

## Elektrisk ledningsevne i to dimensioner

Læs vejledningen i den anden konvolut, før du starter på denne opgave.

### Indledning

I forsøg på at udvikle næste generation af instrumenter baseret på halvlederteknologi som computer-chips og solceller, leder forskere efter materialer der udviser specielle elektriske egenskaber som fx lav resistans. Måling af disse egenskaber udføres med makroskopiske prøver med kontaktpunkter med endelige størrelser. Sådanne effekter må betragtes for at udlede præcise materialeegenskaber. Desuden vil tyndfilm opføre sig anderledes end tykkere prøver af materialet.

I denne opgave skal vi undersøge hvordan man kan måle elektriske egenskaber. Vi vil benytte 2 forskellige definitioner:

- **Resistans  $R$ :** Den elektriske resistans er egenskab ved en prøve eller et apparat. Det er en størrelse som måles for en bestemt prøve med givne dimensioner.
- **Resistivitet  $\rho$ :** Resistiviteten er en materialekonstant. Den afhænger af selve materialet samt ydre størrelser som fx temperatur, men den afhænger ikke prøvens geometriske udstrækning.

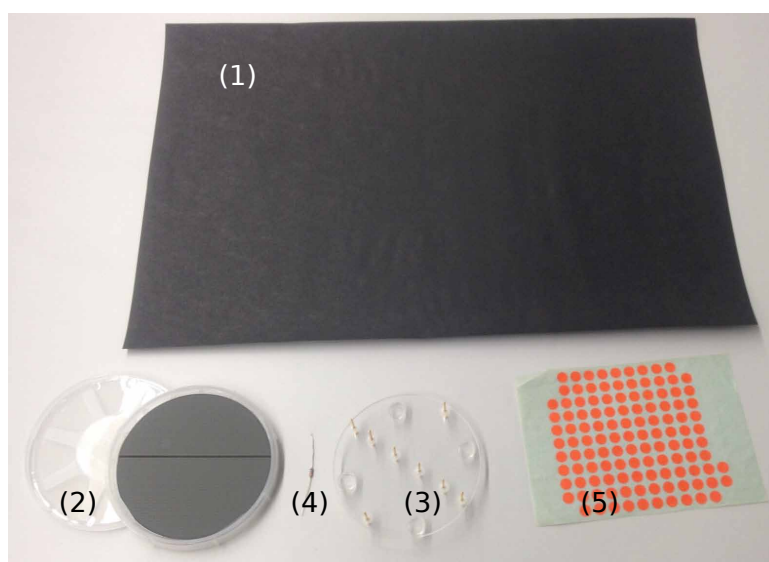
Vi skal specielt måle den såkaldt tyndfilmsresistivitet. Det vil sige resistiviteten divideret med tykkelsen af tyndfilmen.

Vi skal undersøge betydningen af følgende parametre for resistansen af en tyndfilm af et materiale:

- Kredsløbsmåling,
- Geometriske størrelser som fx afstande mm.,
- Prøvens geometriske dimensioner.

Et ark papir belagt med en ledende tyndfilm samt en coated siliciumskive er de tyndfilmsprøver, vi skal bruges.

## Udstyr



Ekstraudstyr

1. Papir belagt med en grafittyndfilm
2. En siliciumskive belagt med en tyndfilm af krom (Cr) anbragt i en holder
3. Plexiglasskiver med 8 kontakter forsynet med fjedre
4. En ohmsk resistor
5. Farvede klistermærker

## Vær særlig forsigtig med

- Siliciumskiven kan knække hvis den tabes eller bøjes. Undgå at ridse eller berøre den blanke side.

## Vejledning

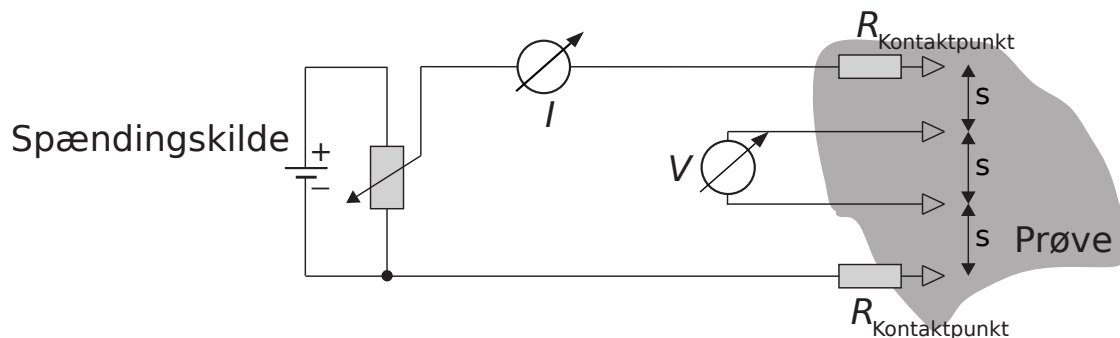
- I dette forsøg bruges signalgeneratoren som en jævnspændingskilde (DC).  
Signalgeneratoren giver en konstant spænding mellem polen, *VOLTAGE* (5) og jord, *GND* (7); tallene henviser til billedet i den generelle instruktion.
- Spændingen (0- 5 V) kan indstilles i venstre potentiometer, *adjust voltage* (3). Benyt skruetrækkeren.
- Når du udfører dette forsøg, skal du sørge for at tonegeneratorrendelen af signalgeneratoren er slukket. Dette kan du sikre dig ved at se om spændingen mellem højttalerudgangen, *Speaker amplitude* (6) og jord, *GND* (7) er nul.

## Del A. 4-punktsmålinger (4PP) (1.2) points)

For bestemme resistiviteten præcist af en prøve, bør kontaktpunkterne til spændingsfaldsmålingen og kontaktpunkterne til strømkilden være adskilt.

Denne teknik kaldes 4-punktsmålinger (4PP). De fire kontaktpunkter er anbragt i en simpel, geometrisk konfiguration. To kontakter bruges til at sende strøm  $I$  ind og ud af tyndfilmen, andre to bruges til at måle spændingsfald  $V$  over dem.

Særligt simpel er situationen når man benytter 4 kontakter på linje med samme afstand  $s$  mellem nabo-kontakter: De to nærmest centrum benyttes til at måle spændingsfald, mens de næste to på hver side bruges til at sende strøm ind og ud af tyndfilmen, se figur:



Grafen  $I$  versus  $V$  er  $I - V$ -karakteristikken for prøven, som muliggør bestemmelse af resistansen af prøven. I det følgende benyttes kun 4-punktsmålinger. Først benyttes de 4 inderste som er monteret lineært og ækvivalent.

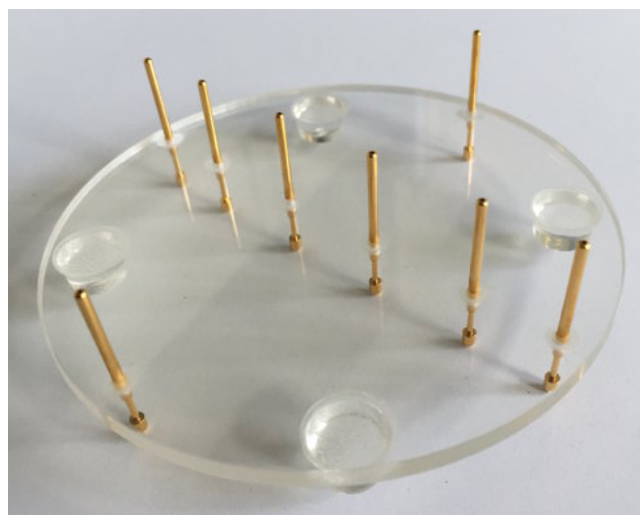


Figure 2: Plexiglasskive til 4-punktsmåling med 4 gummifødder og 8 kontaktstifter.

Til den følgende måling, brug et helt ark papir med ledende tyndfilm.

## Vigtige hints for følgende måling:

- De fire kontaktpunkter skal ligge på en linje parallel med den lange kant af papiret.
- Den sorte side er den ledende side af papiret og skal vende opad.
- Tjek at papiret er intakt uden er huller eller brud.
- Placér nu skiven med kontakterne så tæt på papirets centrum som muligt.
- Pres nu skiven ned så der opnås god forbindelse til kontaktstifterne. Plastiskfødderne skal netop lige berøre overfladen.

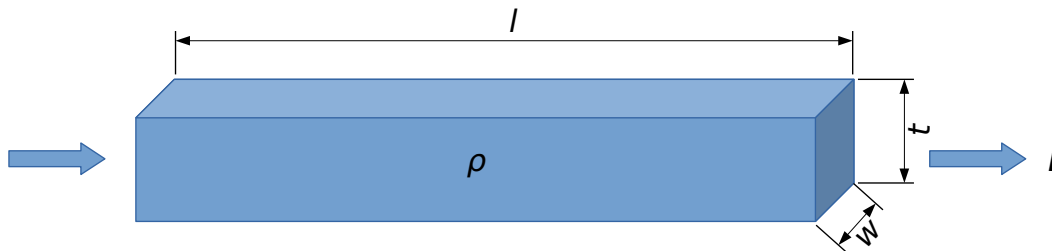
<b>A.1</b>	4-punktsmåling: Mål spændingsfaldet $V$ over midterstykket af længde $s$ som funktion af strømmen $I$ . Udfør i alt 4 målinger af strømmen. Lav en tabel og en graf over spændingsfaldet $V$ versus strømmen $I$ i <b>Graf A.1</b> .	0.6pt
------------	--	-------

<b>A.2</b>	Bestem resistansen $R = \frac{V}{I}$ ved hjælp af <b>Graf A.1</b> .	0.2pt
------------	---	-------

<b>A.3</b>	Benyt <b>Graph A.1</b> til at bestemme usikkerheden $\Delta R$ for resistansen $R$ .	0.4pt
------------	--	-------

## Del B. Tyndfilmsresistivitet (0.3 points)

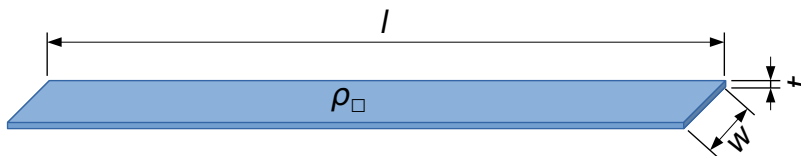
Resistivitet er en materialekonstant med hvilken resistansen af en 3D-leder med givne dimensioner af længde, bredde og tykkelse kan beregnes.



Resistansen  $R$  for den viste, tykke bjælke er givet ved

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

På denne baggrund kan vi definere resistansen af en 2D-leder med meget lille tykkelse:  $t \ll l$



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

ved brug af tyndfilmsresistiviteten  $\rho_{\square} \equiv \rho/t$  ("rho box"). Enheden er Ohm:  $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$ .

**Vigtigt:** Ligning 2 gælder kun for homogen strømtæthed og konstant spændingsfald i tværsnit af strømretningen. Denne forudsætning holder ikke nær en punktformig kontakt. Man kan derimod vise at tyndfilmsresistiviteten er forbundet med resistansen via

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

når  $l, w \gg t$ .

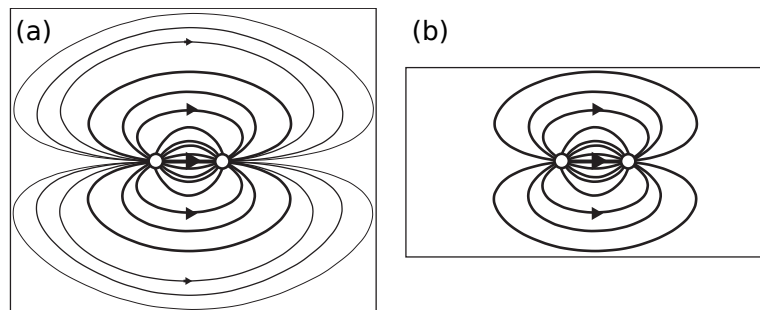
- B.1** Beregn tyndfilmsresistiviteten  $\rho_{\square}$  for papiret ud fra 4-punktsmålingen i Del A. 0.3pt  
Vi kalder denne specielle værdi  $\rho_{\infty}$ , og vi kalder den målte resistans fra Del A for  $R_{\infty}$  idet hele arket opfylder at afstanden  $s$  mellem de to centrale kontakter, opfylder  $l, w \gg s$ .

## Del C. Målinger med forskellige prøvedimensioner (3.2 points)

Indtil nu har dimensionerne bredde  $w$  og længde  $l$  ikke været taget i betragtning.

Hvis tyndfilmen beskæres, bliver strømmen mindre med samme spændingsfald. Når man påtrykker en spænding mellem de to hvide cirkler, vil strømmen fordele sig i alle retninger og følge mange forskellige baner som ikke krydser hinanden. Tykkere streger på skitserne antyder at strømtætheden er større her end andre steder; jo længere strømlinje jo svagere strømtæthed.

Hvis vi med samme spændingsfald bruger et beskåret ark (b), vil den samlede strøm falde, fordi der er færre mulige strømlinjer. Hermed vil man måle en forøget resistans.



Tyndfilmsresistansen vil ikke ændres når prøven beskæres. Derfor må vi indføre en korrektionsfaktor  $f(w/s)$ , som omregner målt resistans til resistivitet. Af ligning (3) fås nu

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)}. \quad (4)$$

For en tyndfilm med længde  $l \gg s$  vil faktoren  $f$  kun afhænge af forholdet  $w/s$ , og den er større end 1:  $f(w/s) \geq 1$ . For at forenkle ser vi kun på afhængigheden af bredden  $w$  og forudsætter at længden er tilstrækkelig lang for vores målinger.

Vi antager at værdien nærmer sig den korrekte værdi  $\rho_{\square}$  når bredden bliver stor.

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{med} \quad f(w/s \rightarrow \infty) \rightarrow 1.0. \quad (5)$$

**C.1** Ved brug af 4-punktsmålinger skal du måle resistansen  $R(w, s)$  for 4 værdier af  $w/s$  i området 0.3 til 5.0. Angiv dine resultater i **Tabel C.1**. Sørg for at længden er mindst 5 gange længere end afstanden mellem to af kontaktpunkterne:  $l > 5s$  og at længden  $l$  af arket altid går i samme retning af papiret. For enhver værdi af  $w/s$  skal du måle spændingsfaldet for 4 forskellige strømsstyrker og beregn den gennemsnitlige resistans  $R(w/s)$  fra de 4 målinger. Angiv dine resultater i **Tabel C.1**. 3.0pt

**C.2** Beregn  $f(w/s)$  for hver af dine målinger. 0.2pt

## Del D. Geometrisk korrektionsfaktor: skaleringsloven (1.9 points)

I Del C har vi set at den målte resistivitet skales med forholdet bredde/kontaktafstand, altså  $w/s$ . Med

udgangspunkt i data opnået i Del C, kan vi vælge en funktion til at beskrive data i det aktuelle område:

$$\text{Modelfunktion: } f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

Bemærk at for store værdier af  $w/s$ , bliver  $f(w/s) = 1.0$ .

<b>D.1</b>	Vælg et passende grafpapir (linær <b>Graf D.1a</b> , semi-logaritmisk <b>Graf D.1b</b> eller dobbelt-logaritmisk <b>Graf D.1c</b> ), for at fitte en modelfunktion med ligning 6 og data vedrørende $f(w/s)$ , indhentet fra Del C.	1.0pt
------------	---	-------

<b>D.2</b>	Find parametrene $a$ og $b$ fra dit fit.	0.9pt
------------	--	-------

## Del E. Siliciumskiven og van der Pauw-metoden (3.4 points)

I halvlederindustrien er viden om tyndfilmsresistans af halvledere og tynde metalfilm meget vigtigt fordi det kan bruges til at bestemme egenskaber for komponenter. I den følgende opgave arbejdes med en siliciumskive som er belagt med et meget tyndt lag krom (Cr) på den blanke side. Åben siliciumskivebeholderen (Drej i pilens retning *RELEASE*) og tag siliciumskiven ud forsigtigt uden at tabe, ride eller knække den og uden at berøre den blanke side. Placér den på bordet med den blanke side opad.

**E.1** Benyt samme 4-punktsmålingsopstilling som tidligere til at bestemme spændingsfaldet  $V$  som funktion af strømmen  $I$ .  
Skriv din siliciumskives referencenummer ned på dit svarark. Det findes på siliciumskivebeholderen. 0.4pt

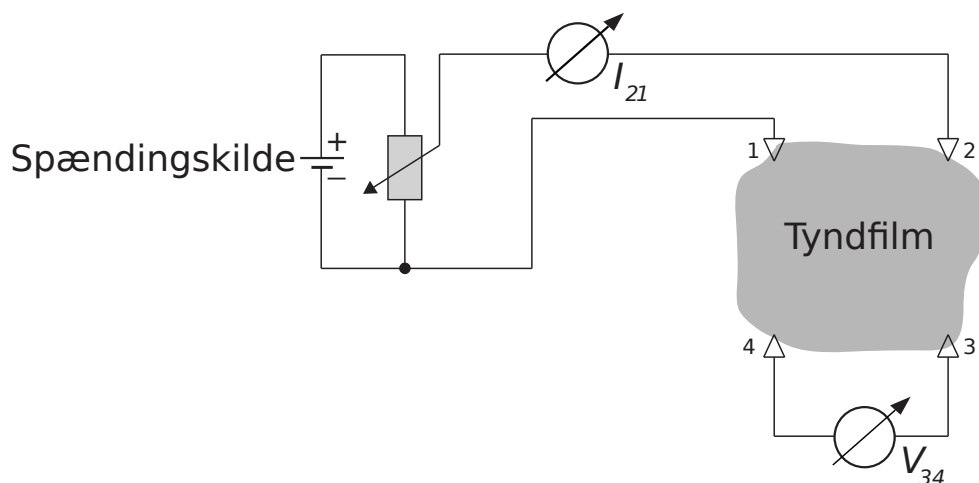
**E.2** Plot dine data i **Grap E.2** og bestem resistansen  $R_{4PP}$ . 0.4pt

**E.3** For at bestemme korrektion for en cirkulær skive, approksimerer vi den med en effektiv bredde  $w$  lig med diameteren  $D = 100 \text{ mm}$ . Beregn under denne forudsætning forholdet  $w/s$ . Brug den fittede funktion fra ligning 6 og dine parametre  $a$  og  $b$  for at bestemme korrektionsfaktoren  $f(w/s)$  for målingerne på skiven. 0.2pt

**E.4** Beregn ved hjælp af ligning 4 tyndfilmsresistiviteten  $\rho_{\square}$  for krombelægningen (Cr). 0.1pt

Philips ingnøren L.j. van der Pauw udviklede en simpel metode til at måle tyndfilmsrestivitet uden brug af geometriske korrektioner:

De fire kontaktstifter nummereret 1,2,3 og 4 fastgøres til randen af en enkelt sammenhængende (dvs. uden huller) prøve af filmen med vilkårlig form som vist på figuren. Strømmen løber ind fra punkt 1 og ud ved punkt 2. Spændingsfaldet måles over punkt 3 og 4. Se figur. Dette giver resistansen  $R_{I,V} = R_{21,34}$ .

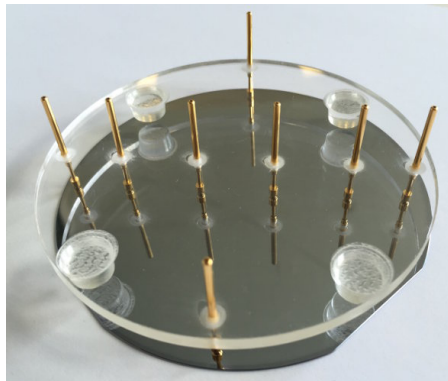


Af symmetri Grunde gælder  $R_{21,34} = R_{34,21}$  og  $R_{14,23} = R_{23,14}$ .



Van der Pauw viste at for en tyndfilm af vilkårlig enkeltsammenhængende (ingen huller) form gælder

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \quad (7)$$



Figur 3: Plexiglasskiven til 4-punktsmåling på den blanke side. Bemærk afskæringen i højre side. Denne afskæring kaldes *sekant*.

Tilslut de 4 fjederkontakter sådan målestifterne danner et kvadrat. Tilslut to nabostifter til strømkilden med amperemeteret og de andre to nabostifter til volmeteret. Placér plexiglasskiven så én af kvadratets kanter er parallel med sekanten.

<b>E.5</b>	Skitsér strømningkurver fra de to stifter der er tilsluttet strømkilden samt orienteringen af sekanten. Mål spændningsfaldet $V$ for mindst 6 forskellige værdier af strømmen $I$ , med nogenlunde jævnt fordelte værdier. Noter dine resultater i <b>Tabel E.5</b> .	0.6pt
<b>E.6</b>	Gentag forsørgt hvor du har drejet plexiglasskiven 90 grader. Anfør dine resultater i <b>Tabel E.6</b> .	0.6pt
<b>E.7</b>	Plot alle data sammen på en enkelt graf <b>Graf E.7</b> med forskellige farver og/eller symboler. Bestem middelværdien $\langle R \rangle$ fra de 2 kurver.	0.5pt
<b>E.8</b>	Erstat alle resistanser $R_{kl,mn}$ med $\langle R \rangle$ , løs ligning 7 for $\rho_{\square}$ og beregn tyndfilmsresistiviteten $\rho_{\square}$ for tyndfilmen.	0.4pt
<b>E.9</b>	Sammenlign resultaterne fra målingerne med den lineære konfiguration ( <b>E.4</b> ) med resultaterne med Van der Pauws metode ( <b>E.8</b> ). Angiv den relative afvigelse mellem de 2 resultater i procent.	0.1pt

**E.10** Kromfilmen tykkelse er angivet som 8 nm. Brug denne værdi og dit endelige resultat fra van der Pauw metoden til at beregne Kroms resistivitet med ligning 1 og 2. 0.1pt