

Halvledare

19 okt. 2026, 4 min läsning

UTKAST

#fysik #fasta-tillståndets-fysik #modell

Kurs: F0005T Förkunskaper: Bandgap, Fermi-Dirac-fördelningen

I en halvledare — kisel, germanium, GaAs — är bandgapet litet nog att elektroner lätt exciteras från valensbandet till ledningsbandet, och antalet sådana elektroner stiger snabbt med temperaturen. Varje exciterad elektron lämnar ett hål efter sig i valensbandet, och båda bidrar till ledningen: elektronerna genom att röra sig i ledningsbandet, hålen genom att elektroner i valensbandet flyttar sig in i dem.

Formeln, symbol för symbol

$$\underbrace{f}_{\text{besatt vid bandkanten}} \approx \exp\left(-\frac{\overbrace{E_g/2}^{\text{halva gapet}}}{\underbrace{kT}_{\text{termisk energi}}}\right)$$

E_F ligger mitt i gapet, så ledningsbandet ligger bara halva gapet ovanför. Kvoten står i en exponent, och därför ger en liten ändring av T eller E_g en stor ändring av antalet laddningsbärare.

1. Ferminivån mitt i gapet

I en ren, **egenledande** halvledare kommer varje ledningselektron från valensbandet och lämnar ett hål där. Antalet elektroner i ledningsbandet är därför lika med antalet hål i valensbandet. Enligt symmetrin i **Fermi-Dirac-fördelningen** är sannolikheten för en elektron Δ över E_F lika stor som sannolikheten för ett hål Δ under. Om banden är ungefär lika formade hamnar E_F därför mitt i gapet.

Ledningsbandets botten ligger då $E_g/2$ över ferminivån:

$$E - E_F = \frac{E_g}{2}$$

$$f = \frac{1}{e^{E_g/2kT} + 1}$$

Eftersom $E_g/2 \gg kT$ kan ettan strykas:

$$f \approx e^{-E_g/2kT}$$

Det är halva gapet, inte hela, som står i exponenten. För kisel vid rumstemperatur blir f ungefär $4 \cdot 10^{-10}$. Det är också lite: rent kisel har vid rumstemperatur ungefär 10^{16} ledningselektroner per kubikmeter, omkring en biljondel av vad en metall har. Därför leder rent kisel dåligt, och därför är det så effektivt att **dopa** det.

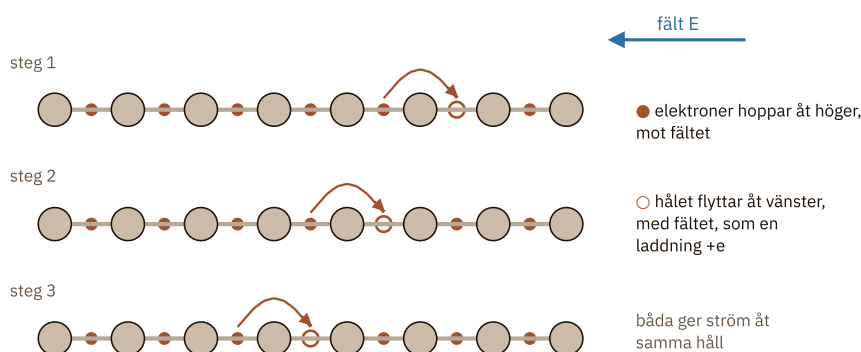
2. Hål

När en elektron lämnar valensbandet blir ett tillstånd tomt. En granne i valensbandet kan flytta in i det tomma tillståndet och lämnar då ett nytt tomrum efter sig. Tomrummet vandrar alltså åt motsatt håll mot elektronerna som flyttar.

Det är enklare att följa tomrummet än alla elektroner i det nästan fulla bandet. Vi kallar det ett **hål** och ger det laddningen $+e$. I ett elektriskt fält rör sig hålet i fältets riktning, som en positiv laddning. Både elektroner och hål ger ström i samma riktning:

$$I = I_{\text{elektroner}} + I_{\text{hål}}$$

I en egenledande halvledare är antalet lika: $n = p$.



Ett hål vandrar. I varje steg hoppar en elektron i en bindning in i hålet till höger om sig, mot fältet. Hålet flyttar då ett steg åt vänster, i fältets riktning, precis som en positiv laddning.

3. Stark temperaturberoende

Exponenten gör att antalet laddningsbärare ökar mycket snabbt med temperaturen. För kisel ökar det ungefär tjugo gånger mellan 300 och 350 K. Resistiviteten sjunker därför kraftigt när en halvledare värms upp. En metall beter sig tvärtom: där är antalet elektroner fast, och när gittret vibrerar mer sprids elektronerna oftare, så resistiviteten ökar något med temperaturen.

Den skillnaden används i termistorer, temperaturgivare som är gjorda av halvledarmaterial.

4. Fotoledning

En foton med $hf \geq E_g$ kan också skapa ett par av en elektron och ett hål (se **Bandgap**). En halvledare leder då bättre när den belyses än i mörker. Det är principen för ljussensorer och, tillsammans med en pn-övergång, för solceller. Ljus med längre våglängd än hc/E_g passerar utan effekt.

Vanliga fel

- **Hela gapet i exponenten.** Avståndet från E_F till ledningsbandet är $E_g/2$. Med $e^{-E_g/kT}$ blir svaret för kisel 10^{-19} i stället för 10^{-10} .
- **Hålet som en verklig partikel.** Hålet är ett tomt tillstånd i valensbandet, inte en positron. Det har ingen egen existens utanför kristallen.
- **“Resistansen ökar med temperaturen.”** Det gäller metaller. En halvledare leder *bättre* när den blir varm.
- **kT vid fel temperatur.** Exponenten är så känslig att en ändring på tio procent i T ändrar f med en faktor större än två. Räkna om kT för varje temperatur.

5. Lösta exempel

Exempel – Kisel och germanium

Kisel har bandgapet 1,12 eV och germanium 0,67 eV, med fermivån mitt i gapet. Bestäm sannolikheten att ett tillstånd vid ledningsbandets botten är besatt i kisel vid 300 K och 350 K, och kvoten mellan dem. Jämför med germanium vid 300 K.

Lösning

Termiska energier.

$$kT_{300} = 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 300 = 0,025852 \text{ eV} \quad kT_{350} = 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 350 = 0,030161$$

Fysika: Te

Kisel vid 300 K. $E_g/2 = 0,560 \text{ eV}$:

$$f = e^{-0,560/0,025852} = e^{-21,662} = \boxed{3,91 \cdot 10^{-10}}$$

Kisel vid 350 K.

$$f = e^{-0,560/0,030161} = e^{-18,567} = \boxed{8,64 \cdot 10^{-9}}$$

Kvoten.

$$\frac{8,64 \cdot 10^{-9}}{3,91 \cdot 10^{-10}} = \boxed{22,1}$$

En temperaturökning på 17 % ger drygt tjugo gånger fler ledningselektroner.

Germanium vid 300 K. $E_g/2 = 0,335 \text{ eV}$:

$$f = e^{-0,335/0,025852} = e^{-12,958} = \boxed{2,36 \cdot 10^{-6}}$$

Det är omkring 6000 gånger mer än i kisel vid samma temperatur. Ett gap som bara är 40 % mindre ger nästan fyra tiopotenser mer.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 42.6 Semiconductors