”** Både n- och p-dopat material är neutrala. Bokstaven anger vilken sorts laddningsbärare som dominerar.
- **Grupp III och V förväxlas.** Donatorer (P, As, Sb) har *fem* valenselektroner och ger n-dopning. Acceptorer (B, Al, Ga) har *tre* och ger p-dopning.
- **“Dopningen är för liten för att spela roll.”** En donator per miljon kiselatomer ger miljontals gånger fler ledningselektroner än i rent kisel.
- **Tecknet på V i diodlagen.** $V > 0$ betyder p-sidan positiv (framriktning). I backriktningen går $e^{eV/kT}$ mot noll och $I \rightarrow -I_S$.

5. Lösta exempel

≡ Exempel – Fosfordopat kisel

Kisel har åtta atomer per kubisk enhetscell och gitterkonstanten $a = 0,5431$ nm. Det dopas med en fosforatom per 10^6 kiselatomer, och donatornivån ligger $0,045$ eV under ledningsbandet.

a) Bestäm donatorkoncentrationen. b) Beräkna Boltzmannfaktorn $e^{-E_d/kT}$ vid 300 K och jämför med faktorn $e^{-E_g/2kT} = 3,91 \cdot 10^{-10}$ för egenledning. c) Rent kisel har ungefär $1,0 \cdot 10^{16}$ ledningselektroner per m^3 vid 300 K. Hur många gånger fler blir det om alla donatorer är joniserade?

Lösning

a) Atomtätheten i kisel:

$$n_{\text{Si}} = \frac{8}{(0,5431 \cdot 10^{-9})^3} = 4,99 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

En på miljonen:

$$n_d = 10^{-6} \cdot 4,99 \cdot 10^{28} = \boxed{4,99 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}}$$

b) Med $kT = 0,02585$ eV:

$$e^{-E_d/kT} = e^{-0,045/0,02585} = e^{-1,741} = \boxed{0,175}$$

Det är $0,175/3,91 \cdot 10^{-10} \approx 4,5 \cdot 10^8$ gånger större än faktorn för egenledning. Donatorelektronerna har så låg bindningsenergi att de i stort sett alla är fria.

c)

$$\frac{n_d}{n_i} = \frac{4,99 \cdot 10^{22}}{1,0 \cdot 10^{16}} = \boxed{5,0 \cdot 10^6}$$

En miljondel fosfor ger fem miljoner gånger fler ledningselektroner.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

☰ Exempel – Diodens ström

En kisel-diod har mättnadsströmmen $I_S = 1,00 \text{ nA}$ vid 300 K . Bestäm strömmen vid spänningen $+0,300 \text{ V}$ och $-0,300 \text{ V}$. Vilken spänning i framriktningen ger strömmen $10,0 \text{ mA}$?

Lösning

Termiska spänningen.

$$\frac{kT}{e} = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 0,02585 \text{ V}$$

Framriktningen, $+0,300 \text{ V}$.

$$\frac{eV}{kT} = \frac{0,300}{0,02585} = 11,61$$

$$I = 1,00 \cdot 10^{-9} (e^{11,61} - 1) = 1,00 \cdot 10^{-9} \cdot 1,10 \cdot 10^5 = \boxed{0,110 \text{ mA}}$$

Backriktningen, $-0,300 \text{ V}$. $e^{-11,61} = 9 \cdot 10^{-6}$ är försumbart:

$$I = 1,00 \cdot 10^{-9} (e^{-11,61} - 1) \approx \boxed{-1,00 \text{ nA}}$$

Spänningen för $10,0 \text{ mA}$. Lös ut V :

$$e^{eV/kT} = \frac{I}{I_S} + 1 = \frac{10,0 \cdot 10^{-3}}{1,00 \cdot 10^{-9}} + 1 \approx 1,00 \cdot 10^7$$

$$V = \frac{kT}{e} \ln(1,00 \cdot 10^7) = 0,02585 \cdot 16,12 = \boxed{0,417 \text{ V}}$$

Samma spänning åt andra hållet ger strömmar som skiljer sig en faktor hundratusen. Det är diodens likriktande egenskap.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 42.6 Semiconductors
.....
 - 42.7 Semiconductor Devices
.....
-
-