

# Diode

Denne øvelse illustrerer diodens eksponentielle karakteristik i lederetningen og diodens parametre skal bestemmes.

Det forventes at de studerende arrangerer sig i mindre grupper inden øvelsens start. Der anbefales at der udarbejdes en journal i forbindelse med øvelserne. Den skal ikke afleveres eller godkendes. Journalen skal ikke fremlægges ved eksaminationen, men det må forventes at der kan blive stillet spørgsmål til konklusioner fra øvelsen.

## Indhold

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Symboler .....           | 1 |
| Baggrundsmateriale ..... | 2 |
| Testopstilling .....     | 4 |
| Analyse .....            | 5 |
| Målinger .....           | 5 |
| Resultatbehandling ..... | 6 |

## Symboler

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| $\Delta U_F$ | Spændingsdifferens                             | $\Delta U_F = U_{F2} - U_{F1}$               |
| $I_F$        | Diodens strøm i lederetning (anode til katode) | $I_F = I_S \exp(U_F/nU_T)$                   |
| $I_S$        | Diodens mætningsstrøm                          | $10^{-25} \dots 10^{-3} \text{ A}$           |
| $k$          | Boltzmanns konstant                            | $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$           |
| $q_0$        | Elementarladningen                             | $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$             |
| $n$          | Idealitetsfaktor                               | $n = 1 \dots 2$                              |
| $R_{DC}$     | Testopstillingens belastnings modstand         |  |
| $R_D$        | Diodens interne DC modstand                    | $R_D = U_D - U_F / I_F$                      |
| $R_M$        | Voltmeterets indgangsmodstand                  | $R_M \approx 10 \text{ Mohm}$                |
| $T_{amb}$    | Omgivelsestemperatur                           | $T \approx 300 \text{ K}$                    |
| $U_D$        | Diodens spændingsfald i lederetning            | $U_D = U_F + R_D I_F$                        |
| $U_{DC}$     | Testopstillingens spændingsforsyning           |  |
| $U_F$        | Diodens spændingsfald i lederetning            | $U_F \approx nU_T \ln(I_F/I_S)$              |
| $\Delta U_F$ | Ændring i spændingsfald                        | $\Delta U_F \approx nU_T \ln(I_{F2}/I_{F1})$ |
| $U_T$        | Temperaturspænding (26 mV ved 300 K)           | $U_T = kT/q_0$                               |

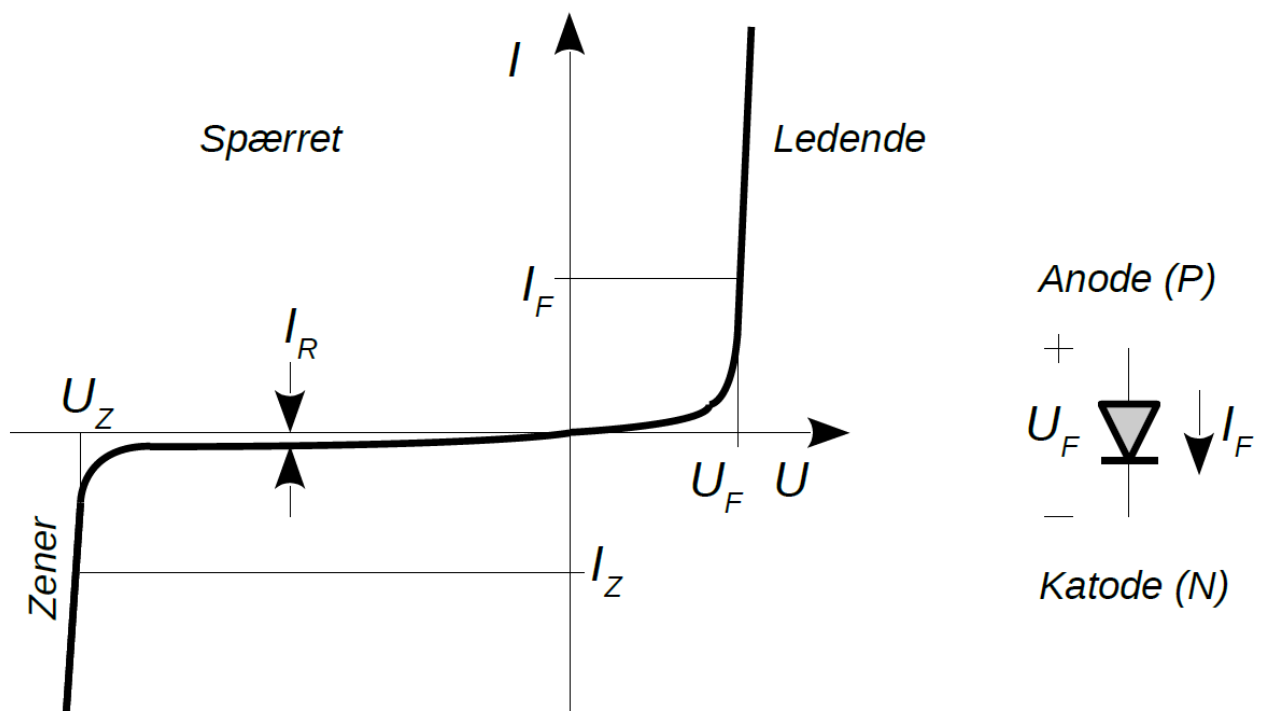
Formålet med denne øvelse er at måle spænding-strømkarakteristikken for en eller flere dioder og bruge resultaterne til at bestemme parametre fra de teoretiske modeller.

Først præsenteres kort den relevante teori, herefter beskrives forsøgsopstillingen, og herefter hvordan målinger og beregninger skal udføres.

Det anbefales at resultaterne vises på grafer, f.eks. i Excel eller på papir da det er med til at øge forståelsen.

## Baggrundsmateriale

I den ledende retning har dioden en eksponentiel spændings-strømkarakteristik. I den spærreretning løber der kun en ubetydelig strøm indtil spændingen over dioden bliver så stor at PN overgangen bryder sammen og strømmen vokser stærkt.



Figur 1: TV - Diodens spændings-strømkarakteristik opdelt i ledeområde og spærreområde. TH: Logisk symbol for en diode.

Vi er typisk mest interesserede i detaljeret viden om dioden i lederetningen. I dette område beskrives spændings-strømkarakteristikken ofte som en eksponentiel relation:

$I_F$  er strømmen i dioden i lederetningen (A)

$U_F$  er spændingsfaldet over dioden (V)

$$I_F = I_S \exp\left(\frac{U_F}{n U_T}\right)$$

eller

$$U_F = n U_T \ln\left(\frac{I_F}{I_S}\right)$$

hvor

$I_S$  er mætningsstrømmen (materialeparameter)

$n=1\dots 2$  er idealitetsfaktoren

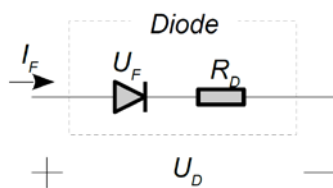
$U_T \approx 26$  mV er temperaturspændingen

$k=1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K er Boltzmanns konstant

$T$  = er den absolutte temperatur (K)

$q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C er elementarladningen

Ved tilstrækkelig stor strøm i dioden bliver det målte spændingsfald over dioden  $U_D$  større end den teoretiske værdi  $U_F$  og stigningen beskrives ved at inkludere en modstand  $R_D$  for halvlederen.



$$U_D = U_F + R_D I_F$$

hvor

$U_D$  er målte spænding over dioden

$U_F$  er den logaritmiske model ovenfor

$I_F$  er strømmen gennem dioden

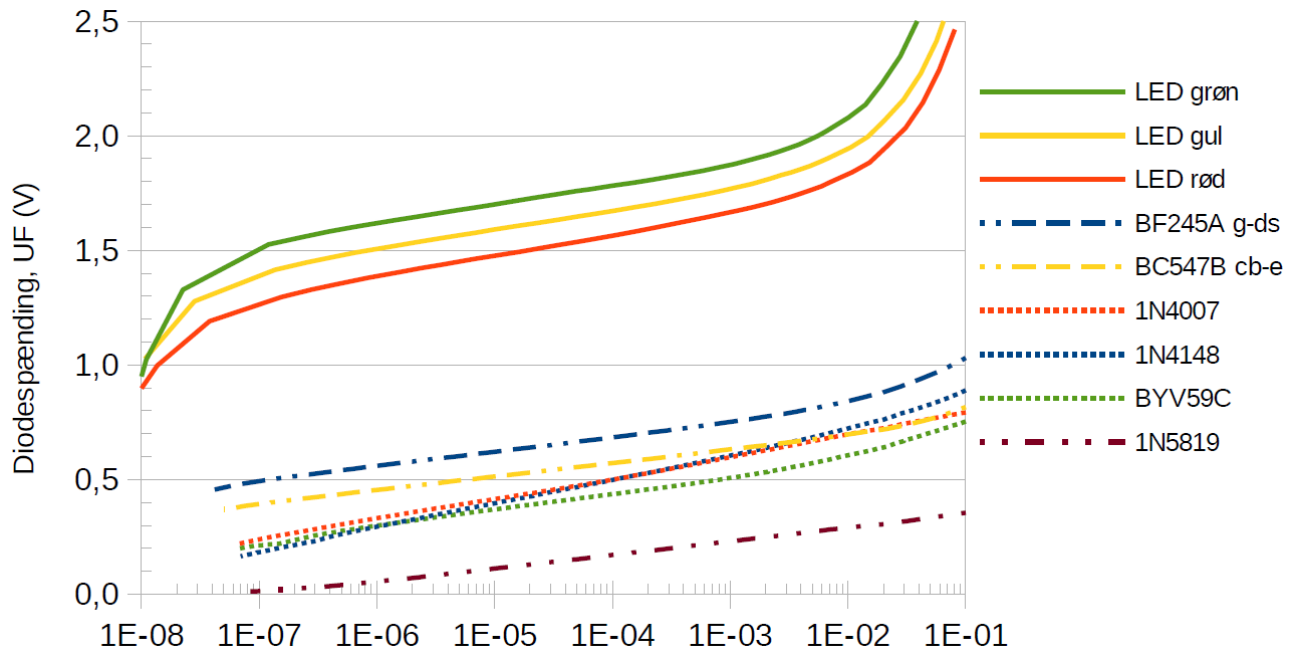
$R_D$  er diodens DC modstand

Modstanden kaldes på engelsk for en bulk resistance og værdien er ikke konstant så det er en tilnærmelse at kalde det for "en modstand". Det betyder at værdien skal bestemmes ved den strømstyrke som dioden aktuelt skal anvendes ved. Det har betydning ved dimensionering af kredsløb hvor dioden skal lede en stor strøm som fx ensrettere for effektforsyninger og DC-DC konvertere.

Herunder vises måling af spændingsfaldet for et antal dioder som funktion af strømmen. Bemærk at x-aksen er logaritmisk!

- I området fra 100 nA til 3 mA er kurverne næsten rette linjer og spændingen  $U_F$  (som jo afhænger logaritmisk af strømmen) er tilnærmelsesvis lineær.
- Hældningen på 60 til 120 mV per dekade ændring i strømstyrken illustrerer virkningen af idealitetsfaktoren  $n$ .
- Mætningsstrømmen  $I_S$  står for den lodrette forskydning.
- Ved høj strømstyrke ses indvirkningen af  $R_D$  ved at kurverne krummer opad.

Usikkerheden fra målingen er betydende under 100 nA hvor forløbet kan ikke tilskrives dioden.

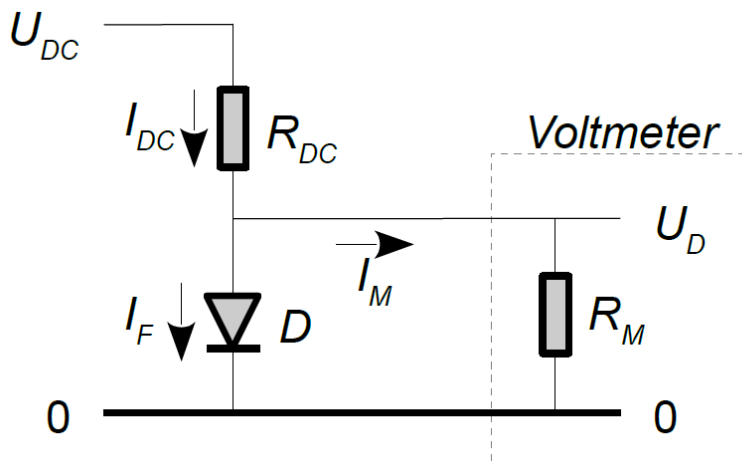


Figur 2: Målinger af dioders spændingsfald som funktion af strømmen når de operere i lederetningen. Eksemplerne dækker lysdioder med tre farver, dioder dannet af transistorer (BF245A og BC547B), almindelige siliciumdioder (1N4007, 1N4148, BYV59C), samt en Shottky diode (1N5819). Målinger udført af Tore Skogberg.

## Testopstilling

Som testobjekt vælges en diode som findes i laboratoriet. Det er egentlig ikke så vigtigt hvilken og I er mere end velkomne til at teste flere dioder. Det sikre valg vil være en 1N4148. I må meget gerne sammenligne resultaterne mellem grupperne.

Testopstillingen består af en effektforsyning med spændingen  $U_{DC}$  som gennem en modstand  $R_{DC}$  driver en strøm i dioden D og spændingen måles med et voltmeter der herunder repræsenteres af modstanden  $R_M$  for dets indgangsmodstand. Modstanden  $R_{DC}$  består af nogle diskrete modstande der udskiftes undervejs i måleforløbet for at indstille strømmens værdi. Der er ikke behov for præcis indstilling af strømmen, men der er behov for at beregne den aktuelle værdi af strømmen med god præcision.



Figur 3: Måleopstilling til måling af diodens karakteristisk. Spændingen  $U_{DC}$  og modstanden  $R_{DC}$  indstiller diodens strøm  $I_F$ . Spændingen over dioden  $U_D$  måles med et voltmeter. Modstanden  $R_M$  repræsenterer indgangsmodstanden på voltmeteret.

Af hensyn til præcisionen anbefales det at benytte et godt DC voltmeter og der skal tilstræbes en målenøjagtighed på  $\pm 1$  mV. Brug tid til at se om visningen er stabil inden data noteres. Voltmeteret benyttes både til at måle effektforsyningens spænding  $U_{DC}$  og diodens spændingsfald  $U_D$ . Det anbefales at  $U_{DC}$  måles både ved start og slut af målingen for at dokumentere at værdien ikke har ændret sig undervejs.

## Analyse

**Opgave 1** (udledning): Antag at  $I_M$  er meget lille og lave en formel der udregner strømmen  $I_F$  i dioden hvis man kender forsyningsspændingen  $U_{DC}$ , diodespændingen  $U_D$  og belastningsmodstanden  $R_{DC}$ .

**Opgave 2** (vurdering): Find indgangsmodstanden  $R_M$  på det valgte voltmeter i databladet og vælg en fornuftig forsyningsspænding som vil kunne bruges ved alle eksperimenterne (argumenter). Lav herefter et overslag over den laveste tilladelige værdi af strømmen  $I_F$  hvorunder voltmeteret vil påvirke målingen med mere end 1 %.<sup>1</sup>

## Målinger

Formålet med målingerne er at finde strøm-spændingskarakteristikken for den valgte diode.

**Opgave 3** (måling) Strøm-spændingskarakteristik

Spændingen over dioden måles med voltmeteret og så kan strømmen gennem dioden beregnes på baggrund af viden om belastningsmodstanden  $R_{DC}$  og forsyningsspændingen (dem du fik frem i opgave 1). Dvs. ved at tage en måling af diodespændingen ved én given modstand har man et punkt i strøm-spændingskarakteristikken.

<sup>1</sup> For  $R_M = 10$  M $\Omega$  vil grænsen for hvornår voltmeteret påvirke målingen med mere end 1% være i omegnen af 5  $\mu$ A

Ved at udføre målinger med forskellige modstande (men  $U_{DC}$  konstant) opnås forskellige diodespændinger og derved forskellige diodestrømme, og herved kan man få flere punkter på sin strøm-spændingskarakteristik. Det er ikke kritisk at få specifikke punkter i sin strøm-spændingskarakteristik, men man skal sikre sig at de dækker et rimeligt interval fra den mindste strøm som kan måles uden usikkerhed til en stor strøm (vær opmærksom på hvad komponenterne kan klare!). Vi vil meget gerne se at kurven "krummer opad" når diodemodstanden begynder at have effekt (se Figur 2). Antallet af målinger bestemmer I selv, men et sted i nærheden af 5-10 målinger er ikke helt tosset.

Det er naturligvis svært at forudse hvilken modstand man skal vælge ved første måling (da man jo ikke kender karakteristikken endnu), men hvis man først beslutter sig for en strøm – 10 gange sin minimumsstrøm, og så antager en spænding på 0,6 V rammer man nok ikke helt ved siden af.

Det er nemmest at analysere resultaterne hvis strømmen plottes logaritmisk.

## Resultatbehandling

Den eksponentielle model beskriver den lineære del af karakteristikken (forudsat at strømmen er vist logaritmisk). Derfor bruges kun den lineære del af kurven fra opgave 3 til at finde parametrene  $n$  og  $I_s$  for den eksponentielle model.

### Opgave 4 (beregninger). Parameterbestemmelse

For at bestemme parametrene  $n$  og  $I_s$  til den eksponentielle model udvælges to punkter på den lineære del af grafen (ikke den som blev taget ved højere temperatur). Punkterne skal være tilpas langt fra hinanden til at måleunøjagtighed ikke er et problem men også således at de begge er inden for det lineære område. Brug ingeniørmæssig bedømmelse.

Brug formlerne herunder til at bestemme parametrene  $n$  og  $I_s$

$$n = \frac{U_{D2} - U_{D1}}{U_T \ln\left(\frac{I_{F2}}{I_{F1}}\right)}, \quad I_s = \frac{I_{F1}}{\exp\left(\frac{U_{D1}}{n U_T}\right)}$$

hvor "1" og "2" indikerer de to målepunkter.  $U_T$  kan estimeres ud fra rumtemperaturen<sup>2</sup>.

### Opgave 5 (beregninger): Hældning

Oftentimes taler man om den spændings ændring man får ved at strømmen ændres en dekade (gange 10). Brug de fundne parametre  $n$  og  $I_s$  til at beregne spændingsændringen i dioden pr dekade <sup>3</sup>strømændring.

$$\Delta U_F = U_{F1} - U_{F2} = n U_T \ln\left(\frac{I_{F2}}{I_{F1}}\right) \quad \text{hvor } r \frac{I_{F2}}{I_{F1}} = 10$$

Passer det med hældningen på den målte strøm-spændingskarakteristik?

<sup>2</sup> Omtrentlige værdier:  $n = 1,0$  for 1N5819 og BC547 med kollektor og basis kortsluttet,  $n = 1,1$  for BYV59C og for en BF245C med source og drain kortsluttet,  $n = 1,4$  for 1N4007 og  $n = 1,7$  for 1N4148. Mætningsstrømmen  $I_s$  er af størrelsesordenen  $10^{-25}$  A for lysdioder,  $10^{-15}$  A for silicium og  $\approx 10^{-4}$  A for Shottky.

<sup>3</sup> Den laveste værdi er  $\Delta U_F = 60$  mV/dekade for  $n = 1$  og den højeste værdi er  $\Delta U_F = 120$  mV/dekade for  $n = 2$ .

**Diodens DC modstand  $R_D$** 

Når strømmen er tilpas høj giver diodens interne modstand et spændingsfald som modelleres som en modstand  $R_D$ . Hvis strømmen er vist logaritmisk modstanden gøre at spændingen "krummer opad". Vi skal nu forsøge at estimere en værdi for denne modstand.

Betragt to punkter på den målte karakterstik: 1) hvor kurven ikke "krummer opad" og 2) hvor kurven "krummer opad".

Hvis den interne modstand IKKE havde været væsentlig ville spændingen i punkt 2 have være givet ved:

$$U_{F2,est} = nU_T \ln\left(\frac{I_{F2}}{I_{F1}}\right) + U_{F1,est}$$

Hvis punkt 1 er på den lineære del af kurven kan man antage at den interne modstand er lille og derved kan vi antage at  $U_{F1,est} \sim U_{F1,m\ddot{a}lt}$

Spændingsfaldet over modstanden  $U_{RD2}$  er da forskellen mellem den totale (målte) spænding over dioden  $U_{F1,m\ddot{a}lt}$ , målt og den spænding som forudsiges af den eksponentielle model  $U_{F2,est}$ :

$$U_{RD2} = U_{F2,m\ddot{a}lt} - U_{F1,est}$$

**Opgave 6** (beregning): Beregn et estimat af  $R_D$ 

Beregn nu et estimat for  $R_D$ <sup>4</sup>:

$$R_D = \frac{U_{RD2}}{I_{F2}} = \frac{U_{F2,m\ddot{a}lt} - U_{F1,est}}{I_{F2}}$$

---

<sup>4</sup> Afhængig af valget af diode vil DC modstanden kunne forventes inden for området fra 0,1  $\Omega$  til 10  $\Omega$ . For dioder til store strømme kan værdien være angivet i databladet.