

Prosjekt i Elektrisitet og Magnetisme.

Solceller og halvledere

Kristian Rød

Innlevering 23.april 2004

Innholdsfortegnelse:

- 1. Sammendrag**
- 2. Innledning**
- 3. Solceller, generelt**
- 4. Halvledere**
 - 4.1. Elementært**
 - 4.2. Energibåndstruktur**
 - 4.3. Hull**
 - 4.4. Doping**
 - 4.5. p-n overgang**
- 5. Solceller, teori**
- 6. Eksperiment**
- 7. Konklusjon/oppsummering**
- 8. Bibliografi**
- 9. Vedlegg**

1. Sammendrag

Fremtiden kommer til å bli preget av ”grønne” energiproduksjonsmåter. Solcellen representerer en av måtene som man kan utnytte de enorme energimengdene som kommer fra sola.

En solcelle består av halvledere. Halvledere er stoffer som ikke har så stor ledningsevne som metaller, og heller ikke så dårlig ledningsevne som isolatorer. Eksempler på halvledere er silisium og germanium. Skal man forstå en halvleder må man forstå energibåndstrukturen til den. Elektroner kan hoppe imellom disse tilstandene, og etterlater seg hull, som nye elektroner kan gå til. Fins det en påtrykt spenning på halvlederen vil det gå en elektrisk strøm gjennom materialet.

Man kan dope en halvleder slik at det blir flere elektroner i ledningsbåndet, såkalt n-type halvleder, og man kan dope den slik at det blir flere hull i valensbåndet. Uansett øker du ledningsevnen.

Setter du en p –og en n-type halvleder i kontakt med hverandre får du en diode. En diode lar bare en strøm med en viss retning komme igjennom materialet. En solcelle er essensielt en diode, der fotoner kommer inn og eksiterer elektron fra valensbåndet til ledningsbåndet i kontaktflaten mellom p –og n-typen. Dette gjør at det blir generert en elektrisk spenning, og lager man en sluttet krets med solcella som en komponent vil det gå strøm igjennom kretsen, og eventuelt få en lampe til å lyse eller lade opp et batteri.

Det er beskrevet et kvalitativt eksperiment til slutt i rapporten for å bekrefte de teoretiske formler og kurver. Eksperimentet ga et tilfredsstillende resultat.

2. Innledning

Miljøvennlige måter å produsere energi på er ord som klinger godt i mine ører, men jeg mener bestemt at man har bygget ut nok vasskraft her i landet. Dermed synes jeg det er på tide at vi forsøker å tenke litt nytt. Solcellene har vel funnet sin lille nisje på hytteveggen kan man tenke seg, men om det fins muligheter for å utnytte og forbedre dagens teknologi burde man

uansett gjøre et forsøk. Særlig tatt i betraktning hvilke store mengder energi som kommer som en gavepakke til oss fra sola, nonstop.

Skal en gjøre en prosess mer effektiv må man kjenne godt til den nåværende. Her er et spedt forsøk på å sette meg inn i halvledernes verden, slik at jeg en vakker dag kan være med på å revolusjonere solcelleindustrien..

Først i denne avhandlingen kommer det noen avsnitt om solceller generelt, uten noe tungfordøyelig fysikk, for å få øynene opp for mulighetene som ligger i solenergi. Så kaster vi oss hodestups inn i den teoretiske fysikken med det mål å forstå den mystiske og mytiske halvlederens natur. Og fortsetter uten noen slags friksjon inn i den vidgjetne solcella. Til slutt bekrefter vi alle våre nyervervede og hardt tilkjempede kunnskaper med et eksperiment som lett kan sammenlignes med Peers legendariske bukkeritt.

3. Solceller, generelt.

En solcelle gjør energi som kommer fra sola i form av energikvanter om til nyttbar elektrisk energi. Dette er ganske genialt for sola er praktisk talt utømmelig for energi. Forskningen rundt dette temaet har egentlig ikke vært så omfattende som man kanskje skulle ha trodd. Verden har nærmest fullt og helt satset på fossile brennstoff som olje, gass og kull og kjernekraft. I Norge har det også blitt satset hardt på vannkraft. Med våre ”nye” bekymringer for menneskeskapt global oppvarming og dertil krav om en renere energiproduksjon, har solenergi og andre miljøvennlige konsept fått en oppsving.

Det ligger et enormt potensial i energien fra sola. Strålingen som treffer jorda i løpet av et år tilsvarer 15000 ganger jordas energibehov i den samme tidsperioden. Det vil si at med dagens teknologi vil en kunne dekke energibehovet til jorda ved å legge solceller på ca. 0,1 % av jordas ørkenområder.

Noen av problemene med solceller er at man må bruke energien med en gang, eller forsøke å lagre den. Det blir oftest gjort med et vanlig batteri, men lagringskapasiteten er jo begrenset. Forskerne ser for seg at dette kan bli løst ved å benytte hydrogen som energibærer. Hydrogen i væskeform er forholdsvis lett å lagre og transportere, men det er et problem å få hydrogenet til å gå fra gass til væskeform.

Silisium er det mest vanlige stoffet å lage solceller av. Det er ganske energikrevende å fremstille silisium fra kvarts, men den myten om at en solcelle vil ha problemer med å tjene inn igjen energien brukt til å lage den, stemmer ikke. "Nedbetalingstiden" er med dagens solceller nede i bare et par år. Den antatte levetiden til et solcellepanel er på ca. 30 år.

Prisen på strømmen en får fra solceller er ennå ganske mye dyrere enn strømprisene i Norge. Dette vil forbedre seg ettersom teknologien blir bedre, med mer effektive panel og fremstillingsprosesser. Etterspørselen etter solceller har økt med ca. 20 % hvert år, og med et større volum ute til salgs, går også prisene ned. Det er faktisk de store oljeselskapene, slik som for eksempel British Petroleum og Shell, som er de største produsentene av solceller. Å produsere solceller faller innenfor deres ønskede image om å være miljøvennlige og fremtidsrettede.

I Norge pryder ca. 80000 solcellepanel hytteveggene over det ganske land. Det har løst problemet med å transportere energi til områder uten tilknytning til det ordinære strømnettet. Det er dog håp om at solcellepanel og solenergi generelt kan spille en rolle i fremtidens energisystem, når olje og gass blir gammeldags. (G. Hagen)

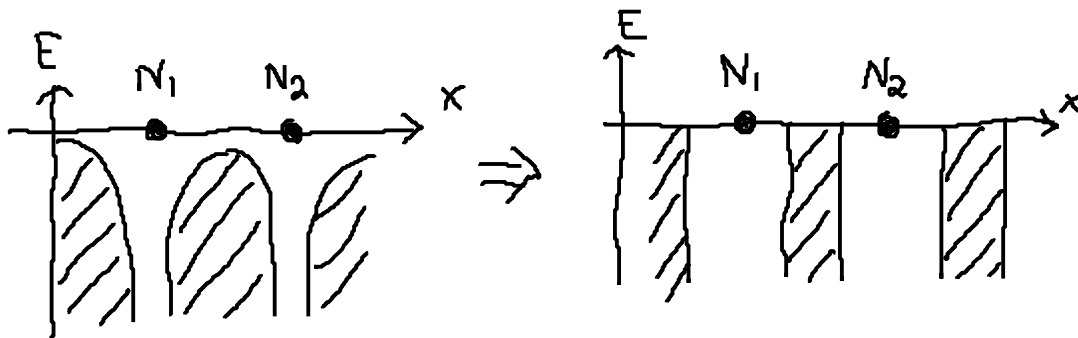
4. Halvledere.

4.1. Elementært.

En av egenskapene som definerer et fast stoff er den elektriske ledningsevnen, konduktiviteten. Man deler stoffene grovt inn i tre kategorier: ledere, halvledere og isolatorer. En leder og en isolator har henholdsvis en konduktivitet på mellom 10^4 og 10^6 (Ocm) $^{-1}$, og mindre enn 10^{-10} (Ocm) $^{-1}$. En halvleder har en konduktivitet mellom dette. Ledningsevnen alene er ikke nok til å klassifisere et stoff som halvleder. Vanlig policy er å utelukke alkaliske stoffer og substanser som ikke er kjemisk uniforme, og en krever også at halvlederen kan bli fått i (mono)krystallinsk form. Konduktiviteten til en halvleder er lik null når temperaturen går mot det absolutte nullpunkt (-273,16°C), og vil øke med temperaturen. Ledningsevnen til metaller synker med temperaturen (Karlheinz Seeger: 1997). Dette fordi økende temperatur fører til at atomgitteret i krystallen vil vibrere kraftigere og dermed gjøre det vanskeligere for elektronene å passere. Altså en redusert driftshastighet. Hvorfor ikke det samme er resultatet for halvledere har med kvantemekanikk å gjøre, og jeg vil komme tilbake til det senere.

4.2. Energibåndstruktur.

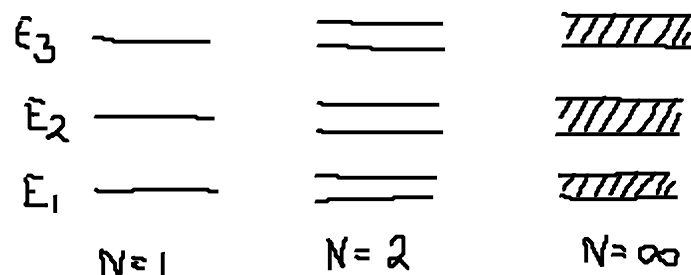
Hvorvidt et stoff har en god ledningsevne eller ei, kommer an på energibåndstrukturen til det gitte stoffet. Når et elektron beveger seg i et atomgitter vil det være underlagt coulombkrefter fra de positive atomkjernene. Dette potensialfeltet kan forenkles til ei rekke(endimensjonalt) med periodiske potensialbrønner, den såkalte *Kronig-Penney-modellen*. Bevegelsene til elektroner er gitt av Schrödinger-ligningen og ut av den kan vi få ut resultater som gir oss de tillatte energibåndene og de forbudte energigapene (Karlheinz Seeger: 1997).



Figur 1. Coulombpotensialet for to atomer. Det eksakte og det tilnærmede.

(Karlheinz Seeger: -97 og Alonso og Finn: -92)

Med kvantemekanikken vet vi at energien til elektronet er kvantisert. Det vil si at elektroner bare kan være i spesielle energitilstander. Et atom har mange distinkte energitilstander som elektroner kan hoppe imellom, og når vi har samlet mange atomer vil disse tilstandene danne energibånd, der energitilstandene ligger svært tett. Mellom energibåndene er det båndgap hvor elektronet ikke har lov til å befinne seg.



Figur 2: Energinivåene til elektroner tilknyttet henholdsvis ett, to og et uendelig antall atomer. Som kjent kan en bare løse Schrödinger-ligningen for et proton og et elektron. De resterende energinivåene kan man finne med numeriske metoder.

(Støvnengs notater: 2002-03)

Det er fyllingsgraden og avstanden mellom de forskjellige energibåndene som avgjør hvilket stoff vi har. Et metall vil ikke ha fylt opp sitt "øverste" energibånd (eller at det øverste energibåndet overlapper med et annet tomt et), og det skal da en veldig liten energimengde til for at et elektron skal eksiteres til en høyere energitilstand. Dette kan være termisk energi eller det kan være et påtrykt elektrisk felt som da vil gjøre metallet strømførende.

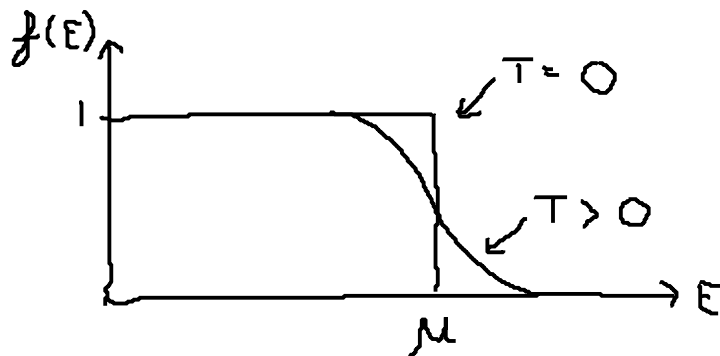
En isolator vil ha fylt helt opp sitt øverste bånd med elektroner. Disse elektronene vil da måtte få en ganske betydelig mengde energi for å eksiteres. De må overvinne båndgapet. Båndgapet til en isolator er typisk på 6 eV, og denne energien vil ikke være tilgjengelig ved normale felt eller høye temperaturer (Lien, Hunderi, Lillestøl: -01).

Elektroner er fermioner. Det vil si at de har spinn lik en halv, og at de underkaster seg Paulis eksklusjonsprinsipp. Dette prinsippet sier at bare ett fermion av gangen kan være i en energitilstand. En energitilstand er klassifisert også av spinn, opp eller ned, så det kan være to elektroner på det samme energinivå. Dette må også tas med i betraktningen av hvordan elektroner fordeler seg i en båndstruktur.

Med temperatur nær det absolutte nullpunkt vil elektronene besette alle de nederste energinivåene. Det øverste energinivået blir da kalt fermi-energien (e_F). Brøkdelen av termisk eksiterte elektroner er av orden kT / e_F , der kT er den gjennomsnittlige termiske energi. Bare de elektronene som er i en avstand av kT fra fermi-energien kan være ledningsbærere i en elektrisk strøm i et metall. Fermi-energien er lik $\mu(0)$, det såkalte kjemiske potensial (Alonso og Finn: -92). For å regne på dette bruker man Fermi-Dirac-fordelingen. Den gir oss sannsynligheten for at en tilstand med energi E er besatt av et fermion ved temperatur T :

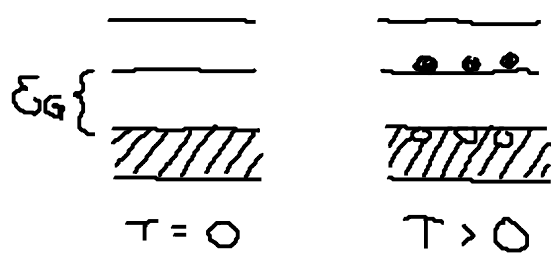
$$f(E) = 1/(e^{(E-\mu)/k_B T} + 1)$$

Dette gir oss:



Figur 3: (Støvnengs notater: 2002-03)

I en halvleder vil energigapet mellom valensbåndet, det øverste helt fylte energibåndet, og ledningsbåndet, energibåndet over valensbåndet, typisk være på 1eV eller mindre. Det vil si at det ved for eksempel romtemperatur vil være en betydelig andel elektroner i ledningsbåndet, og dertil manglende elektroner i valensbåndet. De mest vanlige halvlederne er silisium med et energigap på 1.14eV og germanium med 0.67eV.



Figur 4: Dette viser de to øverste energibåndene til en halvleder ved temperatur lik 0 og en ikke spesifisert høyere temperatur. e_G står for energigap. Ved $T > 0$ har man fått noen elektroner i ledningsbåndet som har overvunnet båndgapet, og en ser **hullene** til disse i valensbåndet. Setter man på en elektrisk spenning, vil man få en elektrisk strøm.

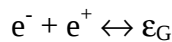
4.3. Hull.

Hull kan være ladningsbærere på samme måte som elektroner. Hull har da ladning $+e$, mens elektroner har ladning $-e$. Dermed vil vi få bidrag til den elektriske strømmen både i ledningsbåndet og i valensbåndet. Egentlig er det ikke hullene som beveger seg. Det er elektronene i valensbåndet som benytter anledningen til fortløpende å skifte tilstander. De hopper inn i en ledig tilstand, som er forlatt av et elektron på vei opp i ledningsbåndet, og etterlater sin egen tilstand åpen. Dermed flytter hullet seg bortover i båndet, og vi får en elektrisk strøm. En kjent analogi i så måte er boblene i et champagneglass. Alt etter som man

ser det, kan det være boblene som stiger eller vinen som faller ned i gasslommen. Sånn kan man filosofere en sen fredagskveld (Alonso og Finn: -92).

.

Et elektron i ledningsbåndet kan finne på å hoppe ned igjen til valensbåndet og dermed fylle opp et hull. Dette blir kalt rekombinasjon (eng: "recombination"). Vi kan da skrive opp den kjemiske reaksjonslikningen, der e^- er elektroner og e^+ er hull:



Når e_G kommer fra vibrasjonene til atomgitteret (termisk energi), ser en at med økende temperatur vil likningen forskyves mot venstre. Da vil man få flere ladningsbærere og en bedre ledningsevne.

Når vi skal regne på konsentrasjonen av elektroner, n , i ledningsbåndet og hull, p , i valensbåndet, har vi den såkalte halvlederlikningen:

$$np = CT^3 e^{(-e_G/k_B T)}$$

Det vil si at $np = \text{konstant}$ for gitt T . Ligningen kommer av at et lite system (her: elektronet) kan få en termisk energi e_G fra et større system (her: krystallen) i en rate av $\exp(-e_G/k_B T)$.

Konstanten C avhenger av halvledermaterialet. I en ren (eng: "pure") halvleder, altså at krystallen ikke er forurenset av andre stoffer, er $n=p$. Dette gir:

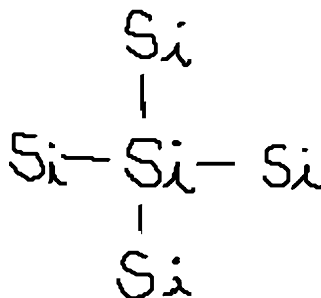
$$n_i = C^{1/2} T^{3/2} e^{(-e_G/2k_B T)}$$

Denne typen halvleder blir også kalt en intrinsikk (eng: "intrinsic") halvleder.

(Karlheinz Seeger: 1997)

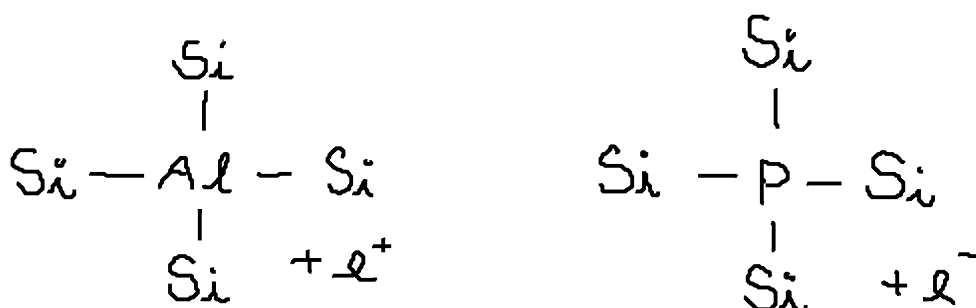
4.4. Doping.

I motsetning til rene halvledere kan vi også ha **doped** halvledere. I en silisiumkrystall har hvert atom fire valenselektroner som binder atomet sammen med fire andre silisiumatomer i en kjemisk enkeltbinding:



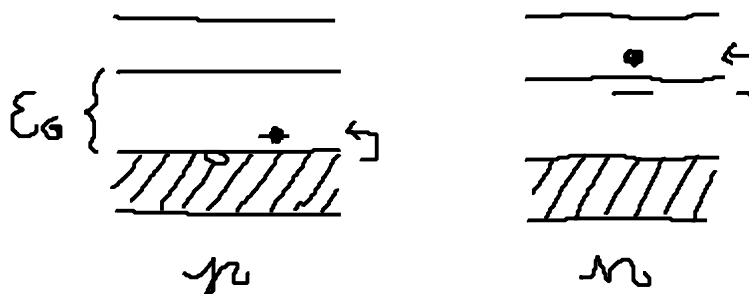
Figur 5: En bitteliten del av en silisiumkrystall i 2 dimensjoner.

Hvis vi tilsetter litt doping, for eksempel fosfor, som har fem valenselektroner vil elektronet i overskudd ligge i et energinivå tett opp til ledningsbåndet. Dette elektronet vil lett eksiteres og kan da bidra som en ladningsbærer i en elektrisk strøm. Resultatet er en n-type halvleder (n for negativ). Tilsetter vi for eksempel aluminium med bare tre valenselektroner vil det bli et elektron i manko i valensbåndet som gjør at vi får et hull. Det som skjer er at vi får en lovlig elektrontilstand med energi rett over valensbåndet, som et elektron kan eksiteres opp i. Det etterlater da et hull. Da får vi en p-halvleder (p for positiv).



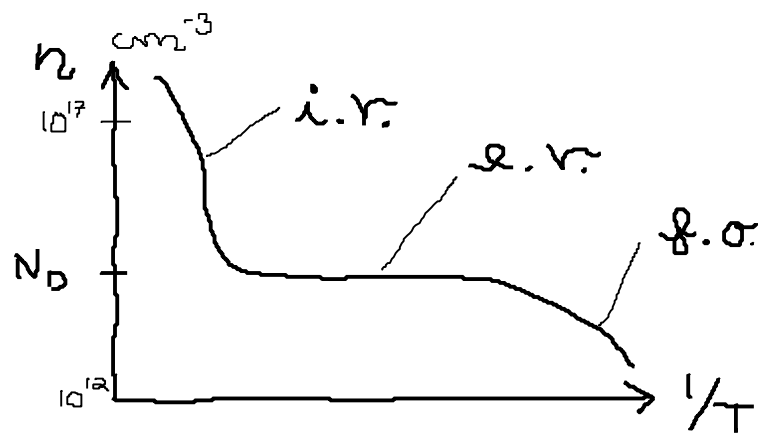
Figur 6: Dopede halvledere. Henholdsvis en p-type og en n-type.

(Støvnengs notater: 2002-03)



Figur 7: Valensbåndet og ledningsbåndet til henholdsvis p-type –og n-type halvleder. Legg merke til de lovlige tilstandene i energigapet, som gjør at vi kan drive en strøm gjennom materialet. (Alonso og Finn: -92)

Altså for hvert donatoratom (stoff som genererer et elektron, for eksempel fosfor) får vi ett elektron i ledningsbåndet. Skal dopingen ha en viss effekt må antallet donatoratom være større enn antall elektroner som er i ledningsbåndet fra før. Dette tallet er ett elektron per ca. 10^{13} atomer eller et forhold på ca. 10^{-13} . Typiske nivåer for å dope silisium er mellom 10^{-10} og 10^{-6} donatoratom i forhold til silisiumatomer. Det samme gjelder hvis vi tilsetter akseptoratom (aluminium). Det vil si at vi lager en p-type halvleder.

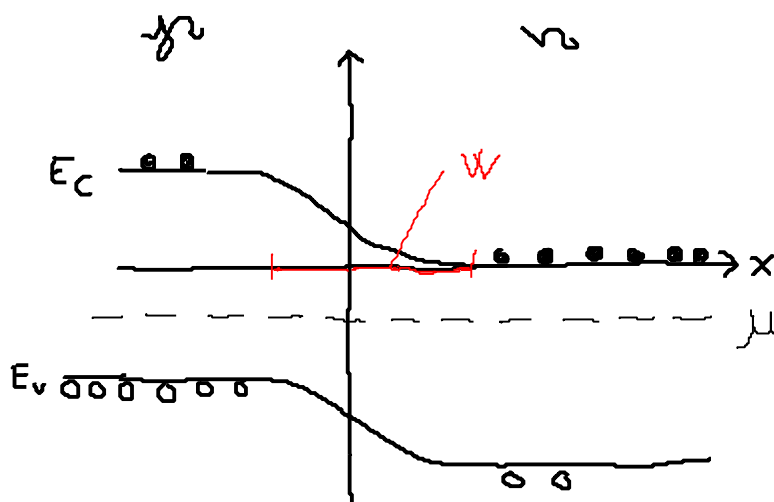


Figur 8: Kurven viser konsentrasjonen av elektroner i ledningsbåndet som funksjon av invers temperatur. Halvlederen er dopet med en konsentrasjon $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ donoratom. De forskjellige områdene håpløst initiert på figuren står for henholdsvis "intrinsic range", "extrinsic range" og "freeze out". For $T=300 \text{ K}$ er man godt innenfor "extrinsic range". Kurven i "intrinsic range" stiger som $\exp(-e_g / 2k_B T)$ og vil være brattere enn kurven i "freeze out"-sonen (Karlheinz Seeger: 1997).

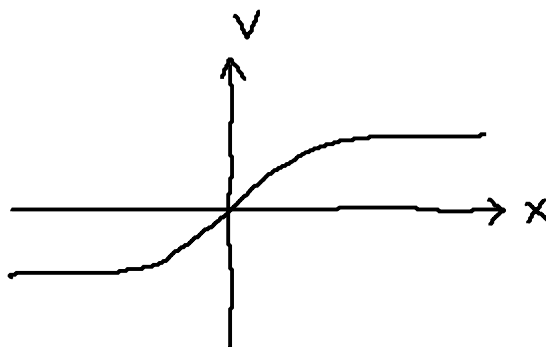
4.5. p-n overgang.

Setter man en p-type og en n-type halvleder inntil hverandre får vi en p-n overgang eller en diode. Dette er en sak som ofte er brukt i moderne elektronikk, som en del av en elektrisk krets. Derav navnet Silicon Valley i USA.

Når to prøver av en halvleder, den ene en p-type og den andre n-type, kommer i kontakt med hverandre vil det være en diffusjon av ladninger i overgangen. Det vil være en strøm av elektroner fra n-typen til p-typen og en strøm av hull fra p-typen til n-typen. I utgangspunktet er de to prøvene i elektrostatisk likevekt. Det vil si at det var like mange elektroner som protoner i prøvene. Etter diffunderingen vil det være flere elektroner enn protoner i p-typen, og vice versa for n-typen. Dette skaper et elektrisk felt som utligner diffusjonen og vi vil få en likevekt igjen (Alonso og Finn: -92). Nettoladningen vil være ulik null bare på et lite område nær kontaktflaten. Dette området blir kalt sperresonen, W , og er fra 100 til 10000 Å ($\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$). I sperresonen er konsentrasjonen av elektroner i ledningsbåndet og hull i valensbåndet praktisk talt lik null. Utenom sperresonen vil forholdene være som før, i det ment at konsentrasjonene av elektroner og hull er den samme som i de opprinnelige prøvene (Støvnengs notater: 2002-03).

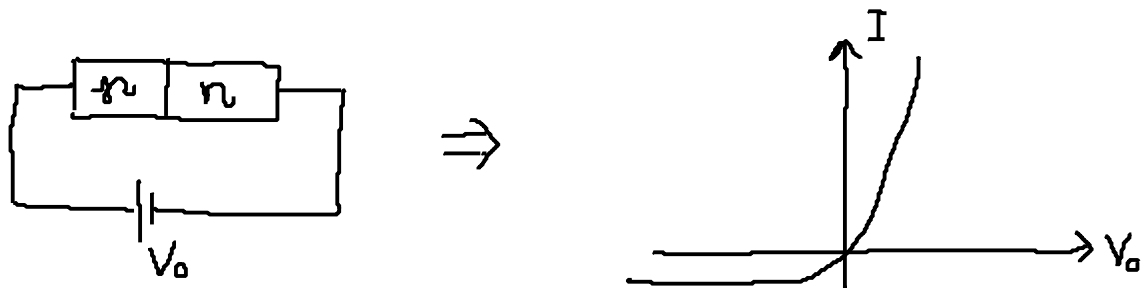


Figur 9: Dette viser energibåndene til en p-n overgang. E_c er energien til ledningsbåndet og E_v er energien til valensbåndet. Det røde viser sperresonen. Dette systemet er i likevekt, og da er det kjemiske potensialet konstant. Nettoflyten av elektroner og hull vil være lik null. Det elektriske feltet som blir skapt i sperresonen gjør at potensialet på n-siden er høyere enn på p-siden. Det vil si at et tenkt hull vil "falle" fra n-siden til p-siden, men fra figuren vil en se at konsentrasjonen av hull på venstresiden er mye større enn på høyresiden, og vi får en likevekt på grunn av diffusjon (Støvnengs notater 2002-03).



Figur 10: Potensialet det var snakk om i figurtekst 9.

Med en ytre påtrykt spenning vil potensialforskjellen mellom p –og n-type, vist i figur 10, bli enten større eller mindre. Det gir oss en situasjon der den ene retningen fører til en strøm gjennom halvlederen, mens den andre retningen gjør halvlederen praktisk talt til en isolator. (Alonso og Finn: -92)



Figur 11: Tegningene viser en krets med en pn-overgang og en påtrykt spenning, og resultatet, en kurve som viser strøm som funksjon av påtrykt spenning.

En kan vise at funksjonen for strøm gjennom kretsen er gitt ved (ideell pn-diode strøm):

$$I(V_0) = I_0 (\exp(eV_0 / k_B T) - 1)$$

En slik single pn-overgang blir kalt en diode eller en likeretter. Det vil si at den kan gjøre vekselstrøm om til likestrøm, som sikkert er nyttig i mange sammenhenger (Støvnengs notater: 2002-03).

Hvis man setter sammen en pnp-halvleder eller en npn-halvleder får man en transistor (=transfer resistor). Dette vil jeg ikke gå nærmere inn på.

5. Solceller, teori.

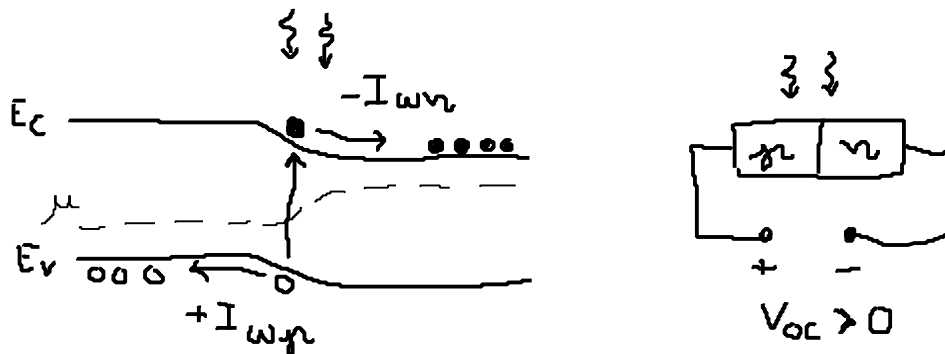
Det første man må ha klart for seg skal man forstå fysikken i en solcelle er den fotoelektriske effekt. Den bygger på konseptet fotoner. Det er to måter å se lys på: som en bølge eller som en partikkel. Et foton er et energikvant, uten masse, der energien er gitt av frekvensen.

Fotonet har konstant fart lik $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Et elektron som er bundet til et metall kan absorbere et foton og hoppe opp i en høyere energitilstand eller det kan ioniseres helt. Da vil energien til fotonet minus bindingsenergien til elektronet utgjøre den kinetiske energien til elektronet. Skal elektronet hoppe til en ny energitilstand må energien til fotonet tilsvare eksakt forskjellen i energi mellom den opprinnelige tilstanden og den nye (for eksempel fra en tilstand i valensbåndet til en tilstand i ledningsbåndet).

For å tenke oss en solcelle begynner vi med en pn-overgang i likevekt. Se figur 9 og 10.

Deretter lar vi fotoner komme inn i sperresonen W . Fotonene må selvsagt ha større energi enn energigapet. Nå vil elektroner bli eksitert fra valensbåndet til ledningsbåndet. Utenom sperresonen vil ikke lyset ha noen virkning, fordi elektronene vil rekombinere i samme takt

som de blir eksitert. De nylig eksiterte elektronene i ledningsbåndet og hullene i valensbåndet vil skape en strøm fra n-typen mot p-typen:



Figur 12: Energienivåene i en pn-overgang med innkommende lys. Dette skaper en strøm $I_w = I_{wn} + I_{wp}$, som er avhengig av lysintensitet. Også en netto spenning V_{oc} blir generert.

(Støvnengs notater: 2002-03).

Ved stasjonære forhold, altså en åpen krets, er nettostrømmen lik null. Det vil si at tallverdien til I_w er lik tallverdien til den ideelle pn-diode-strømmen med spenningen over overgangen lik V_{oc} :

$$I_w = I_0(\exp(eV_{oc}/k_B T) - 1)$$

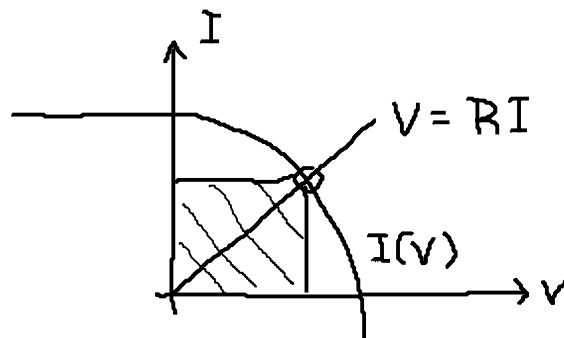
Det fører til at:

$$V_{oc} = (k_B T/e) \ln(1 + (I_w / I_0)) \approx (k_B T/e) \ln(I_w / I_0)$$

Generelt har vi at:

$$I(V) = I_w - I_0(\exp(eV/k_B T) - 1)$$

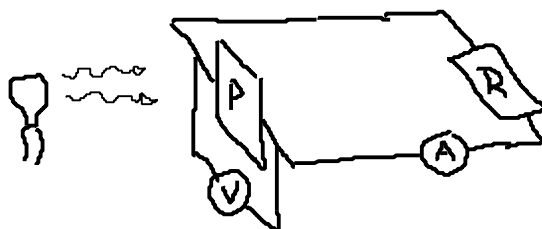
Setter vi nå sammen en krets med ei lyspære(motstand) og denne dioden, vil det lyse fint.



Figur 13: Kurven viser strømmen gjennom en krets, med motstand R, som funksjon av spenningen. Den krysser I-aksen for $I = I_w$ og V-aksen for $V = V_{oc}$. Det skraverte området tilsvarer effekten, $P = V \cdot I$. (Støvnengs notater: 2002-03)

6. Eksperimentet.

Jeg gjorde et lite eksperiment for sjekke om teorien rundt solcellepanel stemmer, og var essensielt ute etter den samme kurven som i figur 13. Jeg laget meg en elektrisk krets med et solcellepanel, en motstand R, et amperemeter og et voltmeter som målte spenningen over solcellepanelet. Panelet ble belyst med konstant intensitet, mens jeg varierte motstanden for å finne maks effekt. Jeg tok to måleserier. Den første med 7 volts spenning på 50 Watts lampa, og den neste med 12 volts spenning på den samme lampa.



Figur 14: Tegningen viser en prinsippskisse av kretsen. Der P står for solcelle-panelet.

Resultatet av eksperimentet er i vedlegget, men jeg kan røpe at det ble akkurat som forventet. Med det mener jeg å si at jeg fikk en kurve som lignet figur 13 med den første måleserien. Brukte dataene til å regne ut effekten, og fant verdien for R som ga størst effekt. Alt dette i tråd med teorien som er beskrevet over.

Måleserie to var det verre med. Der var spenningen over lyskilden på 12 volt og det ble målt en sterkere strøm i kretsen. Dette gjorde at det lille som var av motstand i ledningene hindret meg i å få "se toppen" av kurven, som skulle ligne på kurven i figur 13, på samme måte som med den første måleserien.

7. Konklusjon/Oppsummering.

Solceller blir en del av fremtiden vår. Det er 100 % sikkert. Spørsmålet er i hvor stor grad solceller kan hjelpe oss i å produsere livsviktig energi. Teknologien er for øyeblikket ikke god nok til annet enn at vi klarer å tilføre elektrisk energi til våre mørke hytter med den. Pluss at en satellitt eller to skaffer seg den energien den trenger til å funksjonere ute i det store intet.

De underliggende prinsippene som ligger til grunn solcellene er ikke umulige å forstå, selv for en legmann, og da er det håp. De store firmaene har fattet interesse for denne grenen av fysikken, og da får man tro at utviklingen skyter fart. Det hjelper også at opinionen presser på for å gjøre energiproduksjonen generelt mer miljøvennlig.

8. Kildehenvisninger.

- Hagen, Georg: "Kan solceller bli et norsk eksportprodukt?",
http://www.ntnu.no/satsingsomraader/energi_miljo/dokumenter/solceller_GeorgHagen.pdf
- Seeger, Karlheinz (1997): "Semiconductor Physics, an Introduction", Berlin: Springer-Verlag, s. 1-20, 128-130, 156-159.
- Alonso, Marcelo og Finn, Edward J. (1992): "Physics", England: Addison Westley Ltd, s.608-621, 820-821.
- Støvneng (2002-03): Forelesningsnotater,
<http://bohr.phys.ntnu.no/~stovneng/MNFFY103/mnffy103.htm>
- Lillestøl, Egil, Hunderi, Ola og Lien, Jan R. (2001): "Generell Fysikk, bind 2", Oslo: Universitetsforlaget, s. 194-195, 295-299.

Vedlegg til prosjektoppgave.

Resultatene til eksperimentet:

Måleserie nr. 1

Motstand(ohm)	Strøm(mA)	Spenning(mV)	Effekt (μ Watt)
0	200	88	17600
1	180	252	45360
2	140	348	48720
3	115	392	45080
4	94	414	38916
5	79	426	33654
7	59	438	25842
9	48	445	21360
10	43	447	19221

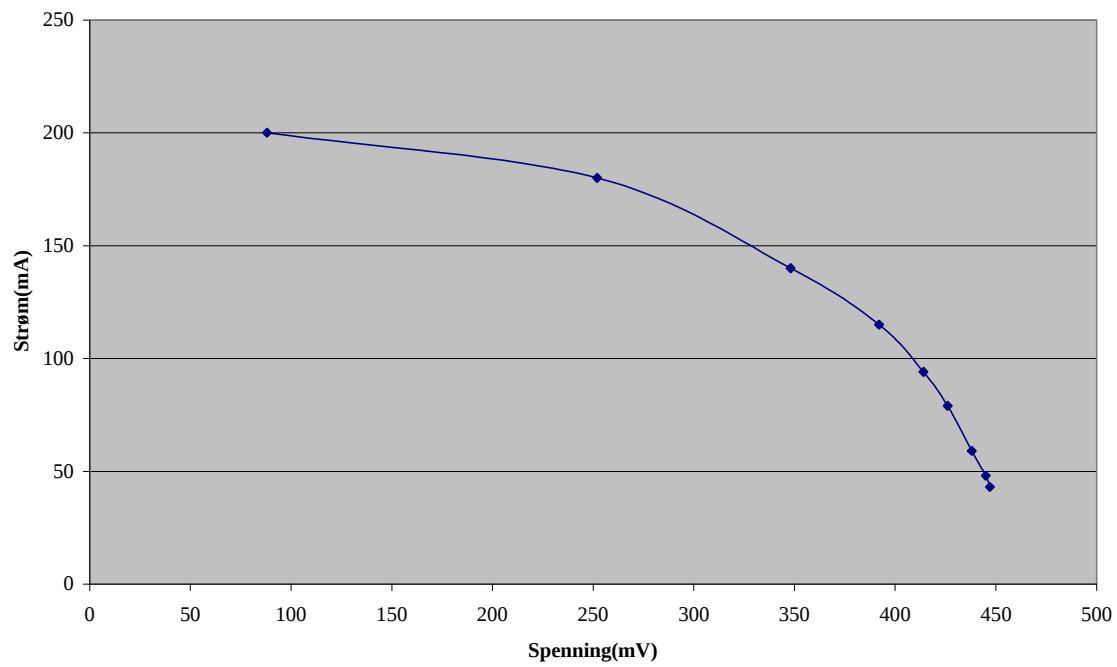
Måleserie nr.

2

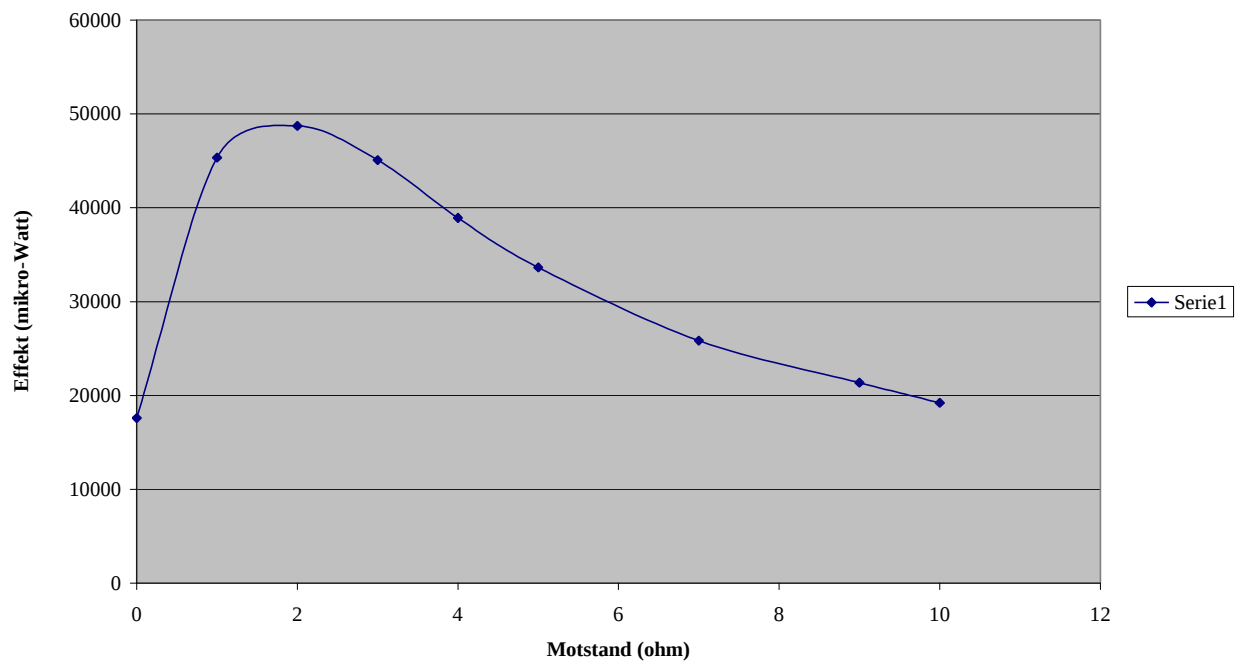
Motstand (ohm)	Strøm(mA)	Spenning(mV)	Effekt (μ Watt)
0	755	357	269535
1	337	482	162434
2	206	498	102588
3	148	504	74592
4	115	507	58305
5	94	508	47752
7	69	510	35190
9	55	511	28105
10	49	511	25039

Tabell 1 og 2: Dette er måleresultatene.

Strøm/spennings-karakteristikk for måleserie nr. 1.



Effekt (mikro-Watt), måleserie 1.



Strøm/spennings-karakteristikker, for både måleserie 1 (blå) og 2 (rosa).

