

Basis dokument

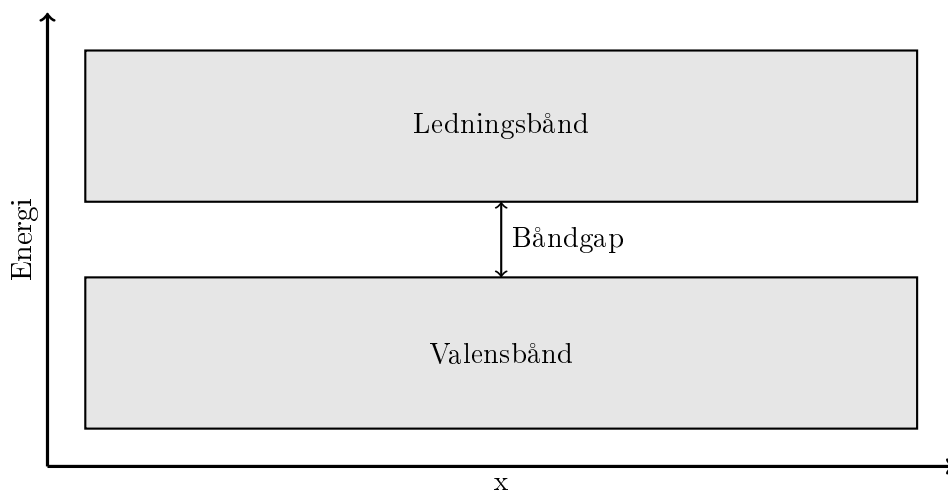
Jon Skarpeteig

23. oktober 2009

1 Solcelle teori

De fleste solceller er krystallinske, det betyr at strukturen er ordnet, eller periodisk. I praksis vil krystallene inneholde feil av forskjellige slag. Noen solcellematerialer er ikke krystallinske, men mangler langtreggende periodisitet. Disse består da av amorfe materialer.

Et fritt elektron i vakuum vil kunne innta en hvilken som helst energi. Et elektron i en krystallstruktur er bundet av energibånd atskilt av gap med energitilstander som elektronene ikke kan ha. Det er derfor bare plass til et endelig antall elektroner i hvert bånd, fordi hver tilstand bare kan romme to elektroner i følge Pauli-Prinsippet. For en krystall kan energibåndene oppfattes som overlapp av enkelttilstander for hvert atom. En kan oppfatte energibåndene som krystallens 'elektronshell'.



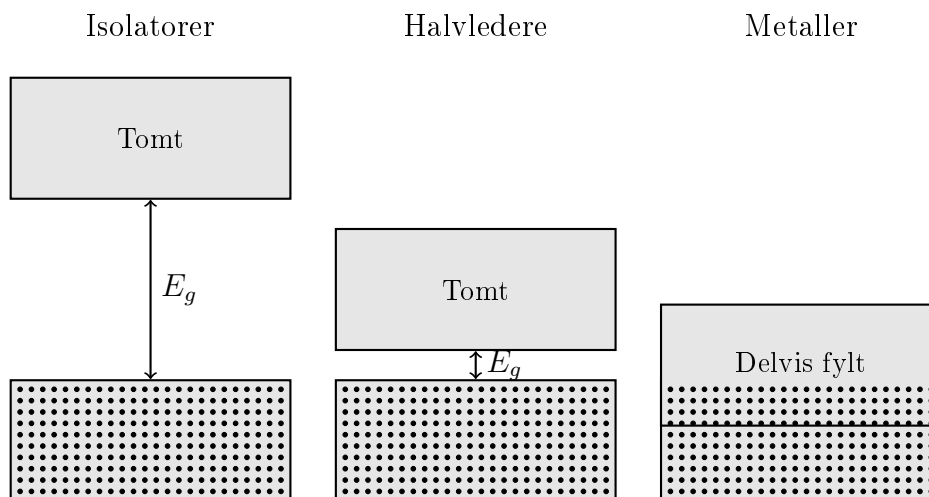
Figur 1: Energibånd

Det øverste båndet kalles ledningsbåndet. Energibåndet umiddelbart under ledningsbåndet, kalles valensbåndet. De ikke tillatte tilstandene mellom valensbåndet og ledningsbåndet kalles båndgapet. Dette båndgapet er veldig viktig i forbindelse med solceller og oppgis ofte i elektronvolt (eV).

For at elektronet skal kunne flytte på seg må det befinne seg i ledningsbåndet. Et elektron må ha nok energi til å kunne eksiteres fra valensbåndet. Eksitasjon vil si at et elektron forflytter seg fra valensbåndet til ledningsbåndet. Dette kan skje ved at elektronet får høy nok energi til å forflytte seg over båndgapet ved termisk energi, eller annen energi tilført utenfra, som fra lys. Dette gir økt ledningsevne til materialet. Samtidig blir det en ledig plass i valensbåndet, som gjør at andre elektroner i valensbåndet kan få høyere kinetisk energi på grunn av færre kollisjoner. Dette påvirker også materialet slik at det får høyere ledningsevne. Energien til lys ved elektronvolt er gitt av:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

der E er energi i elektronvolt, h er Plancks konstant, ν er frekvens, og c er lysfarten. Materialer deles ofte inn i tre kategorier; Isolatorer, halvledere, og metaller. Isolatorer har ingen, eller få elektroner i ledningsbåndet, som gir dem dårlig ledningsevne. Metaller har som regel fylte ledningsbånd ved romtemperatur, som gir dem god ledningsevne. Selv ved 0K har metaller et delvis fylt ledningsbånd. Halvledere har dårligere ledningsevne enn metaller, og vil ved 0K ikke ha noen elektroner i ledningsbåndet. Båndgapet til halvledere ligger mellom det for isolatorer og metaller, slik at ved romtemperatur er ledningsbåndet delvis fylt, i motsetning til isolatorer.



Figur 2: Typiske båndgap ved 0K

Typisk båndgap for halvleder silisium er 1.1eV, sammenlignet med 5eV for diamant som er en isolator. [1, Kapittel 3]

Hull er en beskrivelse for fravær av elektroner i valensbåndet. Et hull vil oppstå når et elektron eksiteres fra valensbåndet til ledningsbåndet. Lite båndgap, og høy temperatur vil gi vesentlig flere elektroner i ledningsbåndet, enn for lave temperaturer og stort båndgap. Dette beskrives med massevirkningsloven:

$$np = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2)$$

der n er antall elektroner, p er antall hull, N_c og N_v er konstanter for gitte materialer. E_g er båndgapet, k er Boltzmanns konstant og T er temperaturen i Kelvin. For en intrinsikk halvleder, det vil si en halvleder uten noe form for doping, for eksempel ren silisium, kan massevirkningsloven skrives:

$$np = n_i^2 \quad (3)$$

der

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (4)$$

Fra massevirkningsloven kommer det av E_g er en avgjørende faktor for om en krystall kan sies å være en halvleder eller ikke.

1.1 Doping

Ved å sette inn andre atomer i en krystallstruktur, med en annerledes elektronfordeling er det mulig å øke elektroner i ledningsbåndet uten å endre konsentrasjonen av hull i valensbåndet. Dette kalles donor-doping. Et eksempel på donor-doping er å tilsette fosfor i en silisiumkrystall. Dette vil føre til flere elektroner i ledningsbåndet, da fosfor har et valenselektron mer enn silisium og valensbåndet er tilnærmet fullt. Fosfor vil i dette tilfellet kalles donor i denne donor-doping. Doping konsentrasjonen er vanligvis så liten at båndstrukturen ikke forstyrres vesentlig. Hvis en for eksempel setter inn bor istedenfor fosfor, vil silisium krystallen bli akseptor-dopet. Bor har et mindre elektron i valensbåndet enn silisium, og vil derfor tilføre et hull ekstra i valensbåndet. Som regel er donorkonsentrasjonen av hull og elektroner i henholdsvis valens- og ledningsbånd vesentlig høyere enn den intrinsikke, slik at det er en god tilnærming å sette

$$n \approx N_d \quad (5)$$

for donordoping, og

$$n \approx N_a \quad (6)$$

for akseptordoping. Der N_d er donorkonsentrasjonen, og N_a er akseptorkonsentrasjonen.

En dopet halvleder omtales generelt som ekstrinsikk. Hvis en halvleder er dopet med overtall av donor atomer, har den overtall av elektroner, og kalles n-dopet. For akseptordoping omtales halvlederen som p-dopet, da den har overtall av hull. Den dominerende ladningsbærertypen kalles for majoritetsbæreren. Majoritetsbærerne vil være de som i hovedsak sørger for strømtransporten gjennom halvlederen.

1.2 Transport- og rekombinasjons-prosesser

Det er to mekanismer som bidrar til transport av elektroner og hull i halvledere: drift og diffusjon. Drift er transport av en ladd partikkel på grunn av et elektrisk felt. For transport av et hull i en dimensjon er strømmen I_p lik antall hull N_p ganger ladning q som krysser et tverrsnitt.

$$I_p = N_p q \quad (7)$$

I vakuum vil et elektrisk felt akselerere hullene, og hastigheten vil stadig øke. I halvledere vil det oppstå kollisjoner med atomene i halvlederen, som gir hullene en midlere hastighet så lenge feltet er konstant. Denne midlere driftshastigheten er relatert til feltet via hullenes mobilitet μ_p

$$v_p = \mu_p E \quad (8)$$

Hvis alle hullene beveger seg i samme retning kan en da beregne strøm per areal, eller strømtetthet.

$$J_p = \frac{I_p}{A} = \frac{N_p q}{A} = p A v_p \frac{q}{A} = p v_p q = p q \mu_p E \quad (9)$$

Kombinert med tilsvarende uttrykk for elektroner:

$$J = J_p + J_n = (n q \mu_n + p q \mu_p) E = \sigma E \quad (10)$$

der μ_n er mobiliteten for elektroner, og σ er halvlederens ledningsevne. J_n er elektronstrømtettheten.

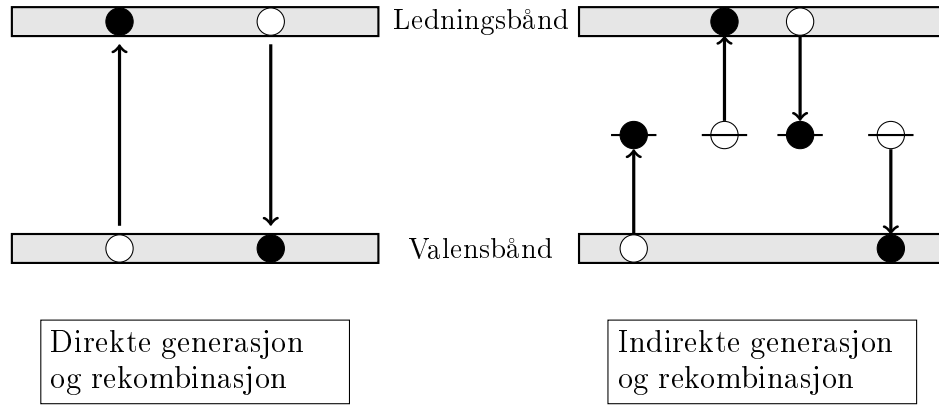
Strømmen blir da

$$I = J A = A \sigma E = \left(\frac{A \sigma}{L} \right) V \quad (11)$$

Halvledere vil typisk ha ledningsevne 10^{-8} til 10^3 S/m. Typiske verdien for isolatorer og metaller er henholdsvis 10^{-14} og 10^6 S/m [1, Kapittel 4]

Elektronet kan gå fra det ene båndet til det andre direkte eller indirekte. Ved indirekte generasjon og rekombinasjon kan elektronet benytte seg av såkalte gap-tilstander. Dette er tilstander somer knyttet til forurensinger,

defekter i krystallstrukturen, grenseflater mellom krystallkorn for multikrystallinske materialer, og overflater. Gap-tilstander ligger mellom valensbåndet og ledningsbåndet, som er ikke tillatte tilstander for en perfekt krystal (se fig. 3)



Figur 3: Generasjon og rekombinasjon

I halvledere med direkte båndgap, som GaAs, vil begge prosessene kunne opptre. Silisium har indirekte båndgap, og vil ikke få en direkte prosess uten deltagelse av gittervibrasjoner (fononer). Dette er mindre sannsynlig enn indirekte generasjon og rekombinasjon, og indirekte generasjon og rekombinasjon vil derfor dominere. Elektronet antas å bevege seg som en planar bølge med propageringskonstanten \vec{k} , også kalt bølgevektor.

Generasjons- og rekombinasjonsprosesser kan beskrives ved nettoproduksjon av elektroner til ledningsbåndet, U_n , proporsjonalt med avviket fra likevekt

$$U_n = -\frac{n - n^0}{\tau_n} \quad (12)$$

der τ_n er midlere levetid for elektronet. n er konsentrasjonene av elektroner, og n^0 er likevektskonsentrasjonene av elektroner. Midlere levetid, vil være den tiden elektroner er i ledningsbåndet før det rekombinerer. Tilsvarende er nettoproduksjonen av hull U_p

$$U_p = -\frac{p - p^0}{\tau_p} \quad (13)$$

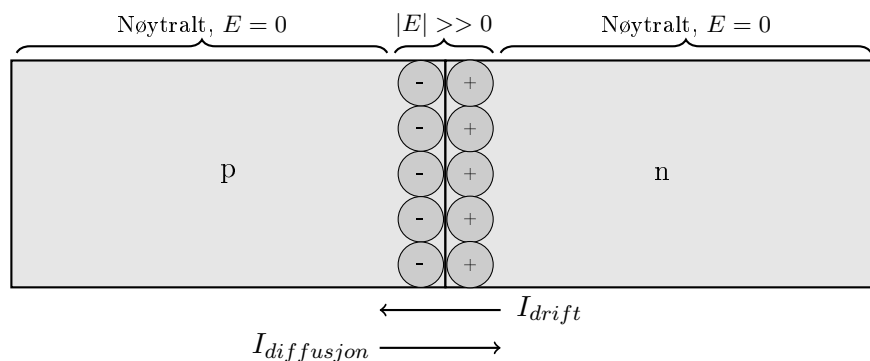
der p er konsentrasjonen av hull og p^0 er likevektskonsentrasjonen av hull. τ_p er midlere levetid for hull.

1.3 Solceller

En halvleder med et p-dopet og et n-dopet område som ligger inntil hverandre kalles en pn-overgang. En slik pn-overgang har likerettende egenskaper.

Det vil si at den leder strøm vesentlig bedre i den ene retningen enn den andre. Denne oppførselen definerer en diode. Siden p-siden har en konsentrasjon av elektroner i ledningsbåndet som er vesentlig lavere enn n-sidens konsentrasjon av elektroner i ledningsbåndet, vil vi få en transport av ledningsbåndelektroner fra n-siden til p-siden ved diffusjon. Det samme skjer også for hull fra p-siden til n-siden. Denne strømmen av ladnings kalles diffusjonsstrømmen. I prinsippet kan også dopantene Si, B og P diffundere mellom de to delene av krystallen, men er bare betydelig for veldig høye temperaturer, altså ikke vesentlig i romtemperatur.

Deplesjonssjiktet er et område nær grenseflaten mellom de to dopekonsentrasjonene som vil være essensielt tømt for frie ladningsbærere. Siden n-siden av deplesjonssjiktet inneholder donorer uten tilhørende elektron vil denne siden være positivt ladet, og tilsvarende vil p-siden være negativt ladet. Dette gjør at det oppstår et elektrisk felt fra n- til p-siden, eller et fall i potensial fra n-siden til p-siden. Dette feltet fører til en driftstrøm som går i motsatt retning av diffusjonsstrømmen og fører til 0 netto strøm, eller likevekt.



Figur 4: Deplesjonssjiktet

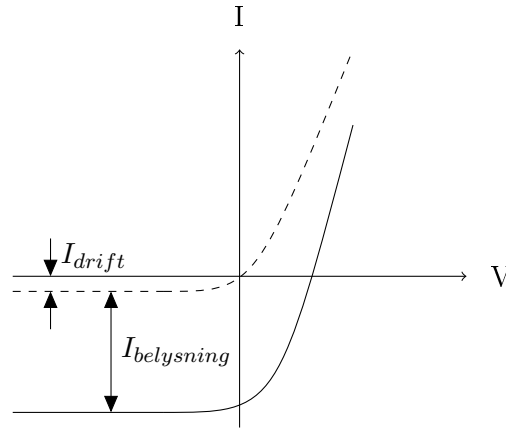
Ved belysning genereres det minoritetsbærere i pn-overgangen utover de som genereres termisk ved at fotoner eksiterer elektroner til ledningsbåndet. Denne genereringen er ofte vesentlig større enn driftstrømmen. Denne strømmen er uavhengig av potensialforskjellene i pn-overgangen. For en diode i mørke er det gitt en strøm-spenning karakteristikk gitt av:

$$I = |I_{drift}| e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \quad (14)$$

Når pn-overgangen blir belyst vil driftstrømmen øke, og forskyve strøm-spenning karakteristikken nedover

For solceller defineres ofte strøm ut av cellen som positiv, slik at karakteristikken vendes om V-aksen

$$I = I_{belysning} - I_{drift}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (15)$$



Figur 5: Strøm-spenningskarakteristikken for en solcelle

hvor $I_{belysning}$ er strøm generert av lys. Spenningen ved åpen krets er gitt ved:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{belysning}}{I_{drift}} + 1\right) \quad (16)$$

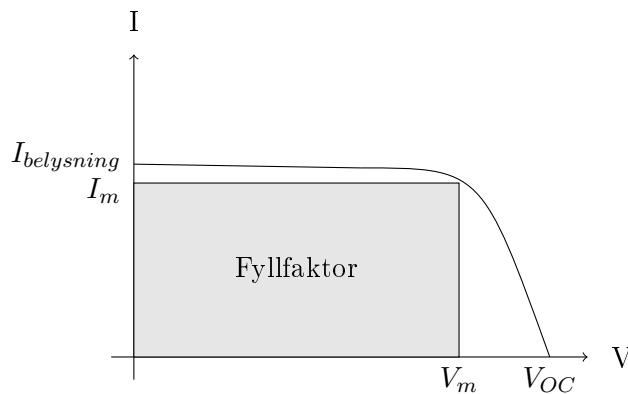
Maks effekt som genereres av solcellen er gitt av:

$$P_m = I_m V_m \quad (17)$$

Hvor P_m er maks effekt, I_m er maks strøm og V_m er maks spenning. Fyllfaktoren FF er gitt av faktisk effekt ut, over teoretisk maks effekt:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{belysning} V_{OC}} \quad (18)$$

hvor V_{OC} er spenning ved åpen krets.



Figur 6: Strøm-spenningskarakteristikken for en solcelle

Virkningsgraden til en solcelle er representert ved η , som er gitt ved:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inn}} = FF \frac{I_{belysning} V_{OC}}{P_{inn}} \quad (19)$$

2 Tap

Mye tap er relatert til såkalte dårlige områder, hvor det er mye rekombinasjon. Ved å karakterisere dårlige områder, er det mulig å utbedre feil som det finnes kjente metoder for å unngå.

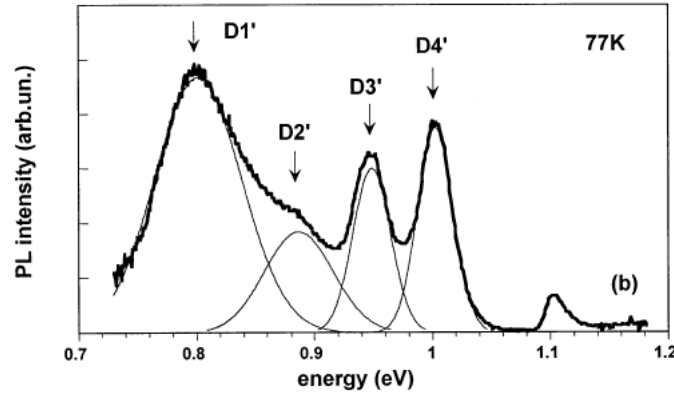
Fotoluminisensspekteret ved romtemperatur er dominert av emisjon ved $h\nu_{maks} = 1.09eV$, og et område rundt $0.8eV$. [2]

Et eksempel på dette er fjerning av forurensinger som jern (?) CITATION NEEDED

2.1 Dislokasjonslinjer

Dislokasjonslinjer er linjer som kan ses på spektrometri spekter av eksitert lys fra prøven

Det er fire linjer, D1, D2, D3 og D4 som hver har sin særegne karakteristikk.



Figur 7: D-linjer

Figur 2.1 viser dislokasjonslinjer for multikrystallinsk silisium ved 77K. D1' er ved 0.80eV, D2' ved 0.89eV, D3' ved 0.95eV og D4' ved 1.00eV [2]

D1/D2 and D3/D4 belongs to different entities, based on the pl mapping.

Referanser

- [1] Sanjay Kumar Banerjee Ben G. Streetman. *Solid state electronic devices*. Prentice Hall, 2006.
- [2] C.Haessler E.-U. Reisner I. Tarasov, S. Ostapenko. Spatially resolved defect diagnostics in multicrystalline silicon for solar cells. *Elsevier Science S.A*, 2000.