

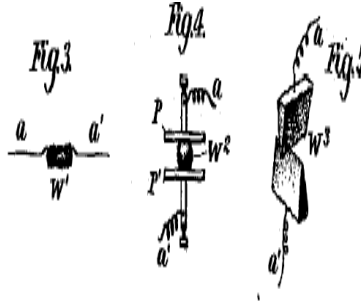
Dioder

Astrid-Sofie Vardøy, Christina Aas, Audun Eskeland Rimhaug og Are Opstad Sæbø¹
Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim, Norge

14.11.05

¹Prosjekt i FY1013 Elektrisitet og Magnetisme 2

Sammendrag Dioder er i sin enkleste form et kretselement som bare leder strøm en vei. Denne egenskapen er svært nyttig i flere sammenhenger, og benyttes i dag i stor grad i pc, radio, tv, laser og mye mye mer. I denne oppgaven ser vi på dagens virkemåter og hvordan en ser for seg at diodene kommer til å bli brukt i fremtiden. Samtidig tar vi for oss hvordan forskjellige dioder fungerer, og ser på hvordan energibåndstrukturen i forskjellige metaller og halvledere kan føre til denne nyttige diodeeffekten. Oppgaven inneholder i tillegg et praktisk forsøk der vi tar for oss det historiske aspektet ved dioden. Vi prøvde å lage en diode av helt enkle gjenstander som minner om de aller første diodene.



Figur 1: Diverse patenter på historiens første dioder

Kapittel 1

Innledning

I 1874 ble det oppdaget at kontakt mellom noen metallsulfider og spisse metallgjenstander gav forskjellig motstand avhengig av hvilken polaritet den påtrykte spenningen hadde. Slike kretselementer er historiens første eksempler på bruk av dioder, og ble brukt i radioer og likerettere. Disse krystallene var imidlertid både inkonsekvente og uforutsigbare så etter hvert foretrakk en å benytte vakumtuber (radiatorer). Vi vil prøve å lage en krystall (diode) av et barberblad og et blyantbly etter en oppskrift funnet på internett(27). Først etter at Russell Ohl i 1939 oppdaget hva som fikk krystaller til å virke ble det åpnet for en storstilt industri. I dag finner man pn-dioder i alle sammenhenger. De blir brukt som likeretterer og pn-overgangen kan virke som lysemitterende dioder og solceller (fotodioder). Kobler man sammen to dioder kan man få en transistor. Her går vi inn på teorien bak halvledere, doping, pn overganger, metall-halvleder overganger og punktdioder. Deretter beskriver vi de viktigste bruksområdene for dioder i dag og i nærmeste fremtid.

Kapittel 2

Teori

2.1 Metall, halvledere og isolatorer

En halvleder er et materiale som forenklet sagt verken har god ledningsevne eller isolasjonsevne. Atomer med flere elektroner vil fordele disse på flere energinivåer. I de høyere energinivåene er det også flere forskjellige energitilstander, og energinivået kan da refereres til som et energibånd. I hver energitilstand kan det maksimalt være to elektroner, en for hver spinn-tilstand. Dette er kjent som Paulis eksklusjonsprinsipp. Det høyeste energinivået hvor det befinner seg elektroner kalles gjerne valensbåndet, og energien til dette båndet er kjent som Fermienergien. I ledere er dette nivået ikke fylt helt opp, slik at elektroner kan bevege seg fra det ene atomets valensbånd til det neste atomets valensbånd. I isolatorer og halvledere er derimot valensbåndet ved absolutt temperatur null grader Kelvin fylt helt opp (3). For å lede strøm må disse da få elektroner opp i et høyere bånd. Dette båndet blir da et ledningsbånd, og definisjonen av Fermienergien mister litt av sin verdi, siden vi nå ikke lenger har helt kontroll på hvor hvert enkelt atom har sine mest energirike elektroner. Energiavstanden fra ytterste kant av valensbånd til innerste kant av ledningsbåndet kalles gjerne båndgapet mellom disse to. Siden energitilstandene mellom båndene er forbudte, kan ikke denne energinivåøkningen skje gradvis. Derimot må elektroner som skal opp i ledningsbåndet få tilført all energien på en gang, slik at de kan hoppe opp i båndet over (3). Denne energien kan tilføres for eksempel ved å varme opp materialet, utsette det for et elektrisk felt eller ved å bombardere stoffet med fotoner. Og her kommer forskjellen på isolatorer og halvledere inn. Isolatorer har et båndgap som er for stort til at vi kan oppnå dette for et betydelig antall elektroner. Halvledere har et mindre båndgap, slik at vi lettere kan få elektroner opp i ledningsbåndet, og gjøre materialet i stand til å lede strøm. I tillegg til at elektronene i ledningsbåndet fungerer som negative ladningsbærere, vil det også bli hull i valensbåndet der disse elektronene var. Hullene kan så fungere som positive ladningsbærere som går motsatt vei, og fremmer ledningsevnen ytterligere.

2.1.1 Forskjeller mellom halvledere og ledere

Det er et par viktige forskjeller mellom halvledere og ledere i måten de reagerer på eksterne påvirkninger. Ledere vil generelt få redusert ledningsevnen med økende temperatur. Dette kan klassisk forklares med at atomenes økte translasjonsenergi gjør det vanskeligere for elektronene å bevege seg fra atom til atom. I halvledere vil imidlertid den økte termiske energien føre til at flere elektroner får nok energi til å komme seg over i ledningsbåndet, og ledningsevnen vil dermed øke.

Et elektrisk felt vil ha samme effekt. Elektronene får mer energi, og det blir flere av dem i ledningsbåndet.

2.2 Doping av halvledere

N- og p-halvledere er halvledere med overskudd av henholdsvis negativ og positiv ladning. Dette oppnås ved en prosess kalt doping, hvor halvlederen tilsettes urenheter i form av små mengder av et annet stoff. For å oppnå n-halvledere vil vi bruke tilsetningsstoffer som har flere valenselektroner enn halvlederstoffet vi starter med. Har halvlederen vår fire valenselektroner, som for eksempel silisium har, vil det egne seg bra å dope den med et stoff fra gruppe V. Stoffene i gruppe V har fem valenselektroner, hvorav fire i hvert atom vil brukes til å inngå kovalente bindinger med halvlederatomene rundt seg. Det femte vil da bli løsere bundet til donoratomet (2), og refereres gjerne til som donorelektronet. Ved lave temperaturer vil selvfølgelig donorelektronet forbli bundet til donoratomet. Men energien som kreves for å få donorelektronet opp i ledningsbåndet er vesentlig lavere enn for elektronene i halvlederen. Ved en liten tilførsel av energi, for eksempel ved en temperaturøkning, vil derfor donorelektronet frigjøres tidlig, og etterlate donoratomet som et positivt ion. Donorelektronet kan nå bevege seg fritt rundt i halvlederen, og bidra til å lede strøm. Donoratomet, som nå er et ion, vil forbli fiksert i halvlederen, men har ikke skapt noen huller i valensbåndet. Materialet vi nå står igjen med, er en n-halvleder.

Hvis en nå i stedet tilsatte et atom fra gruppe III til den samme halvlederen, ville det motsatte skje. Et gruppe III-atom har tre valenselektroner, hvor alle tre i hvert atom vil inngå i kovalente bindinger. Det er allikevel ett for lite i forhold til halvlederatomene, og det blir skapt et hull i halvlederens valensbånd. Et slikt tilsatt atom blir da nødt til å ta imot elektroner, og refereres derfor gjerne til som et akseptoratom (3). Ved en energibetraktning kan vi si at hvis et elektron skulle oppta dette hullet, måtte det hatt en høyere energi enn den valenselektronene har, siden donoratomet netto energi nå ville vært negativ (2). Elektronet i hullet har imidlertid ikke tilstrekkelig energi til å være i ledningsbåndet, så dette kan ikke være tilfellet. Dermed har vi et hull i valensbåndet som kan bevege seg rundt i halvlederen og fungere som en positiv ladningsbærer, forutsatt at elektronene i halvlederen har nok energi til å bevege seg rundt i valensbåndet. Dette blir som en slags boble-i-vann-effekt, en analogi flere læreverker benytter. Hullet fungerer som en positiv ladningsbærer ved at det forflyttes når elektroner ved siden av glir over i hullet. Tilsvarende vil en boble i vann bevege seg ved at boblen fylles med vann, og dermed tvinges videre. Det nå negativt ladde akseptoratomet vil imidlertid forbli i ro. I sum har akseptoratomet generert et hull i valensbåndet uten å gi et elektron til ledningsbåndet, og materialet vi står igjen med er en p-halvleder.

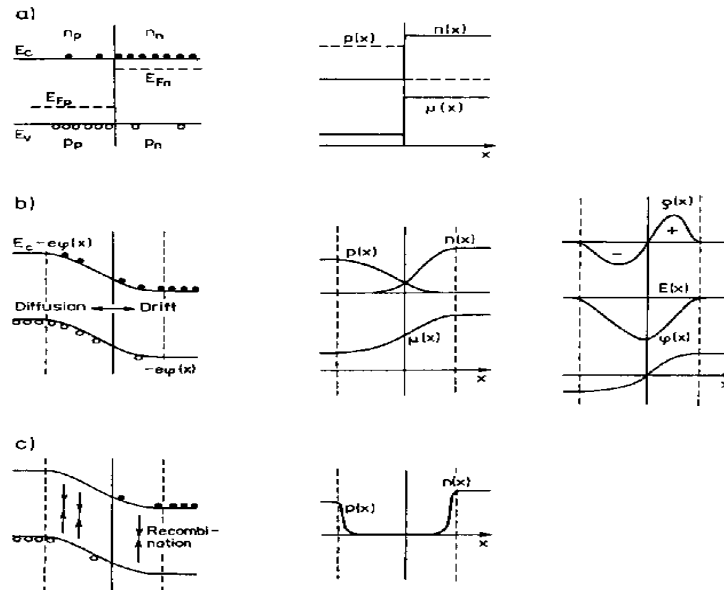
For at doping skal ha noen betydelig effekt, må antallet elektroner fra donoratomer i n-halvledere eller antallet hull fra akseptoratomer i p-halvledere, være betydelig større enn det halvlederen selv bidrar med. Eksempelvis vil en silisiumhalvleder ved romtemperatur ha ett elektron i ledningsbåndet per 10^{13} atomer. Silisium dopes derfor gjerne med ett donoratom per 10^6 til 10^{10} silisiumatom for å få en brukbar n-halvleder (3).

2.3 pn-overgang

Når vi så setter sammen en n-halvleder med en p-halvleder, får vi det vi kaller en pn-overgang. Nivået av doping på n-delen i forhold til p-delen angis som overgangens dopingprofil. Denne dopingprofilen har stor betydning for overgangens egenskaper, og forskjellige dopingprofiler anvendes derfor

til forskjellige formål. Den enkleste formen å beskrive er imidlertid den uniformt dopede overgangen; hvor p-delen har like mange hull per halvlederatom som n-delen har frie donorelektroner.

pn-overgangen består da altså av en del med akseptoratomer, og en del med donoratomer. Selve grensesnittet mellom disse to delene refereres gjerne til som den metallurgiske overgangen eller grenseflaten (3). For enkelhets skyld beskriver vi her en overgang hvor dopingkonsentrasjonen er uniform i hver halvdel, og hele overgangen mellom p- og n-delen finner sted i grenseflaten, i stedet for å se på en gradvis overgang. I det de to delene settes sammen har vi en stor tetthetsgradient på tvers av overgangen både for hull og elektroner. Dette vil da føre til at elektroner vil begynne å diffundere fra n-delen over i p-delen (1), og hullene vil begynne å diffundere motsatt vei. Forutsatt at det ikke er koblet noen spenningskilde til pn-overgangen, vil denne diffusjonen etter hvert opphøre. Dette fordi elektroner som diffunderer inn i p-delen etterlater seg positivt ladde donoratomer i n-delen, og på samme måte vil hullene som diffunderer inn i n-delen etterlate seg negativt ladde akseptoratomer i p-delen. Resultatet blir en region med netto positiv ladning i n-delen, og en region med netto negativ ladning i p-delen. Disse to regionene sammen refereres gjerne til som romladningsregionen (1). Her får vi et induisert elektrisk felt perpendikulært på grenseflaten som har retning fra n-delen til p-delen. I romladningsregionen står vi til slutt igjen med praktisk talt ingen hull eller donorelektroner. Det vil fortsatt være en tetthetsgradient i grensesnittene mellom p-delen og romladningsregionen, og mellom n-delen og romladningsregionen, men diffusjonskreftene vil motvirkes av det elektriske feltet. I termisk likevekt vil kraften fra det elektriske feltet og diffusjonskreftene akkurat utligne hverandre (1), og vi får en stasjonær tilstand. Hele denne prosessen er fremstilt i figur 2.1

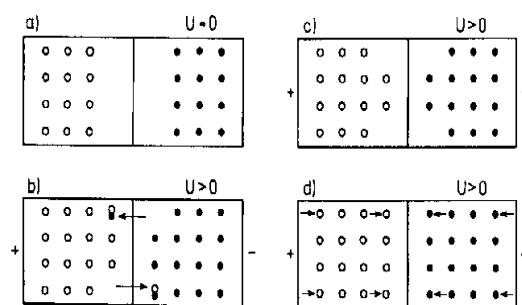


Figur 2.1: pn-overgangen går fra å ha en betydelig potensialforskjell i a), til likevekt i c) via b). Figur hentet fra (1)

2.3.1 Positiv bias

Hvis vi nå utsetter en pn-overgang for et eksternt potensiale, kan vi igjen få en forflytning av ladninger. Kobles denne spenningen slik at plusspolen på spenningskilden går til p-delen av dioden, og minuspolen går til n-delen, vil både hullene og donorelektronene bringes nærmere grensesnittet. Den totale potensialforskjellen mellom de to delene vil da reduseres fra $|V_0|$ til $|V_0| - |V|$, hvor V_0 er den opprinnelige potensialforskjellen, og V er verdien av den påtrykte spenningen (4). Dette gjør at elektronene som går fra n-delen til p-delen og hullene som går motsatt vei, alle får en lavere potensialbarriere å passere. Potensialet for elektronene og hullene har naturligvis motsatt fortegn, men det har også ladningene, og de må derfor begge overvinne den samme barrieren (4). Etter hvert som V øker, øker også diffusjonen, og vi får en strøm gjennom dioden fra p-delen til n-delen. Det er imidlertid fortsatt en svak strøm fra n-delen til p-delen av de hullene og elektronene som ikke har en potensialbarriere å overvinne, men når V blir sterk nok går netto strøm fra p til n.

Denne typen overgang refereres vanligvis til som positiv bias eller foroverbias.



Figur 2.2: Strøm i en positiv bias. Høyre side av hver figur er n-delen, venstre side er p-delen. Ved a) er pn-overgangen i likevekt uten noen spenningskilde koblet til. Området rundt grenseflaten er evakuert for hull og elektroner. Bilde b) illustrerer hvordan elektronene og hullene diffunderer på tvers av grenseflaten, c) viser situasjonen etter, mens atomene nærmest grenseflaten etterfylles i d). Figur hentet fra (1).

2.3.2 Negativ bias

Kobler vi nå spenningskilden i motsatt retning, altså med plusspolen på n-delen og minuspolen på p-delen, vil vi få stikk motsatt effekt.

Potensialforskjellen på tvers av grenseflaten øker fra $|V_0|$ til $|V_0| + |V|$ (4). Både elektronene fra n-delen og hullene fra p-delen får dermed en enda høyere barriere å passere, og strømmen blir tilnærmet lik null. Den svake strømmen fra n-delen til p-delen nevnt over vil riktignok fortsette, upåvirket av den eksterne spenningskilden (4), men i praktisk betydning har vi ingen strøm. Denne typen oppkobling kalles en negativ bias eller en bakoverbias. En enda mer kvalitativ beskrivelse vil være at plusspolen på spenningskilden trekker elektronene i n-delen bort fra grensesnittet, og tilsvarende vil minuspolen trekke hullene i p-delen i motsatt retning. Siden n-delen selv ikke kan være kilde til huller, og p-materialet ikke kan gi elektroner (3), vil det ikke være noen huller og elektroner som møtes i grenseflaten, og vi får ingen strøm.

2.3.3 Strøm gjennom en ideell pn-overgang

I et metall vil elektrontettheten være gitt av Fermi-Dirac-fordelingen (2)

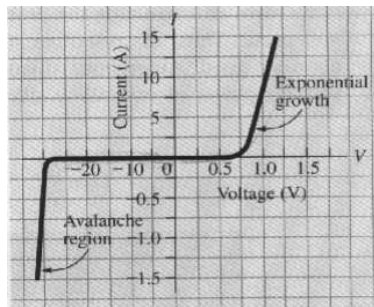
$$f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.1)$$

hvor k_B er Boltzmanns konstant og T er temperaturen. Dette er altså en sannsynlighetsfordeling som gir oss sannsynligheten for å finne et elektron med energien E ved en gitt fermienergi og temperatur. Når $E - E_F \gg k_B T$ kan ligning 2.1 tilnærmes med Boltzmannfordelingen

$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_B T}\right). \quad (2.2)$$

Vi ser at antall elektroner i en energitilstand avtar eksponensielt med energien. Når det settes på en negativ spenning på n-siden vil fermienergien øke, og antall elektroner som har tilstrekkelig energi til å strømme over til p-siden, vil øke eksponensielt.

Ved negativ bias vil fermienergien på n-siden bli lavere enn på p-siden. Hvis det skal gå strøm i dette tilfellet må elektronet på p-siden ha en energi som gjør at det kan passere barrieren. I følge ligning 2.2 vil det alltid være en liten sannsynlighet for å finne elektroner med tilstrekkelig energi til å strømme over barrieren. Denne sannsynligheten vil ikke forandre seg hvis vi øker den påtrykte spenningen. Derfor vil vi alltid ha en liten strøm ved negativ bias. Enten ved sterk doping av p- og n-siden eller stor nok negativ bias, vil det likevel kunne strømme elektroner fra p- til n-siden som ikke har nok energi til å komme over barrieren. Dette kan forklares ved tunnelering av elektroner gjennom den nå smale barrieren. Tunneleringssannsynligheten er sterkt avhengig av bredden på barrieren. Derfor vil man få en sterk økning av strømmen ved en liten økning av den påtrykte spenningen, etter at tunnelering først har oppstått. Ved denne spenningen sier vi at dioden kollapser. Strøm som funksjon av spenning for en ideell diode er fremstilt i figur 2.3.



Figur 2.3: Strøm s.f.a spenning for en ideell pn-diode

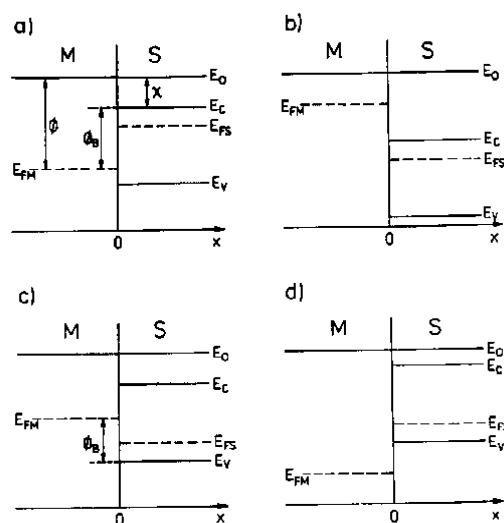
2.4 Metall-halvlederoverganger

Metall-halvlederoverganger blir laget ved oppvarming av metall til damp som deretter kondenserer på den kaldere halvlederoverflaten. Motstanden i slike kontakter er avhengig av polariteten på den påtrykte spenningen, noe som gjør at også disse kontaktene kan virke som en diode. Barrieren på grenseflaten mellom metallet og halvlederen kalles ofte en Schottky-barriere, og dioder basert på en slik overgang kalles derfor for en Schottky-diode.

2.4.1 Flatekontakt

Med flate kontakter menes det her at det er kontakt mellom metallet og halvlederen over en hel flate, ikke bare i et punkt.

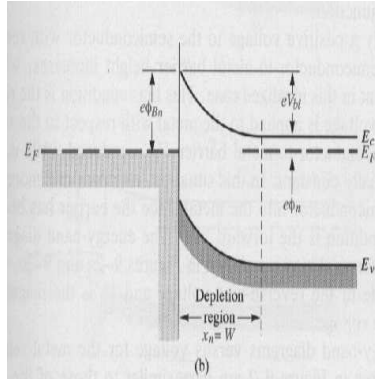
På figur 2.4 ser vi en oversikt over energinivåene i en metall-halvlederovergang *før* likevekten har



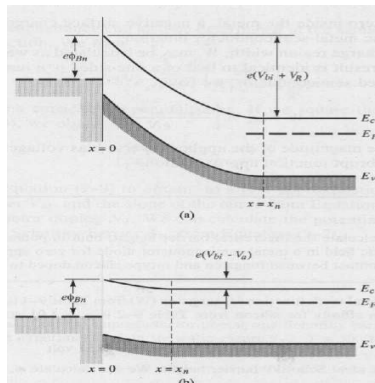
Figur 2.4: (a) Energinivåene i et metall med fermienergi E_{Fm} ligger under fermienergien E_{Fc} i en n-dopet halvleder før likevekt. $E_{Fm} < E_{Fc}$ (b) N-dopet halvleder og $E_{Fm} > E_{Fc}$ c) P-dopet halvleder og $E_{Fm} > E_{Fc}$ d) P-dopet halvleder og $E_{Fm} > E_{Fc}$. Figuren er hentet fra (1)

innstilt seg. De fire forskjellige mulighetene er å sette sammen en n-dopet halvleder med et metall med $E_{Fm} < E_{Fc}$ eller $E_{Fm} > E_{Fc}$. Her er fermienergien i metallet, E_{Fm} , energien til det høyeste energinivået som er okkupert i metallet (vi forutsetter altså null temperatur), og E_{Fc} er fermienergien til halvlederen. I tillegg kan vi sette sammen en p-dopet halvleder med et metall med $E_{Fm} < E_{Fc}$ eller $E_{Fm} > E_{Fc}$. Hvis en setter sammen et metall og en lavt- til moderat dopet halvleder, kan en få en barriere inne i metallet som på mange måter minner om den barrieren som oppstår i en pn-diode. Hvis for eksempel en n-dopet halvleder settes sammen med et metall der $E_{Fm} < E_{Fc}$, vil det strømme elektroner fra halvlederen til metallet og hull fra metallet til halvlederen helt til fermienergien i halvlederen E_{Fc} er lik fermienergien i metallet E_{Fm} . Metallet tar altså plassen til p-halvlederen i en pn-overgang. I halvlederen vil en nå få positivt ladede donoratomer, mens det i metallet er overskudd av elektroner. Dette fører til et elektrisk felt i grenseflaten mellom metallet og halvlederen, og dermed en potensialforskjell. Elektroner som prøver å strømme fra metallet til halvlederen vil derfor møte en barriere på samme måten som i pn-overgangen. Dette er illustrert i figur 2.5. Ved å sette på en negativ spenning på halvledersiden og en positiv spenning på metallsiden, vil vi oppnå en positiv bias av samme grunn som vi fikk en positiv bias i en pn-overgang. Hvis vi snur spenningen vil det føre til en negativ bias, og det vil ikke gå strøm før barrieren blir så "tynn" at elektronene kan tunnelere gjennom. Positiv- og negativ bias for en metall-halvlederovergang er vist i figur 2.6.

I en metall-halvlederovergang kan vi få strømmen til å bli lineært avhengig av spenningen. Vi sier da at vi har en ohmsk kontakt. Dette kan oppnåes på to forskjellige måter. Den ene måten er å velge et metall med fermienergi lik energien til de elektronene som har lavest energi i ledningsbåndet i halvlederen. Da vil det ikke oppstå en Schottky-barriere i overgangen mellom metallet og halvlederen. Den andre måten å oppnå dette resultatet på, er å dope halvlederen så sterkt at Schottky-barrieren blir veldig "tynn". Da vil vi få tunnelering av elektroner og hull gjennom barrieren ved negativ bias. Fordi barrieren blir tynnere og tynnere ettersom den påtrykte spenningen øker, vil tunneleringssannsynligheten også øke. Hvis kontakten skal være ohmsk, må antallet elektroner som tunnelerer være proporsjonal med den påtrykte spenningen.



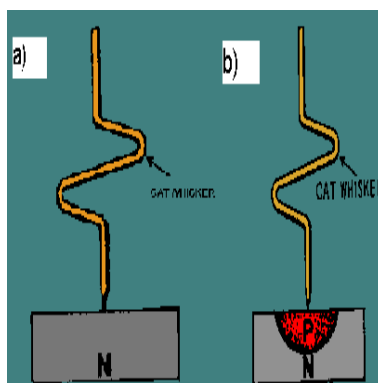
Figur 2.5: Figuren viser potensialet i en metall-halvlederovergang ved termisk likevekt. Figuren er hentet fra(2)



Figur 2.6: Figurene viser energinivåene i en metall-halvlederovergang, øverst ved negativ bias og nederst ved positiv bias. Den øverste linje på halvledersiden er ledningsbåndet, den stiplede linjen er fermienergien og den nederste linjen er valensbåndet. Figuren er hentet fra(2)

2.4.2 Punktkontaktdiode med pn-overgang

Punktkontaktdioden er avhengig av kontaktrykket mellom et punkt og en halvlederkrystall for å fungere. Halvlederkrystallen kan være en rektangulær n-type silikon eller germanium krystall, mens



Figur 2.7: Figuren viser en punktkontakt-diode med en n-dopet halvleder og en metallstang (en catwhisker). I a) har ingen elektroner diffundert over i metallet, mens i b) har dette skjedd og det har oppstått en pn-overgang rundt kontaktpunktet

punktet vanligvis er en tynn metalltråd kalt "catwhisker" (24). Metalltråden kan for eksempel være berylliumkobber, bronsefosfor eller wolfram (tungsten). Uansett bør metallet være fra gruppe tre i periodesystemet slik at det er tre elektroner i ytterste skall. I prosessen for å lage punktkontakt-dioden presses metalltråden mot halvlederkrystallen mens det kjøres en relativt høy strøm gjennom metalltråden. På grunn av varmen som oppstår vil elektronene diffundere fra halvlederen til metalltråden, og dermed konvertere halvlederen til p-type materiale. Denne konverteringen skjer i et svært lite område akkurat omkring kontaktpunktet mellom materialene. Grunnen til at man bruker en punktkontakt metalltråd framfor en flat metallplate er for å produsere et høyintensitets elektrisk felt ved kontaktområdet uten å måtte bruke en stor ekstern spenningskilde. Hvis man skulle satt en så høy spenning på en vanlig halvleder ville den overflødig varme ødelagt metallet. Den elektriske kretsen går nå gjennom metalltråden og via halvlederkrystallen. Derfor må metalltråden ha liten resistans i sin videre kontakt med kretsen. Halvlederkrystallen må ha en ohmsk metall-halvlederkontakt i sin videre kontakt med kretsen. En av forskjellene mellom overgangsdioden og punktkontakt-dioden er at ved positiv bias vil resistansen til punktkontakt-dioden være høyere enn overgangsdioden fordi kontaktflaten mellom metallet og halvlederen er mye mindre. Derimot vil ikke punktkontakt-dioden bli like uavhengig av ytre påtrykt spenning som overgangsdioden ved negativ bias. Punktkontakt-dioden har en fordel ovenfor overgangsdioden; kapasitansen mellom metalltråden og halvlederen er mindre enn kapasitansen mellom de to sidene av overgangsdioden. Dette gjør at en mindre del av strømmen med høy frekvens, generert av kondensatoren, vil gå i kretsen til punktkontakt-dioden. Punktkontakt-dioder brukes i dag i radioer (både AM og FM detektering) og TV-er for å detektere bilde. Historisk eskalerte utviklingen deres i løpet av andre verdenskrig da behovet for bedre radiomottakere var sterkt.

2.4.3 punktkontakt-diode med metallsulfid

Kapittel 3

Forsøk

Sammendrag De første diodene som ble brukt i radioer og likerettere var lagd av metallsulfider og spisse metallgjenstander. På internett fant vi en oppskrift på hvordan en slik punktkontaktdiode kunne lages ved hjelp av helt enkle gjenstander som en finner i et vanlig norsk hjem. Vi ville prøve å lage denne dioden og anvende den i en likeretter. For å ha noe å sammenligne med ønsket vi også å lage en likeretter med en moderne diode som er laget av en pn-overgang.

3.1 Teori

3.1.1 Likeretter

En likeretter er som navnet tilsier en krets som likeretter strømmen. Den gjør vekselspanning om til likespenning. Det finnes mange forskjellige kretser som likeretter strøm. Det de alle har felles er at de består av en diode som kun leder strøm en vei. På figur 3.1 er det vist en type som består av en diode og en kondensator. Sammen vil disse to komponentene føre til en likespenning over resistansen som er koblet i parallell med kondensatoren. Når vekselspanningen er positiv lades kondensatoren opp, samtidig som det går en positiv strøm gjennom resistansen. I det spenningen over kondensatoren blir større en vekselspanningen vil dioden stenge av spenningkilden fra resten av kretsen og vi har essensielt en lukket RC-krets der kondensatoren lades ut eksponensielt

$$I = \frac{Q_0}{RC} \exp\left(\frac{-t}{RC}\right). \quad (3.1)$$

Her er Q_0 ladningen ved $t = 0$, R er resistansen og C er kapasitansen. Også i dette tilfellet er strømmen gjennom resistansen positiv. Etter at vekselspanningen har vært negativ i en halv periode, blir den etter hvert like stor som spenningen over kondensatoren igjen. Med en gang den blir større, vil kondensatoren lades opp igjen og strømmen gjennom resistansen øker. Spenningsamplituden til vekselspanningen minus spenningen over kondensatoren i det den blir ”tatt igjen” av vekselspanningen, kalles ofte for ripplespenningen. Den sier hvor mye spenningsfallet over resistansen varierer. I en god likeretter bør ripplespenningen være liten. Dette får en til ved å ha en stor tidskonstant i RC-kretsen. Tidskonstanten er gitt ved

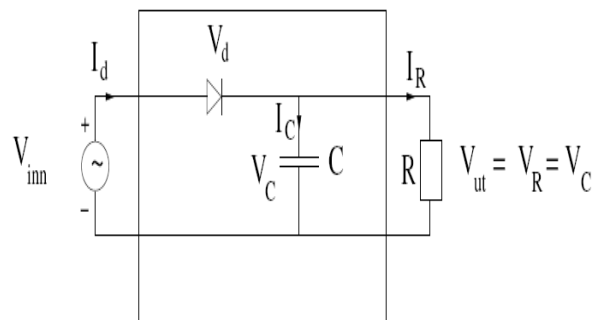
$$\tau = RC \quad (3.2)$$

og forteller hvor lang tid det tar før strømmen ved $t = 0$ er redusert med en faktor $\frac{1}{e}$.

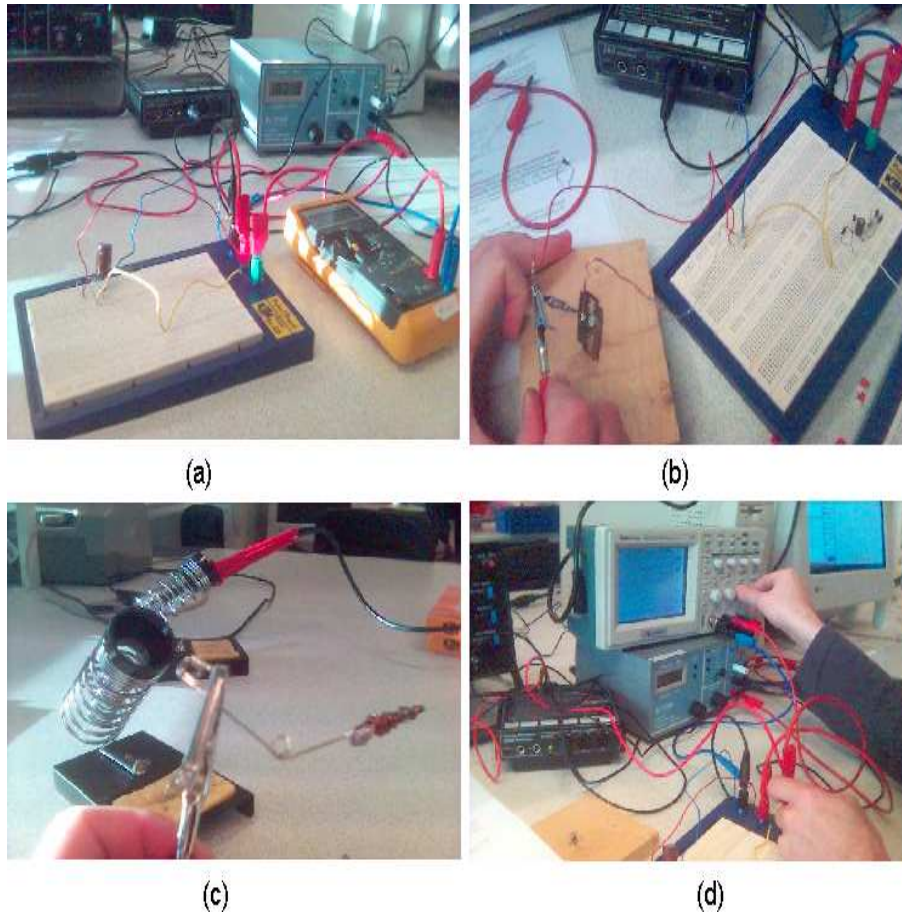
3.2 Utstysrliste

- Loddebolt med våt svamp
- Oppsuger for loddetinnet
- Loddetinn med fluss
- Holder for å holde på komponentene man lodder
- Barberblad med rust på (oksidert)
- Bly (fra blyant)
- Kobbertråder, en tykk og en tynn
- Sikkerhetsnål til å feste blyet på
- Treplate til å lodde på
- Saks og tang for å klippe metallet med
- Datamaskin med matlab dataloggingsprogram installert (DataStudio)
- Digitalt oscilloskop
- Masse ledninger
- Koblingsbrett
- Kondensator -50V maks, 39 μF
- Kjøpt diode
- Vekselstrømsspenningsskilde -50Hz, først 37,8Hz
- Multimeter
- Resistans 100 Ω (koblet i kretsen med kondensator)
- Datalogger (svart boks med 3 input-kanaler)
- Metalltråd
- Rusten jernstang

3.3 Bilder og figurer



Figur 3.1: Skjematisk skisse av likeretteren som ble brukt i forsøket. Figuren er hentet fra(12)



Figur 3.2: a) Koblingsbrettet b) hjemmelaget diode koblet inn i resten av kretsen c) sikkerhetsnålen med grafittstang d) apparatoppstilling

3.4 Metode

3.4.1 Likeretteren

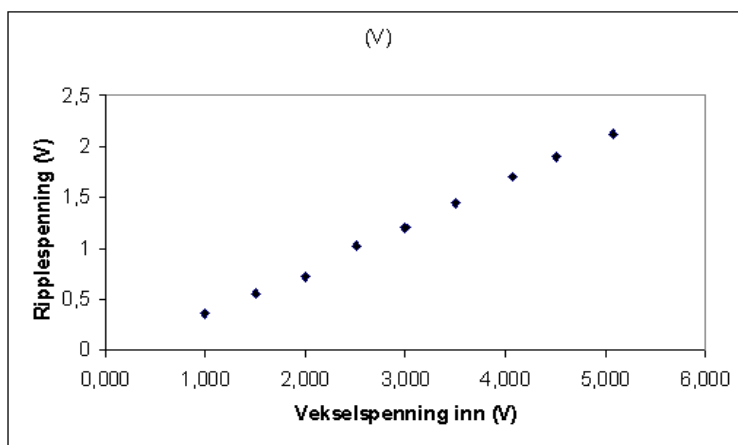
I dette forsøket ble kretsene som ble brukt (se fig 3.1) koblet på et koblingsbrett. På koblingsbrettet ble det koblet slik at spenningsfallet over resistansen kom ut på den ene utgangen (dvs. spenning etter resistansen i forhold til felles jord, men dette var lik spenningsfallet over resistansen), og denne ble koblet opp mot både et digitalt oscilloskop og en datalogger som igjen var koblet til en datamaskin. Dataprogrammet het Data Studio og var i stand til å logge bl.a. spenning over to punkter med jevne mellomrom. Fordi innspenning var 50 Hz, ble Data Studio stilt inn til å logge spenningen over resistansen med en frekvens på 200 Hz - altså fire ganger pr. svingning. Spenningskilden som ble brukt viste ikke hvilken spenning den gav. Derfor ble det koblet på et voltmeter over spenningskilden. En annen viktig detalj er at i likeretteren ble det brukt en kondensator som bare tålte spenning den ene veien. Den siden med en gul strek på skulle være den siden med negativ ladning. Dette var viktig å huske, ellers ville kondensatoren blitt ødelagt. I kretsen ble det satt inn en kondensator som hadde

en kapasitans på $39\mu\text{F}$, og en på $330\mu\text{F}$. Den største av dem var så stor at det ble vanskelig å gjøre skikkelige målinger med den. Likeretterkurven ble så godt som konstant. For lettere å kunne gjøre målinger ble derfor kondensatoren på $39\mu\text{F}$ benyttet. Da det var i orden kom det frem en nydelig likeretterkurve på oscilloskopet (se figur 3.4). Plottet av spenningen er fremstilt i graf 3.5. I tillegg målte vi ripplespenningen for ulike innspenninger, og resultatet er fremstilt i graf 3.3. Målingene her ble gjort ved å bruke cursor-funksjonen på oscilloskopet.

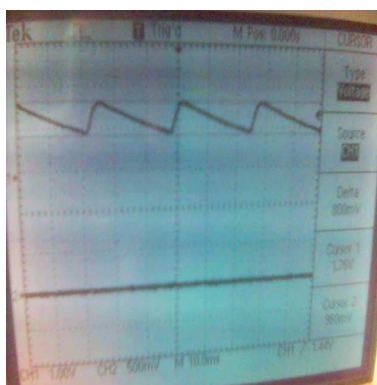
3.4.2 Hjemmelaget punktkontaktdiode

Dioden vi leste om på nettet var, i tillegg til ledninger, satt sammen av et rustent barberblad, en sikkerhetsnål og en grafittstang (sånn som er inni blyanten). Tre dager før forsøket ble barberbladet pusset med fil og lagt i ramsalt vann. I tillegg ble det kokt i saltvann 1-2 ganger om dagen. Grunnen til dette var at det skulle få et rustlag på utsiden. Kokingen skulle føre til at prosessen gikk fortere. På labben ble det loddet på en ledende metalltråd til barberbladet, og grafittstangen ble surret på sikkerhetsnålen med en ledende metalltråd. Ved å koble sikkerhetsnålen og barberbladet til kretsen og presse grafittstangen mot rusten på barberbladet, skulle vi nå merke en bedre ledningsevne ved polarisering av spenningen den ene veien i forhold til den andre. En slike diode ville sannsynligvis ikke tåle en stor negativ bias. Det ble derfor brukt små spenninger i området $50\text{mV} - 1000\text{mV}$. Etterpå ble barberbladet erstattet av en rusten metallstang (armeringsjern fra byggeplass) for å sjekke om den også kunne virke som en diode.

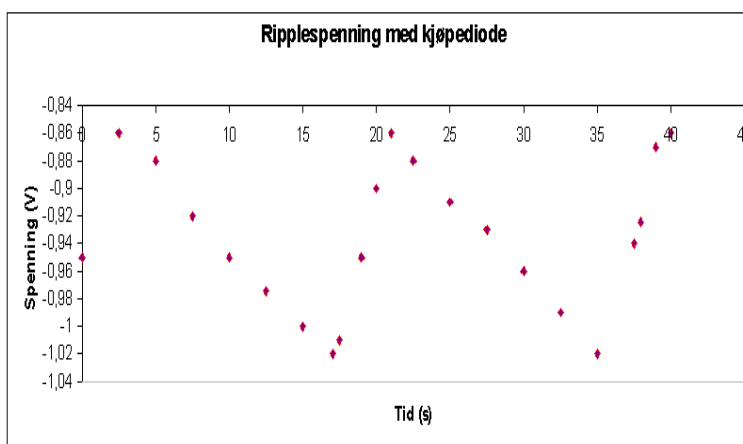
3.5 Resultat og beregninger



Figur 3.3: Ripplespenning s.f.a innspenning



Figur 3.4: Likeretterkurven som kom opp på oscilloskopet



Figur 3.5: Graf som viser likeretterkurven

Når vi plasserte grafittstangen på barberbladet oppstod det aldri noen diode-effekt. Den ledet strøm like godt den ene veien som den andre veien. Selv om grafittstangen ble plassert alle mulige steder på barberbladet, og med forskjellig trykk, gikk strømmen bare rett gjennom. Barberbladet fungerte rett og slett bare som en leder.

Når barberbladet ble erstattet med en rusten metallstang ble resultatet litt annerledes, men ikke ønskelig. Her ble effekten at det enten gikk strøm gjennom som i en leder, eller så gikk det ikke strøm i det hele tatt. Om det gikk strøm eller ikke, var avhengig av om hvor mye rust det var mellom grafittstangen og metallet. Det ble ikke observert noen forskjell i strømmen om grafittstangen ble presset hardt eller svakt mot stangen.

3.6 Konklusjon og diskusjon

Figur 3.5 burde egentlig vist likeretterkurven sammen med innspenningen. Det som ble problemet med å få dette til, var at Data studio gav en veldig merkelig graf. Det gav en rotete kurve der spenningen varierte mye, men med en periodisk variasjon og der aksene var helt på jordet. Plottet var

innstilt på å ta fire målinger pr periode, og det skulle være 50 perioder på ett sekund. På figur 3.5 ser en klart og tydelig at dette ikke stemmer overens med grafen. Løsningen ble å plote den periodiske variasjonen til plottet i Excel. Selv om aksene ikke er som de skal gir den en fin illustrasjon på hvordan spenningen så ut på oscilloskopet. Det er først og fremst derfor den er tatt med her. En ser at når spenningen er på topp og spenningen over kondensatoren blir større enn spenningskilden, vil det gå en strøm som avtar eksponensielt slik utladning av en kondensator vil gjøre. Når spenningskilden blir positiv og større enn spenningen over kondensatoren, vil dioden slippe strøm gjennom og lade opp kondensatoren igjen. Hvor mye spenningen faller før den lades opp igjen, kalles ripplespenning, og denne målte vi som sagt s.f.a innspenningen. Her ble resultatet rimelig. Ripplespenningen økte når innspenningen økte, noe som kommer av at jo større spenningen over kondensatoren er, jo større blir strømmen ut av kondensatoren når innspenningen kuttes.

Resultatet var altså tilfredsstillende for den butikkjøpte dioden. Likeretteren fungerte som den skulle. Neste punkt var nå å erstatte den butikkjøpte dioden med den hjemmelagde. Det ble som sagt ingen suksess.

Grunnen til at det ikke ble suksess med barberbladet var trolig at det ikke var nok rust på barberbladet. Det ble som sagt pusset før det ble lagt til rusting for å få vekk et eventuelt beskyttende lag. Det kan hende at det ble pusset for lite, og at dette var med på å forhindre rusteprosessen. Ellers mistenkes det at barberbladene til Gillette består av en legering som ikke rustet så lett, noe en i etterpåklokskapens navn kan si at vi burde tenkt på på forhånd. Hvorfor ikke metallstangen virket vet vi ikke, men det kan ha sammenheng med at kontaktflaten ble for stor mellom grafitstangen og metallstangen. Når det er sagt skal det sies at dioder av dette slaget aldri har vært spesielt pålitelige. I oppskriften på internett (27) står det at en må føre grafitstangen frem og tilbake på barberbladet og med forskjellig trykk for å få en diodeeffekt: "If the pressure is too hard or not hard enough, the diode will not work, so experiment. The exact spot on the razor is also critical, since some spots will have too much or too little oxide on them to make the diode. Dette vil si at det også er en del tilfeldigheter som spiller inn og at en må være tålmodig og heldig for å klare å lage en diode. En annen ting vi kanskje gjorde feil, var at vi holdt grafitstangen med hendene. Hvis dioden er følsom for trykk, burde sikkerhetsnålen vært festet på en måte som gjorde at den virket som en fjær. Den ville dermed presset grafitstangen ned på barberbladet med konstant trykk og det ville vært mye lettere å oppdage diodeeffekten.

Kapittel 4

Å lage en punktkontakt diode med pn-overgang

Vi prøvde lenge å få tak i en Si-krystall med en ferdiglaget ohmsk kontakt på den ene siden av krystallen. En Ohmsk metall-halvlederkontakt på den ene siden av krystallen er viktig når en skal lage en punktkontakt diode med pn-overgang. Uten det vil en i tillegg til diodeeffekten i pn-overgangen i krystallen, også få en diodeeffekt i overgangen mellom metallet og halvlederen. Slike kontakter lages ved å dampe halvledermetallet på en oksidfri metallflate, og må derfor skje i vakum. Å prøve på noe sånt ville med andre ord vært å gape for høyt. Hvis vi derimot hadde fått tak i en slik del, kunne vi prøvd å lage en punktkontakt diode med pn-overgang, som beskrevet i teoridelen. Vi fikk desverre ikke tak i en slik del i tide, men vi fikk tenkt litt på hvordan vi skulle utført forsøket. Med god hjelp fra sakkynndige fysikere fra Institutt for Fysikk, kom vi fram til en relativt enkel metode som kanskje ville virket. Mye av problemet med å lage en slik punktkontakt diode ligger i å unngå oksidlaget som dannes på overflaten av en Si-krystall når den er i kontakt med luft. Et oksidlag vil føre til at det ikke blir kontakt mellom metallet og krystallen. En mulighet ville ha vært å pusse vekk oksidlaget i et lukket rom uten oksygen. Eventuelt så kunne vi pusset halvlederen i en inert gasstråle (i en gass som ikke reagerer med Silisium) og fått et brukbart resultat. Vi skulle altså klart å få vekk oksidlaget, men å få utført forsøket før det ble dannet et nytt oksidlag virket vanskelig. Den endelige planen ble å lodde på en ledning på metallsiden av krystallen, sette krystallen på en drill (en stor drill som står på gulvet) og erstatte borret med en spiss metallstang. Ved høy omdreining og passelig press mot krystallen var håpet at oksidlaget skulle bli slipt bort og at friksjonen mellom metallstangen og halvlederen skulle gi stor nok varme til at vi ville få diffusjon av elektroner fra den n-dopede halvlederen og inn i metallstangen. På denne måten ville vi fått en pn-overgang i halvlederen i området rundt kontaktpunktet. Ved å holde metallstaven på plass ville vi sannsynligvis unngått dannelse av nytt oksid i kontaktpunktet. Dermed kunne vi koblet dioden i serie med en resistans og satt på en vekselspanning. Hvis vi samtidig hadde koblet på et oscilloskop kunne vi avdekket om vi hadde klart å lage en diode eller ikke.

Kapittel 5

Bruk av dioder

5.1 Nåtidens bruk av dioder

5.1.1 Likerettarar

Definisjonen på ein diode er at det berre kan gå straum igjennom den ein veg. Alle diodar vil difor meir eller mindre vera ein likerettar. Dette er til dømes nyttig for å gjera vekselstraum om til likestraum.

5.1.2 Lysemitterande diodar (LED)

LED (Light-emitting diode) er ein diode som sender foton i den delen av det elektromagnetiske spekteret som er synleg for det menneskelege auga. Fotona vert danna når elektrona dett ned i tomme hol. Høgda på fallet avgjer energien til fotonet og dermed frekvensen på den utsendte strålinga. Alle diodar sender ut energi når elektron rekombinerer med hol, men ikkje alle diodar sender ut detekterbar stråling(8), som for diodar er infraraudt eller synleg lys (VLED). For synleg lys må ein ha større avstand mellom leiingsbandet og valensbandet.

Fargen på det synlege lyset vert avgjort av den eksakte avstanden mellom banda. Denne avstanden er materialbestemt. Til dømes gjev Aluminium Gallium arsenat raudt og infraraudt lys, Gallium Aluminium fosfat grønt lys og Gallium nitrat grønt og blått lys. Ein kan og få rosa og lilla lys ved å bruka lagdelte LED. Lagdelte LED vert og brukt for å få kvitt lys, då dekker ein til dømes ein blå Gallium nitrat LED med ei gulaktig fosforkappe(9). Gult lys stimulerer dei raude og grøne motakkarane i augo, og blandinga av gult og blått lys vil dermed framstå som kvitt lys for oss.

Sidan lyset frå LED'ar allereie er farga slepp ein å tapa effekt gjennom å filtrera kvitt lys. Til forskjell frå ei farga lyspære er difor funksjonen til hylsteret rundt ein LED å beskytta halvleiaren og å fokusera lyset som kjem ut av dioden.

Medan Silisium og Germanium ikkje er effektive i forhold til å gje ut lys, er generelt sett samansette halvleiarar betre(7), til dømes GaAS, GaP og GaAlAs. I ein vanleg diode ender halvleiaren sjølv opp med å absorbera ein del av desse fotona(8), medan ein i ein lysemitterande diode prøver å maksimera kor mange foton som vert frigjevne til omgivnadane.

Lysemitterande diodar bruker lite energi i forhold til vanlege lyspærer og fluorescerande lys (lysrør og liknande). På grunn av dette vert LED'ar stadig meir brukt i lommelykter, trafikklys og leikar (t.d. leikerobotar) i staden for glødelampar. Lysemitterande diodar har og den fordel at dei varer særse lengje (10 år), omlag dobbelt så lengje som dei beste lysrøra og 20 gangar så lengje som dei beste glødelampane(9).

I dag er nok desse bruksområda for lysemitterande diodar nokre av dei mest vanlege(9):

- tynne, lette informasjonstavler. T.d. på flyplassar og togstasjonar.
- infraraude diodar i fjernkontrollar.
- blinklys og sykkellykter.
- raude eller gule LED er t.d. brukt i skilt der det er viktig å ha nattsyn. T.d. i flykabinar, brua på skip og ubåtar.
- i dyre fargeprintarar (LED printarar).
- generell opplysing.

5.1.3 Laserdiodar

Ein laserdiode minner på mange måtar om ein LED, der den største forskjellen er at laseren gjev ut koherent lys (retningsbestemt, same bylgjelengd og i fase). Teoretisk vert ein diode ein laserdiode, i staden for LED, under visse, gunstige forhold der elektronet og holet eksisterer saman ei lita stund før dei rekombinerer. Dermed kan rekombinasjonen kontrollerast med hjelp av eit foton (som vert reflektert frå laserstrålen). Under rekombinasjonen vil eit nytt foton bli emittert, med eksakt same retning, polarisasjon og fase som det stimulerande fotonet. Denne stimulerede emitteringa vil forsterka lyset og ein kan få ein laserdiode.

I den enklaste laserdioden, homooverganglaserdioden (homojunction laser diode), polerer ein endefasettane på overgangsdioden slik at dei fungerer som speglar(10) for fotona og gjer det mogeleg for laseroscillasjon. Sideflatene bør vera ujevne for å hindra lekkasje av lys frå laserkammeret. Desse homooverganglaserane er veldig ineffektive. Dei krev så mykje energi at dei berre kan operera i korte pulsar for å hindra at halvleiaren smelter(9). Så sjølv om desse laserdiodane er viktige historisk sett, og lette å forklara, er dei ikkje særleg praktiske og veldig lite brukt.

Ei forbetring av desse laserdiodane er dei doble heterostrukturelle laserane(10). Her bruker ein grenseflata mellom to enkle krystallhalvleiingar med forskjellige bandgapenergiar. Ein legg eit materiale med lavt bandgap mellom to materiale med høgt bandgap. Namnet, doble heterostrukturelle laserar, kjem av at ein dermed får to grenseflater mellom material med ulike bandgap (Døme: GaAs i samband med AlGaAs). Dette gjer både dei optiske eigenskapane og bæreigenskapane til laseren betre.

Ein diodelaser har ein tilbakekoplingsmekanisme der den sender noko av lyset (fotona) tilbake til ein fotodiode som optisk registrerer kor mykje lys som kjem og gjer signal tilbake til kretsen som driv laserdioden(11). Ved hjelp av dette regulerer kretsen kor mykje straum som går igjennom laserdioden. Dette er viktig, dioden kortsluttar fort ved for sterk straum.

Dei største fordelane med diodelaserar er at dei kan vera veldig små, krev lite energi og er billige å produsera. Dette har gjort dei til viktige elektroniske komponentar som er mykje brukt i telekommunikasjon, måleinstrument, strekkodelesarar, CD-spelarar, laserprintarar og dei kjente laserpeikarane. I tillegg har dei viktige bruksområde innan medisin. I telekommunikasjon vert laserdiodar stort sett

brukt som lett modulerte og lett kopla lyskjelder for kommunikasjon ved hjelp av fiberoptikk. Typiske måleinstrument er avstandsmålarar og laserspektroskopi, det siste kan ein til dømes bruka for å måla konsentrasjonar av ulike ion i blodprøvar eller for å finna informasjon om molekyla i ein prøve. Innan medisin er vel laserkirurgi det største bruksområdet. Ein kan både operera grå stær, fjerna uønska hårvekst, sletta ut rynker og fjerna kreftsvulstar ved hjelp av laser. I seinare tid har ein og klart å få diodelaserar med så god Koherenslengda og monokromati at dei eignar seg til aktivitetar som krev særst nøyaktige laserar t.d. holografi.

5.1.4 Fotodiodar

I fotodiodane skjer omtrent det motsette som i LED'ar og laserdiodar. Fotodioden absorberer foton eller lada partiklar og skaper ein straum i ein ekstern krins. Dette kan den gjera med å absorbera eit foton som får eit elektron i valensbandet til å verta eksitert til leiingsbandet, dermed vil det byrje å gå ein straum. Dei fleste fotodiodar er laga av Silisium, Germanium eller Indium Gallium arsenid(13).

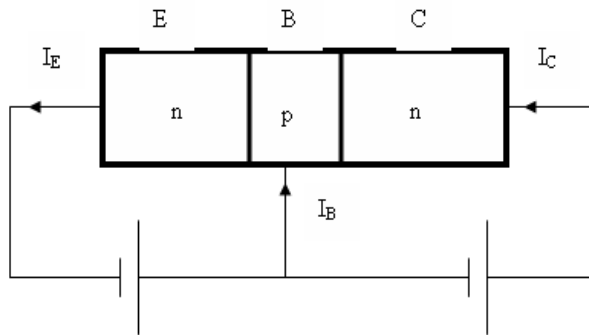
Fotodiodar kan anten verta brukt i negativ bias eller utan påtrykt spenning (null bias). I null bias vil fotona som treff dioden forårsaka ein spenningsforskjell over p-n overgangen og det vil oppstå ein straum i positiv bias; frå p-sida til n-sida i halvleiaren. Dette er den fotoelektriske effekten som er utgangspunktet for solceller.

Dei fleste pn-diodar har ekstremt høg resistans mot å la straum gå frå n- til p-sida(negativ bias). Når lys med passande frekvens skin på overgangen vil denne resistansen verta redusert, dermed kan ein bruka ein negativt biasa diode som ein detektor ved å registrera straumen som går gjennom den. Denne effekten gjer oss i stand til å detektera veldig små kvanta med lys og er nyttiggjort i spektroskopi, fotografering, optiske posisjonssensorar, overflatekarakteristikk, laseravstandsmålarar, optisk kommunikasjon og medisinske instrument for avbilding.

5.1.5 Transistorer

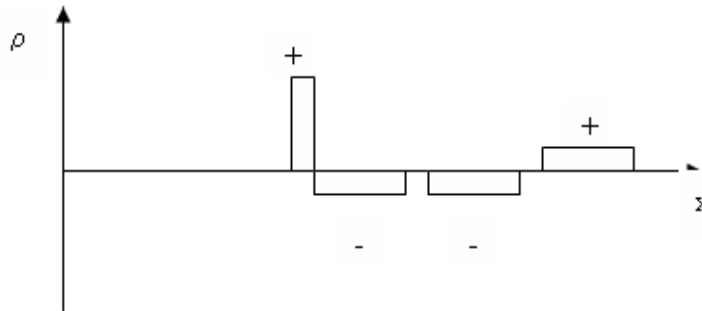
En av de aller første typene som ble utviklet var transistorer med bipolare overganger (1948) (6). Den andre typen transistor heter felteffekttransistor. En slik transistor fungerer på prinsippet om tiltrekning og frastøtning mellom ladninger på grunn av påtrykt elektrisk felt. Signalforsterkningen skjer fordi i noen deler av transistoren vil ladninger bli frastøtt, mens i andre deler vil ladninger bli tiltrukket. Dette kan brukes til å styre mengden strøm som kommer gjennom komponentene. Felteffekttransistorer fungerer mer effektivt enn bipolare fordi et stort signal kan bli kontrollert av en veldig liten mengde energi.

Vi har valgt å fordype oss i hvordan den bipolare transistoren fungerer. Det finnes to former bipolare overganger; n-p-n eller p-n-p (5). I begge formene benytter man seg av to pn-overganger, altså to dioder. Hvis man for eksempel ser på en n-p-n transistor, som er den enkleste å lage og standardmessig bruker silisiummateriale, vil den ene n-typen kalles emitter (E) og den andre n-typen collector (C). P-typen imellom kalles base (B). Når transistoren settes inn i en krets kobles den slik at man har positiv bias ved np-overgangen og negativ bias ved pn-overgangen.



Figur 5.1: Skjematisk figur av transistor

På grunn av Kirchhoffs løkkeregler vil $I_B = I_E - I_C$. Ved likevekt er $V_{BE} = V_{BC} = 0$. Da har vi en ladningstetthet som ser slik ut:



Figur 5.2: Ladningstetthet i diode-overgangene

Denne ladningstettheten viser hvordan ladningene fordeler seg akkurat i diode-overgangene. Årsaken bak fordelingen ligger i at en diode ved likevekt vil ha likt kjemisk potensial (Fermi-energi) over hele dioden. Dermed må noen ladninger forflytte seg over overgangen for å senke/heve potensialet på hver side, og man oppnår et indre elektrisk felt ved hver overgang. Dette indre elektriske feltet skaper en barriere som enten kan senkes ved å sette på et ytre påtrykt felt, eller som kan tunneleres gjennom når overgangen er smal nok.

Dersom basen er bred vil emitterte hull fra E rekombinere i stor grad med elektroner i B , dvs. at hullene ikke "collectes" (samles) av $C \Rightarrow I_C$ blir liten og transistoren oppfører seg i realiteten som to separate pn-overganger. Hvis basen derimot er smal får man stor strøm mot C og transistorvirkning. Fordi begge de påtrykte spenningene kan både være positive og negative får vi fire ulike operasjonsmodi for transistoren:

- 1) Aktiv modus: $I_C \simeq I_E$ (begge er store) og $I_B \simeq 0$, positiv V_{EB} og negativ V_{CB} .

- 2) Metning: de påtrykte spenningene er små, mens alle tre strømmene er store \Rightarrow lukket krets/knutepunkt.
- 3) Cut-off: Negativ spenning på begge pn-overgangene \Rightarrow små strømmer.
- 4) Invertert: Omtrent som aktiv modus, men mindre strømfaktor i basen på grunn av mindre emitter-effektivitet fordi tettheten av hull i C er mindre enn tettheten av elektroner i B .

Man kan beregne en strømovertføringsrate ved å dele IC på IE , og beregne en strømvinning ved å dele IC på IB . Disse beregningene vil vise om transistoren faktisk klarer å forsterke liten forandring i strømmen fra emitter til base, til stor strømforandring inn i collectoren. Da får man en forsterker som gjør et lite signal inn til overgangen med positiv bias om til et stort signal (strømforandring) i overgangen med negativ bias. Dette skjer fordi strømmen i den positive overgangen henger direkte sammen med strømmen i den negative overgangen.

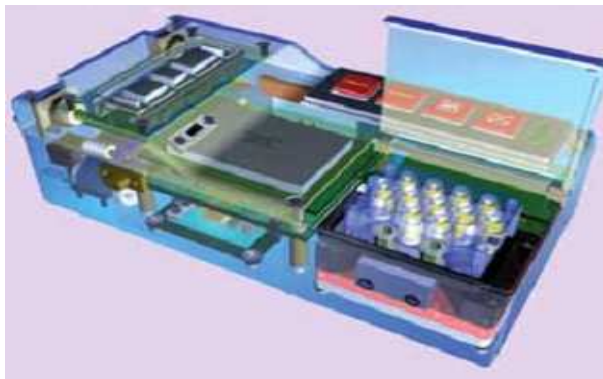
Transistorenes lave pris, fleksibilitet og pålitelighet har gjort den til en nøkkelkomponent innen moderne elektronikk. I tillegg til forsterkere er de mye brukt som svitsjer, og digitale datamaskiner av alle typer inneholder transistorer.

5.2 Framtidig bruk av dioder

På bakgrunn av nyere utvikling har man fått blått laserlys, med kortere bølgelengde, som brukes i HD-DVD og Blu-Ray teknologi til optisk lagring og lesing. På grunn av den kortere bølgelengden tillater blått laserlys høyere tetthet på lagringen og dermed flere bytes på diskene. I mars 2003 annonserte det japanske selskapet SANYO at de hadde utviklet en høy-effekts blå-lilla laserdiode med lavt støynivå, for neste generasjons optiske disk (15). Den blå-lilla dioden er laget av gallium nitrat og ble utviklet fordi etterspørselen krevde større lagringskapasitet på diskene. Dette vil snart innta det store kommersielle markedet, overta for den nåværende DVD-en og muliggjøre dobbeltlag lagring i større skala. Allerede i mai 2005 annonserte Toshiba at de har laget en trelags disk med lagringskapasitet på 45 gigabytes. Men Blu-Ray holder på å utvikle tolags disk med kapasitet 50GB og trelags disk med kapasitet 100GB. Dette er en hard formatskonkurranse mellom to nesten like, framtidige DVD-formater som begge baserer seg på blå laser teknologi. I det lange løp er denne konkurransen muligens svært sunn for teknologiutviklingen, men inntil videre skaper den bare publikumsforvirring og irritasjon.

Et annet bruksområde for blått laserlys er innenfor plantedyrking og -overvåking (16). Blått lys kan nemlig måle mengden klorofyll i planter, og mengden av grønne korn forteller om plantens vekst og sunnhetstilstand. Steen Grüner Hanson ved avdelingen for Optikk og Fluid Dynamikk forteller at den blå laserstrålen vil bli absorbert av klorofyllet i planten. Der vil det omdannes til rødt lys som blir emittert av planten. Ved å analysere det emitterte røde lyset kan man se om planten mangler vann eller gjødsel. Man vil også kunne måle mengden oksygen planten tar opp fra jorda. Denne overvåkingen kan gjøres fra fly, traktorer eller håndholdte instrumenter. Laserlyset kan også brukes i roboter for å fjerne ugress. I dag har man to muligheter i kampen mot ugress: luke det vekk som krever mye fysisk tungt arbeid, eller å sprøyte på giftstoffer som dreper ugresset, men skaper en fare for forurensning av grunnvannet. Det miljøvennlige, framtidige alternativet er da roboter som overvåker jordene, finner ugresset og skjærer over stilkene med laserstråler. Problemet forskerne har oppdaget gjennom uttestinger av systemet så langt har vært at de infrarøde diodene de har brukt for å kutte stilkene er for dårlig fokusert. Her er løsningen gitterlasere, som er under utvikling på forskningssenteret Risø. Gitterlasere fungerer slik at et filter velger ut et utsnitt av lyskjeglen som gjør at man oppnår en skarp fokusering. Denne tynne laserstrålen sendes deretter på et optisk gitter som returnerer strålen til laserdioden hvor den blir forsterket og sendes ut enda smalere og kraftigere. Blått laserlys vil igjen være enda mer effektivt ettersom det blå lyset blir absorbert av plantene og

man dermed ikke trenger en så kraftig stråle for å kutte over stilkene.



Figur 5.3: Bio Detector, et eksempel på et minilaboratorium.

Hele laboratorier på en brikke er også en del av den nye utviklingen. Dette laboratoriet kan bestå av et system av kanaler som man kan sende en prøvewæske gjennom, f.eks. blod eller urin (16). Kantene i kanalene er dekket av forskjellige antistoffer som selektivt binder seg til ulike kjemiske stoffer i prøvewæsken, spesielt de man da ønsker å påvise. For å sjekke om man har funnet et særskilt stoff kan man sende laserlyset gjennom brikken og se om lysets brytningsindeks er endret eller ikke. Jo flere kanaler man kan pakke sammen i brikken, desto flere stoffer kan man analysere på en gang. Det er bølgelengden på laserlyset som setter grensen for hvor tynne kanalene kan være. Det er her fordelene av blått laserlys kommer inn. Hvis man i nærmeste framtid kan klare å gjøre blått laserlys billig nok, kan man masseprodusere disse små laboratoriene og bruke dem i veldig mange varierte bruksområder, f.eks. som en del av feltarbeid i den tredje verden. Inntil videre brukes de for å oppdage luftbårne biologiske agenter brukt i terrorisme, DNA testing og narkotika oppdagelser. Man har både håndholdte systemer, som Sandia's MicroChemLab Bio Detector, og laboratoriebaserte systemer, som Caliper Life Sciences' LabChip 3000 -brukt for narkotikaoppdagelser (21). Sandia National Laboratories holder for tiden på å utvikle MicroChemLab Bio Detector videre. Dette minilaboratoriet består av en 10 cm lang (total lengde) isolert separasjonskanal som er etses inn i en silikon mikrodatabrikke. Ved hjelp av trykk får du presset prøvematerialet inn på brikken der elektriske felter brukes for å manipulere bevegelsen til fluidene i mikrokanalene. Blållilla laserdioder trengs for å inducere fluorescens fra de kjemisk merkede proteinene inne i kanalene. Deretter kobler man til en detektor, gjerne lysabsorberende diode, for å måle mengden av fluorescerende emisjon. Framtidsplanene til Caliper Life Sciences består av å legge flere funksjoner til labbrikkene, blant annet polymere kjedereaksjoner brukt på DNA prøver. De jobber også med å videreutvikle metodene for å bevege fluidene over brikken. Sandia forteller at "Lab-on-a-chip" fremdeles er veldig tidlig i utviklingskurven og har et enormt potensial videre. De spår økt bruk av minilaboratorier i områder som vannanalyse, helsesystemer for hjemmebruk og sykdomsdeteksjon.

5.2.1 Organiske dioder

Thomas Garm Pedersen, ved Instituttet for Fysikk og Nanoteknologi ved Aalborg Universitet, har forsket på organiske nanolydioder (17). Dette er lydioder basert på organiske plastmaterialer, kalt OLED (Organic Light Emitting Diode). Plast består jo av kjedeformede molekyler, såkalte polymerer. Mettede polymerer, altså kjeder uten dobbeltbindinger, er glimrende elektriske isolatorer og

er i dag brukt i ledninger for å beskytte. Men i umettede polymerer er elektronene i de annenhver plasserte dobbeltbindingene løst bundet og kan dermed lede en elektrisk strøm gjennom materialet, liknende en halvleder. Gjennom å koble et batteri til kan man få plasten til å lyse. Denne nye forskningen har enorme utviklingsmuligheter og mange veldige positive trekk: Plastteknologi er mye enklere enn mange andre teknologiske områder. I tillegg kan plastlagene bli svært tynne og fleksible, slik at OLED kan bøyes og rulles sammen. Plast kan produseres i store arealer og fargen på det utsendte lyset bestemmes av den kjemiske sammensetningen av polymerene. Ytelsesevnen til de polymere diodene er lavere enn de silisiumbaserte diodene på grunn av mindre bevegelighet for ladningsbærerne, men dette oppveies helt klart av bøyeligheten til materialet og den mye lavere prisen. Allerede nå holder store firmaer som Philips på med å utvikle skjermer basert på OLED piksler til bruk i data-, mobiltelefon- og tv-skjermer. Og i framtiden kommer kanskje OLED tapeten til å lyse opp i stua, og OLED avisen med digitale nyheter. Problemer som først må overvinnes er å kunne lage tynne nok plastlag for at strømmen skal kunne gå, og å lage riktig typer plastikk med best effektivitet.

OLED er bygget opp med en glassplate som underlag (17). Oppå glasset ligger et lag av Indium-Tinn-Oksid (ITO), et gjennomsiktig metallag som leder strømmen inne i plasten og samtidig lar lyset slippe ut. Det siste laget er plasten, oppå ITO-laget. Plasten legges gjennom såkalt spincoating, dvs. at polymeren dryppes på underlaget for så å bli satt i hurtig rotasjon for å danne ultratynne lag. Tykkelsen kan kontrolleres gjennom rotasjonshastigheten. Oppå plastlaget kommer en topp-elektrode, som legges i et vakuumkammer der metaller varmes opp til fordampning. Når lysdioden plasseres i vakuumkammeret, legger de fordampede metallatomene seg på plasten og danner en elektrisk kontakt. Men ved å bruke "fotoluminescens" framfor "elektroluminescens" trenger man ikke å lage metallkontakter for å lede strøm gjennom dioden fordi UV-lyset man da sender inn mot dioden blir absorbert og utsendt på nytt i form av lys med lavere energi. Et siste bruksområde for organiske nanolysdioder er plastikk-solceller. Eneste problemet er at effektiviteten er svært lav fordi elektronene som absorberer lyset, ikke frivillig vil flytte på seg og skape elektrisk strøm. Dette har man klart å forbedre gjennom å tilsette C60-molekyler til plasten fordi disse molekylene virker tiltrekkende på elektronene. Selv at forskerne er svært flinke til å løse problemene de støter på, er det fremdeles et par utfordringer for neste generasjon: vann kan faktisk ødelegge de organiske diodene, og levetiden til de blå organiske diodene er bare på 1000 timer- i forhold til 10 000- 40 000 timer for røde og grønne OLEDs (22). Men tross problemer, dette er spennende teknologi for framtiden! OLED kan oppfriskes 1000 ganger raskere enn LCD-skjermer, det gjør at du nesten kan vise noe i "real-time" (22). På grunn av formbarheten kan du i framtiden sy små OLED skjermer inn i klærne dine, blant annet for utendørs overlevelsesutstyr. Og de framtidige TV-ene vil kunne rulles opp og fungere som gardiner!

5.2.2 Nanoteknologi

Halvledermaterialer med nanostrukturer er en stor del av framtiden (14). Et optimalt mål er å lage elektroniske komponenter med så små dimensjoner at de kan reguleres av ett enkelt elektron, såkalte ett-elektron komponenter. Et annet forskningsområde er halvledere bestående av kvantepunkter istedenfor energibånd. Disse halvlederne er nanometer store halvledende krystaller innbakt i et annet krystallinsk halvledende materiale med større båndgap. Dermed blir lednings- og valenselektronenes (hullenes) bevegelse begrenset i alle retninger og kvantisert i likhet med elektronenes bevegelser i atomer. Selv at kvantepunktene inneholder opp mot en million atomer, har deres elektroniske og optiske egenskaper likheter med tilsvarende egenskaper hos enkeltatomer. I tillegg er det ytre krystallinske materialet lett å integrere i vanlig faststoffselektronikk. Fordelen med kvantepunktene er at de har diskrete energitilstander som gir mange flere muligheter. Problemet hittil er manglende



Figur 5.4: Et eksempel på en skjerm laget av organisk lysemitterende dioder, fra Universal Display Corp.

kontroll på den geometriske plasseringen og utformingen av de enkelte punktene. Når man får kontrollert koblingen mellom kvantepunktene kan man lage nye klasser av komponenter for bruk i kvantedatamaskiner, optiske hukommelselementer og enkeltfoton lasere. I en kvantedatamaskin vil kvantepunktene fungere som logiske elementer (qubits) (26). Kvantedatamaskinen utnytter da at et kvantemekanisk to-nivå system har uendelig mange tilstander som svarer til alle koherente superposisjoner av de to tilstandene. To-nivå systemene kan enten basere seg på elektronenes spinn eller på ladede elektron-hull par (excitoner som er et elektron og et hull i en midlertidig stabil bane rundt hverandre). Utfordringen er å holde systemet koherent lenge nok til å kunne utføre et større antall operasjoner. En av ideene er å bruke laserpulser for å gjøre disse operasjonene. Excitonene kan være i den kvantemekaniske superposisjonstilstanden i nanosekunder, til og med mikrosekunder. Dette er tusen og millioner ganger lenger tid enn en laserpuls, og tillater dermed tusenvis av laserpulser innenfor et operativt tidsrom for å gjøre logiske operasjoner.

Men det er ikke bare i kvantedatamaskiner man finner kvantepunkter. Fordi kvantepunkter kan designes til å inneholde ett enkelt kvantisert elektron om gangen, kan dette elektronet sende ut ett enkelt foton om gangen. Dette kan utnyttes til å sende kodede signaler, kalt kvantekryptering (14). Enda et spennende forskningsområde er Spintronics. Spintronics (spinnbasert elektronikk) handler om å regulere elektroniske komponenter gjennom vekselvirkning med elektronenes magnetiske moment (spinn). Målet er å styre en strøm ved å påvirke et enkelt spinn med et magnetfelt (eller polarisert lys). Elektronenes spinn inneholder nemlig et magnetisk moment som kan bli oppdaget og kontrollert ved hjelp av magnetiske felt. Denne forskningen brukes i første omgang til å lage hukommelselementer med ultra stor kapasitet (14 og 18). Nyeste resultater er 1TB på en vanlig 3,5" diameter disk (19). En av de vanligste måtene å lage spinnpolarisert strøm på er å kjøre strømmen gjennom et ferromagnetisk materiale. En slik GMR (Giant MagnetoResistance) komponent består av to lag av ferromagnetisk materiale, separert av tomt rom. Hvis de to magnetiseringsvektorene i de ferromagnetiske lagene er parallelle vil strømmen nærmest strømme fritt, mens hvis magnetiseringsvektorene er antiparallele oppnår systemet størst motstand. Forskjellen i resistans mellom disse to orienteringene kan være så høy som 200 % (19). Det finnes to varianter av GMR; "current-in-plane" der strømmen går parallelt med lagene, og "current-perpendicular-to-the-plane" der strømmen går vinkelrett på lagene (19). I framtiden vil vi kanskje få se MRAM (Magnetic Random Access Memory) og spinnbaserte transistorer som krever at det utvikles mag-

netiske halvledere der ferromagnetismen oppstår ved romtemperatur. Disse transistorene vil bestå av magnetiske dioder som dannes av to lag; et magnetisk halvlederlag (p-laget) og et elektronlag der spinn kan induseres. Dermed får vi en likeretter. Det er ikke bare vanlige likerettere som lages, men også Spin-LEDs. Her blir en strøm av spinnpolariserte elektroner skutt inn i en magnetisk halvleder. Når de spinn-polariserte elektronene rekombinerer med de ikke-polariserte hullene får vi sirkulært-polarisert emittert lys (20).

Til sist holder forskningen på med å lage molekylær elektronikk, altså elektroniske kretsløp basert på enkeltmolekyler. I de seneste år har man klart å vise at enkeltmolekyler kan fungere som både motstander, dioder og transistorer i nanoskala komponenter. Forskningen har også laget diode-pumpede lasere, istedenfor lasere drevet av vanlig lamper. Dermed oppnår man høy elektrisk-til-optisk effektivitet og avkjølingsbehovet er blitt drastisk mindre. Levetiden er mye lengre og hele det nye lasersystemet er mer kompakt i størrelse, altså krever mindre plass.

Kapittel 6

Konklusjon

Gruppen har gjennom dette fordypningsarbeidet de siste ukene oppnådd en mye bedre innsikt i dioders virkemåter og funksjoner i samfunnet. Vi har i tillegg satt oss grundig inn i den teoretiske bakgrunnen og forsøkt å forstå hvordan en diode kvantefysisk fungerer. Mye av den praktiske forståelsen ville vi heller oppnå gjennom et forsøk. Vi bestemte oss for å bygge to dioder og sammenligne begge med en kjøpt, fungerende diode. Den ene av diodene vi skulle bygge fant vi på en internettside som handlet om å bygge ens egen radio av husholdningsartikler. Den andre dioden skulle være en punktkontaktdiode med metall-halvlederovergang. Dette materialet kom dessverre altfor sent fra universitetet i Oslo, og vi var nødt til å skrive teoretisk om hvordan vi ville gjennomført forsøket i stedet. Selv om den hjemmelagde dioden tilslutt ikke fungerte, og vi aldri fikk bygget den andre dioden, følte gruppen selv at vi har lært veldig mye gjennom dette prosjektet. Den eneste virkelige feilen er den vi ikke lærer noe av”, John Powell.

Kapittel 7

Litteraturliste

1. Fundamentals of semiconductors and devices av Rolf Enderlein og Normann J. M. Horing
World Scientific
2. Semiconductor physics and devices-basis principles av Donald A. Neamen
3. Generell fysikk for universiteter og høyskoler, bind 2 varmelære og elektromagnetisme, av Egil Lillestøl, Ola Hunderi og Jan R. Lien
4. Physics for scientists and engineers av Fishbane, Gasiorowicz og Thornton
5. Notater fra Elektrisitet og Magnetisme 2- faget, om transistorer.
6. MSN Encarta (internett leksikon): http://encarta.msn.com/encyclopedia_761566928/Electronics.html
7. Lasers by John Watson: <http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/semi.html>
8. HowStuffWorks: <http://electronics.howstuffworks.com>
9. Wikipedia-the free encyclopedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
10. Toshiba sin produktguide for synlege laserdiodar:
<http://www.semicon.toshiba.co.jp/eng/prd/opto/doc/pdf/bce0026b.pdf>
11. Semiconductor Laser Diodes presentert av Ryan LoIacono:
http://www.ee.eng.buffalo.edu/faculty/cartwright/teaching/ee494s01/Presentations/Semiconductor_Laser_Diodes.pdf
12. Øving 4 i FY1013: <http://web.phys.ntnu.no/~stovneng/FY1013.2005/oving4.pdf>
13. Photodiode Characteristics and Applications by UDT Sensors Inc.:
<http://www.udt.com/Datasheets/Other/PhotodiodeCharacteristics.pdf>
14. En rapport om det teknologiske fremsyn om nanoteknologi av Thomas Bjørnholm, NSC-KU, Ole Hansen, MIC-DTU, Kent Mattson, NKT-Research og Kristian Stubkjær, DTU (koordinator).
15. En pressemelding fra SANYO om deres utvikling av høy-effekts blålilla laserdiode for neste generasjons optiske disketter: www.sanyo.co.jp/koho/hypertext4-eng/0303news-e/0326-e.html

16. En artikkel fra RisøNyt nr. 1 i 2002, "Fremtidens lasere".
17. "Organiske nanolydioder" av lektor Thomas Garm Pedersen ved Instituttet for Fysikk og Nanoteknologi ved Aalborg Universitet.
18. "The new era of spintronics" av Albert Fert, Jean-Marie George, Henri Jaffrès, Richard Mattana og Pierre Seneor, publisert i Europhysics News (2003) Vol. 34 No. 6.
19. En definisjon av Spintronics fra Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Spintronics>
20. Et abstrakt av artikkelen "Bipolar Spintronics", skrevet av Jaroslav Fabian ved Karl-Franzens Universitet, presentert ved MRS høstmøtet i 2002.
21. www.memagazine.org/backissues/may04/features/shrinklab/shrinklab.html
22. <http://science.howstuffworks.com/oled.htm>
23. Et bilde av praktisk bruk av myke OLEDs, fra [Google.no](http://www.google.no)
24. www.fnrf.science.cmu.ac.th/theory/microwave/Microwave
25. <http://modernworldview.net/diode/>
26. En definisjon av kvantedatamaskiner fra Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computer
27. Enkel oppskrift på radio: http://sci-toys.com/scitoys/radio/homemade_radio.html