

Optiska och elektriska egenskaper hos pn-övergången

Labben bygger mest på kapitel 6 och 7 i kompendiet. **Lös förberedelseuppgift 1-8 innan labben och var beredd på att lämna in dem i början av labben.** Annars riskerar du att inte få labba.

Varje laborationspar **A, B** och **C** utför separata laborativa moment. Vid redovisningen ska varje par ha en miniföreläsning för de andra. Målet vid redovisningstillfället är att resten av gruppen ska förstå vad ni har gjort och fysiken bakom resultaten. Ni behöver alltså se till att ni förstår vad ni har gjort och att ni kan få de andra att förstå det. Tänk noga igenom vad ni har gjort och titta igenom era anteckningar innan ni lämnar labben!

I er miniföreläsning, måste ni på något sätt inkludera följande, annars kommer era åhörare inte att hänga med.

1. Vad är målet/avsikten/idéen med vår mätning? Vad är det vi studerar?
2. Vad mätte vi? Hur mätte vi?
3. Vad fick vi för resultat? Har vi räknat om data på något sätt innan vi plottade?
4. Vad visar de data vi har fått? Hur kan vi förstå resultaten?

Er redovisning bör vara ca 10-15 minuter. Träna så att ni vet att ni har anpassat tiden väl! Tänk på att de andra ska kunna anteckna så ge dem tid till det. Identifiera vilka förberedelseuppgifter som har med era försök att göra och se till att dessa på ett bra sätt förekommer i er diskussion, t.ex. i er förståelse av mätdata.

Det finns projektor vid redovisningstillfällena. Någon form av tavla kommer också att finnas. Utnyttja gärna dessa till härledningar - det är svårt att göra härledningar på ett bra sätt i t.ex. PowerPoint, men ni får bestämma själva (och sen reflektera efteråt över om ni gjorde ett bra val...).

Efter redovisningstillfället ska alla studenter ha tillgodogjort sig insikterna från alla moment som ingår i laborationen. Vissa centrala delar av kursmaterialet berörs bara här, t.ex. tillståndstäthetens betydelse för optiska egenskaper och solcellens funktion. Andra delar, t ex diodekvationen, finns diskuterat i kompendiet men laborationen ger ytterligare insikt. Detta material kan ingå i tentamen. Se till att du ställer frågor och antecknar när andra grupper berättar! Det går såklart bra att ställa frågor om detta material, såväl som allt annat, även i andra sammanhang.

Lablokaler är i H200-korridoren. Redovisningarna kommer att vara i K200-korridoren.

Strömmen i en pn-övergång – I - U -karakteristik

Strömmen I genom en pn-övergång som funktion av spänningen U över den beskrivs av diodekvationen

$$I(U) = I_0(e^{eU/\eta kT} - 1)$$

där är e elementarladdningen, k Boltzmanns konstant, T temperaturen och η idealitetsfaktorn. U definieras som positiv om dioden är framspänd och negativ om dioden är backspänd. För en diffusionsström genom dioden (det som diskuteras mest utförligt i kompendiet) blir idealitetsfaktorn 1. Verkliga dioder uppvisar dock ofta ström-spänningskurvor där idealitetsfaktorn är skild från 1 i någon del av kurvan. Om diodströmmen domineras av *rekombinationsström* är idealitetsfaktorn närmare 2 än 1.

pn-övergångar är centrala inom elektroniska och optoelektroniska tillämpningar. De används som likriktare, som lysdioder, som fotodetektorer, som solceller och flera andra tillämpningar, bl a som termometer eftersom strömmen i pn-övergången är temperaturberoende. Ett sätt att implementera denna specifika tillämpning är att hålla strömmen konstant och notera spänningen över dioden - detta ger temperaturen.

Uppgift 1. Skissa två I - U -kurvor för en pn-övergång vid två olika temperaturer (kall och varm). Vi är dock hela tiden inom mätnadsområdet (vilket vi antar i hela kapitel 7), dvs fullständig jonisering av dopatomer.

I en backspänd diod är $I = -I_0$. I_0 utgörs av minoritetselektroner (hål) från p(n)-sidan som sveps över till n(p)-sidan av det elektriska fältet i utarmningsområdet (kompendiet s 184-186). Om vi betraktar uttrycket för I_0 (eller uttryckt som en strömtäthet J_0); i kompendiet eller i formelsamlingen så ser vi att det innehåller flera variabler, varav de flesta är temperaturberoende. I_0 är alltså inte konstant med avseende på temperatur.

Uppgift 2. Vilka temperaturberoende faktorer ingår i I_0 ? Vilken är dominerande? Påverkar detta din bild i *uppgift 1* ovan? Rita om den isåfall!

Uppgift 3: Rita banddiagrammet för en *framspänd* pn-övergång. Skissa i de neutrala områdena in prickar (symboliserar elektroner i ledningsbandet) och ringar (symboliserar hål i valensbandet) och som illustrerar deras termiska fördelning på energinivåer i respektive band – t ex som i fig 7.10.

Ta sen en penna med en annan färg och rita hur prickarna (elektronerna) och ringarna (hålen) är fördelade när temperaturen har *ökats något*. I vilket fall (lite varmare eller lite kallare) tror du att man får mest ström i den framspända dioden?

Inbyggd spänning och diodens kapacitans

Den inbyggda spänningen ψ_0 i en pn-övergång uppstår på grund av att halvledaren är olika dopad på p- och n-sidan. Experimentellt kan ψ_0 bestämmas genom att man mäter pn-övergångens kapacitans C som funktion av pålagd spänning U .

Kapacitansen C definieras som

$$C = \frac{dQ}{dU}$$

där Q är laddning och U är pålagd spänning. Utarmningsområdet i en pn-övergång är utarmat på rörliga laddningar men de fixa laddningarna (joniserade acceptorer och donatorer) sitter kvar, och utgör laddningen Q (positiv på n-sidan, negativ på p-sidan). Utarmningsområdets storlek ändras när spänningen varierar och alltså ändras även laddningen Q (från joniserade dopatomer) – därför får vi en ändring av Q med U som ger oss en kapacitans enligt ovan.

Vår teori för övergångens kapacitans fungerar bäst då dioden är backspänd eller inte alltför framspänd. När extra minoritetsladdningsbärare injiceras i de neutrala områdena vid framspänning ger detta ett extra bidrag till laddning man i sådana fall måste ta hänsyn till vid stora framspänningar.

Kapacitansen (med avseende endast på laddning från joniserade dopatomer enligt ovan) ges av följande uttryck (kompendiet s. 198, även i formelsamlingen)

$$C = A \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r e}{2(\psi_0 - U)} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{w}$$

där A är komponentens area, N_D och N_A dopkoncentrationerna, ψ_0 den inbyggda spänningen och w utarmningsområdets bredd.

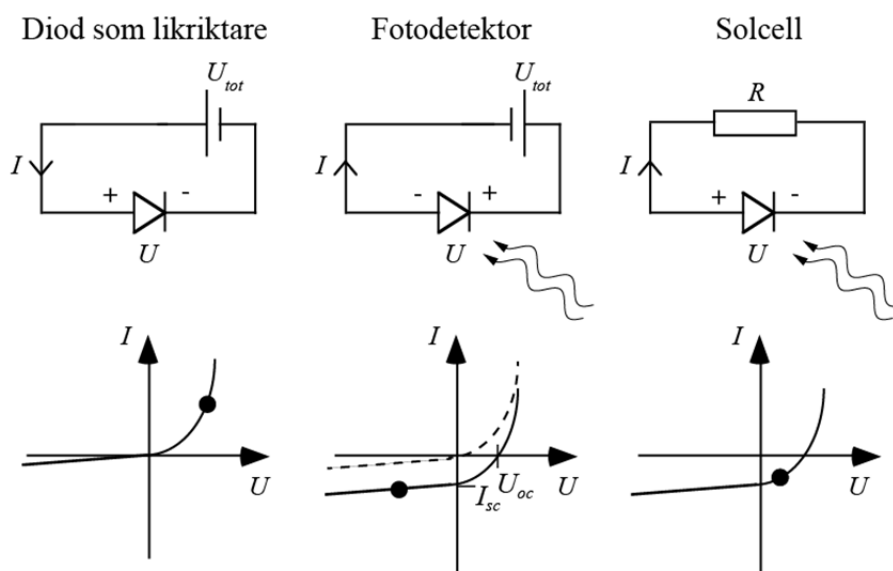
Uppgift 4. Vi mäter C som funktion av U . Skriv om uttrycket så att du i vänsterledet har $1/C^2$. Om du plottar dina mätdata som $1/C^2$ mot U , hur kan du få ut ett värde på ψ_0 ur din plot?

(Lys)dioder, fotodetektorer och solceller – olika sätt att använda en pn-övergång

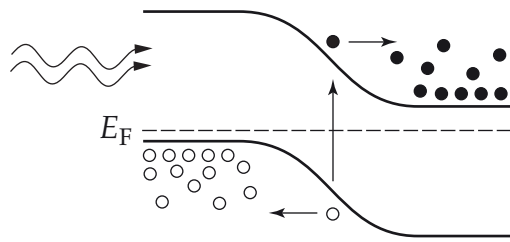
En ”vanlig” diod som används som likriktare (delbilden längst till vänster i figur 1) är en pn-övergång som öppnas (blir ledande) genom att framspännas och stängs genom att backspännas. När spänningen över den är noll är även strömmen genom den noll.

En lysdiod är en pn-övergång där elektroner i ledningsbandet som rekombinerar med hål i valensbandet avger sin överskottsenergi genom att emittera fotoner. Då dioden framspänns går en framström i dioden och elektroner som injicerats på p-sidan rekombinerar med hål som det finns rikligt av där genom att emittera fotoner. Analogt hittar hål som injicerats på n-sidan snabbt elektroner att rekombinera med. Rekombination kan även ske i utarmningsområdet där vi ju har flöden av både hål och elektroner. Denna process ändrar η från 1 till närmre 2 i diodekvationen. Våglängden på det utsända ljuset bestäms av bandgapet. Genom kontroll över halvledarmaterialet i dioden kan man tillverka dioder som lyser med olika färg.

Om dioden används som fotodetektor (figur 1, delbilden i mitten) registrerar man den ström eller spänning som *uppstår då infallande fotoner absorberas i pn-övergången*. Absorptionen sker genom att en elektron i valensbandet tar upp fotonenergin och exciteras till ledningsbandet förutsatt att fotonenergin är tillräcklig. I den här tillämpningen backspänner man ibland dioden för att öka storleken på utarmningsområdet och därmed sannolikheten för absorption, men pn-övergången kan absorbera fotoner även utan denna backspänning.



Figur 1: Olika arbetsområden för pn-övergångar. I solcellskretsen belastar man avsiktligt med en väl vald resistans R .



Figur 2: När fotoner absorberas skapas elektron-hål-par. Det elektriska fältet i utarmningsområdet separerar de skapade elektronerna och hålen.

Uppgift 5: Skissa ljusemissionen (intensiteten) som funktion av våglängd för en lysdiod med $E_g = 2$ eV. Emitterar lysdioden vid en enda våglängd eller i ett (litet) våglängdsintervall?

Ledning: Emission sker genom att en elektron i ledningsbandet rekombinerar med ett hål i valensbandet – fundera på vid vilka energier det finns elektroner och vid vilka energier det finns hål (tomma tillstånd) och sedan på vilka fotonenergier som emitteras vid rekombination.

Uppgift 6: Nu tar vi bort spänningskällan och *lyser på* lysdioden från förra uppgiften. Halvledaren i dioden (pn-övergången) kommer att absorbera fotoner beroende på vilken våglängd de har. Skissa absorptionen i dioden som funktion av våglängd (anta $E_g = 2$ eV).

Ledning: Absorption sker genom att en elektron i valensbandet tar upp en foton och exciteras till en tom plats i ledningsbandet. Ett nyckelbegrepp här är tillståndstäthet som beskriver koncentrationen av tillstånd vid olika energier. Kan halvledaren absorbera fotoner med mindre energi än E_g ? Kan halvledaren absorbera fotoner med mer energi än bandgapet? Ser absorptionen likadan ut som emissionen? Eller annorlunda?

Då fotoner absorberas i utarmningsområdet (eller strax utanför) separeras de skapade elektronerna och hålen snabbt av det starka elektriska fältet i övergången (se figur 2). Genererade hål sveps till p-sidan och elektroner till n-sidan. Dessa laddningsbärande flöden ger en ström i pn-övergången.

Denna belysningsinducerade ström (fotoström) finns i pn-övergången även utan yttre spänning. Läger vi sedan på en framspänning för att driva en ström ger fotoströmmen fortfarande ett extra bidrag till den totala strömmen så länge vi lyser. Vi får alltså ett extra strömbidrag i pn-övergången oberoende av värdet på en pålagd spänning, och hela ström-spänningskurvan förskjuts enligt figur 1 (se fotodetektor och solcell).

Under belysning skriver vi diodekvationen som

$$I(U) = I_0(e^{(eU/\eta kT)} - 1) - I_{sc}$$

där I_{sc} är den ström som utgörs av de elektron-hål-par som skapas då fotoner absorberas.

Även då $U = 0$ får vi alltså en ström (fotoströmmen) i dioden – den kallas kortslutningsströmmen I_{sc} (*short-circuit current*) och även då $I = 0$ finns en spänning över dioden – den så kallade tomgångsspänningen U_{oc} (*open circuit voltage*). Kortslutningsströmmen I_{sc} är proportionell mot antalet absorberade fotoner och säger något om fotonintensiteten. Diodens kvanteffektivitet (*quantum efficiency*) är 1 om alla infallande fotoner genererar elektron-hål par och mindre än ett för mindre ideala (men mer realistiska) fotodetektorer.

Uppgift 7: Är det en framström eller en backström som uppstår i pn-övergången då den absorberar fotoner som i figur 2?

pn-övergångar kan även användas som solceller. Det finns även andra typer av solceller, t.ex. Grätzelceller, men halvledarsolcellerna har potential att uppnå högre effektivitet även om de i dagsläget är dyrare än Grätzelcellerna.

I en solcell används den ström och spänning som uppstår då fotoner absorberas till att driva någon applikation. Belastningen (resistansen) i solcellskretsen påverkar hur stor effekt solcellen ger och måste väljas rätt för att optimera den elektriska effekt som solcellen kan leverera.

Uppgift 8: Om man över en belyst solcell (pn-övergång) uppmäter spänningen U , vilken spänning ligger då över motståndet R i solcellskretsen i figur 1? Vilken eller vilka ytterligare storheter (förutom spänningen U) behöver du mäta för att beräkna den elektriska effekt som utvecklas i resistorn?

Labuppgifter Grupp A

Vilken sida är vilken?

En lysdiod har ett långt och ett kort ben. Ta reda på, eller verifiera om ni redan vet, vilket som går till p-sidan och vilket som går till n-sidan i dioden.

Inbyggd spänning och diodens kapacitans (IR-diod)

1. Nollställ kapacitansmätaren och sätt dioden i hållaren.
2. Använd spänningskällan och potentiometern för att variera spänningen i både fram- och backriktningen. Mät mellan ca -0,5V till +0,5V
3. För varje spänning, notera kapacitans och pålagd spänning.

Emission (IR-diod och gul diod)

1. Öka försiktigt spänningen så att dioden lyser.
2. Montera den lysande dioden vid spektrometers ingångsspalt.
3. Starta spektrometern, amperemetern och programmet *Optokomponenter*.
4. Mät emissionen i ett lämpligt våglängdsområde. Justera storleken på in- och utgångsspalterna om mätsignalen är för svag.
5. Spara dina data genom att markera aktuellt dataset och välj *save plot*.

Absorption (Gul diod)

1. Montera dioden på detektorplatsen på spektrometern och koppla den till amperemetern.
2. Montera och tänd den vita lampan vid spektrometers ingångsspalt.
3. Mät absorptionen i ett lämpligt våglängdsområde. Justera spalterna om det behövs
4. Spara dina data genom att markera aktuellt dataset och välj *save plot*.
5. Om ni har tid, mät den vita lampans emission med kiseldetektorn. Normera diodens absorption med lampans emissionsspektra.

Analysuppgifter (ska ingå i er redovisning):

1. Bestäm IR-lysdiodens inbyggda spänning, ψ_0 , genom att plotta $1/C^2$ mot den pålagda spänningen U . Hur kan man förstå att kapacitansen varierar med spänningen? Jämför sedan ψ_0 med IR-diodens bandgap från en emissionsmätning. Är resultaten rimliga?
2. Plotta den gula lysdiodens emission och absorption *tillsammans i en figur* som funktion av våglängd. Hur kan man förstå varför de varierar med våglängd som de gör? Använd begreppen tillståndstäthet och fermifördelningen. Bestäm bandgapet.
3. *Beräkna* emissionen som funktion av fotonenergi hos den gula dioden och *jämför* med den emission ni har mätt upp.

För att beräkna emissionen: använd er absorptionskurva och multiplicera den med "svansen" av en Fermifördelning $\exp[-(E-E_F) / kT]$. Ferminivån ligger ju någonstans i

bandgapet så vi behöver bara ta med den exponentiellt avtagande delen av fördelningen. När ni utför multiplikationen – i Matlab – spelar det ingen roll vilket värde på E_F ni väljer. Vi kan skriva om "Fermi-svansen" som $\exp[-E/kT] \cdot \exp[E_F/kT]$ där den senare termen bara är en konstant. Sätt t ex E_F till noll.

Ta alltså era data för absorptionen (absorption som funktion *av våglängd*), räkna om till absorption som funktion *av energi* och multiplicera med exponentialfunktionen ovan. Det kan hända att ni får zooma in mycket för att hitta er emissionstopp. Plotta denna *tillsammans med* den gula diodens absorption *och* emission i en plot, så att vi lätt kan jämföra dem.

Labuppgifter Grupp B

Vilken sida är vilken?

En lysdiod har ett långt och ett kort ben. Ta reda på, eller verifiera om ni redan vet, vilket som går till p-sidan och vilket som går till n-sidan i dioden.

*I**U*-karaktistik

(Rumstemperatur)

1. Öppna programmet "I-U-karakteristik"
2. Använd spänningskällan och potentiometern för att variera spänningen (koppla enligt schematisk skiss nr. 1). Ha dioden i en termos med öppningen täckt av ett lock eller papper.
3. För varje spänningsvärde, tryck "nytt värde" så registrerar Labview spänning och ström. Knappen "Avsluta/Radera" raderar era data! Tryck aldrig på den utan att trycka "Spara data" först! Mät både fram- och backström. Låt inte strömmen genom dioden bli större än 2 mA. I backriktningen blir strömmen inte så stor, men det räcker att mäta till ca -2V.

(Flytande kväve: 77 K)

Upprepa mätningarna med provet nedsänkt i flytande kväve. Försök notera färgen på den kalla dioden!

Dioden som termometer

Håll strömmen genom dioden konstant genom att driva den med en konstant-strömgenerator (koppla enligt schematisk skiss nr. 2). Konstant-strömgeneratorn ger ström på 1 mA om ni har framspänt dioden. Vi ska mäta hur spänningen över den framspända dioden varierar med temperatur.

1. Öppna programmet "Konduktivitet2000"
2. Börja med att ha dioden nedsänkt i flytande kväve.
3. Lyft upp dioden ur kvävet och starta en mätning.
4. Om ni vill att temperaturen ska stiga fortare, koppla in en spänningskälla över kontakterna märkta "värme". Börja med inställningarna: noll spänning, max ström. Vrid upp spänningen tills strömmen är runt 1A men absolut inte större.
5. Mät till ca rumstemperatur.

Analysuppgifter (ska ingå i er diskussion):

1. Plotta IU -kurvorna för de två olika temperaturerna *i samma diagram*. Beskriv utifrån diodekvationen och förberedelseuppgifterna vad som händer i dioden när temperaturen ändras. I_0 är viktig här!
2. Plotta $\ln(I)$ mot U för båda era mätningar. Utifrån era plottar, vad blir idealitetsfaktorn i de två fallen? Det är ju samma diod, så vi hoppas att det inte blir alltför olika resultat...
3. För konstant ström – plotta spänning som funktion av temperatur och beskriv fysiken med hjälp av diodekvationen och förberedelseuppgifterna.

Labuppgifter grupp C

Vilken sida är vilken?

En lysdiod har ett långt och ett kort ben. Ta reda på, eller verifiera om ni redan vet, vilket som går till p-sidan och vilket som går till n-sidan i dioden.

Dioden som fotodiod:

1. Tänd lampan (solen) och kontrollera att det finns en diod i det lilla mätuset.
2. Koppla in en multimeter för att mäta ström (kortslut den andra utgången).
3. Ställ in polarisatorerna enligt instruktioner vid uppställningen.
4. Variera ljusintensiteten genom att vrida den graderade polarisatorn. Notera värden på (kortslutnings-)strömmen genom dioden för relativ intensitet 1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.1, 0.03, 0.01. Använd diagrammet vid er uppställning för att se vilka polarisatorvinklar ni ska använda. Vad är spänningen över dioden under hela den här mätningen?
5. Byt ut amperemetern mot en voltmeter. Notera värden på (tomgångs-)spänningen över dioden för samma relativa intensiteter som i föregående uppgift. Vad är strömmen genom dioden under hela den här mätningen?
6. Plotta $\log(I_{sc})$ mot $\log(\text{intensitet})$ och U_{oc} mot $\log(\text{intensitet})$. Varför plottar vi såhär?

Dioden som solcell:

1. Nu behöver ni koppla in en resistor (potentiometer) i kretsen och mäta ström och spänning.
2. Ställ in polarisatorerna så att de släpper igenom så mycket ljus som möjligt.
3. Börja vid lägsta resistansen (med en 10 MOhm-potentiometer) och gå mot högsta medan du noterar värden på ström och spänning.
4. Beräkna effekten och resistansen. Vad är optimal belastning (resistans)?
5. Sänk ljusintensiteten till hälften och gör om mätningen. Vilken resistans är nu optimal?

Analysuppgifter (ska ingå i er diskussion):

1. Visa era data för hur kortslutningsströmmen och tomgångsspänningen varierar med belysning [$\log(\text{ström})$ som funktion av $\log(\text{intensitet})$, samt spänning som funktion av $\log(\text{intensitet})$]. Vad händer i dioden? Glöm inte bort att visa enkla kopplingsschema för era olika mätningar!
2. Visa era data för spänning och ström genom dioden/resistorn när dioden fungerar som solcell. Plotta effekt som funktion av resistans. Vad blev optimal belastning?
3. Om ni diskuterat *lastlinje* på labben: rita lastlinjen för resistorn i solcells-kretsen och indikera hur den varierar med resistansen.