

Conductivitatea electrică în două dimensiuni (10 puncte)

Înainte de a începe această problemă, te rugam să citești instrucțiunile generale, aflate într-un plic separat.

Introducere

În scopul dezvoltării generațiilor următoare de dispozitive bazate pe tehnologiile cu semiconductori, cum ar fi procesoarele sau celulele solare, cercetătorii caută materiale care manifestă proprietăți speciale de transport, ca de exemplu o rezistivitate electrică scăzută. Măsurările acestor proprietăți sunt făcute folosind probe de dimensiuni finite, contacte cu rezistență de contact finită și geometrii speciale. Aceste lucruri trebuie luate în considerare în vederea determinării proprietăților reale ale materialelor. Adesea, un strat subțire dintr-un material se comportă diferit față de materialul masiv.

În această sarcină de lucru, vei studia măsurarea proprietăților electrice. Vei folosi două definiții diferite.

- **Rezistența R :** Rezistența este o proprietate electrică a unei probe sau a unui dispozitiv. Ea este mărimea pe care o măsurăm la o probă cu dimensiuni date.
- **Rezistivitatea ρ :** Rezistivitatea este o proprietate de material care determină rezistența. Ea depinde de material și de parametri externi, ca de exemplu de temperatură, dar nu depinde de geometria probei.

În particular, vei măsura așa numita *rezistivitate de suprafață*. Aceasta este rezistivitatea împărțită la grosimea unei probe foarte subțiri.

Vei studia influența exercitată asupra rezistenței electrice a unui strat subțire de material de următorii parametri :

- circuitistica de măsurare,
- geometria măsurării,
- și dimensiunile probei.

Probele care vor fi măsurate sunt o foaie de hârtie conductoare și o placă de siliciu acoperită cu un strat subțire metalic.

Lista materialelor

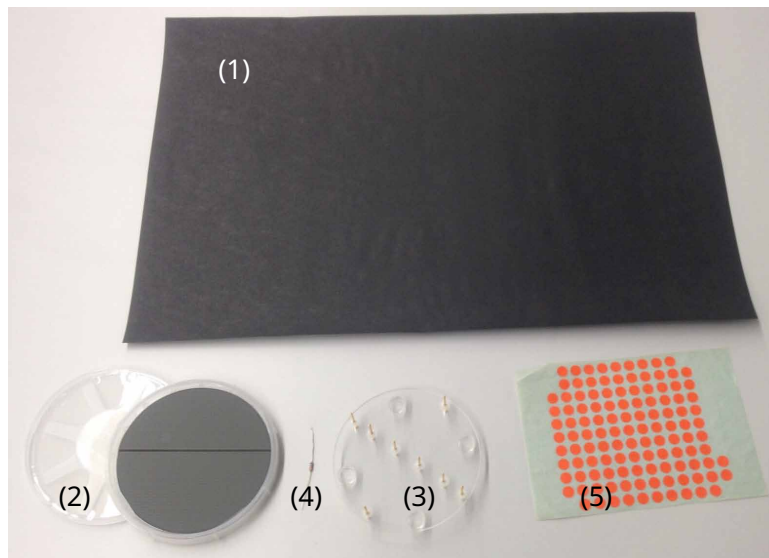


Figura 1: Echipamentul adițional pentru acest experiment

1. Hârtie conductoare, acoperită cu grafit
2. O plachetă de siliciu acoperită cu un strat subțire de crom (așezată în suportul plachetei)
3. Placă de plexiglas cu 8 ace tensionate cu resorturi
4. Un rezistor ohmic
5. Stickere colorate

Precauțiuni importante

- Bucata de siliciu care ți-a fost furnizată se poate sparge ușor, dacă este trântită sau îndoită. Nu atinge și nu zgâria suprafața metalică lucioasă.

Instrucțiuni

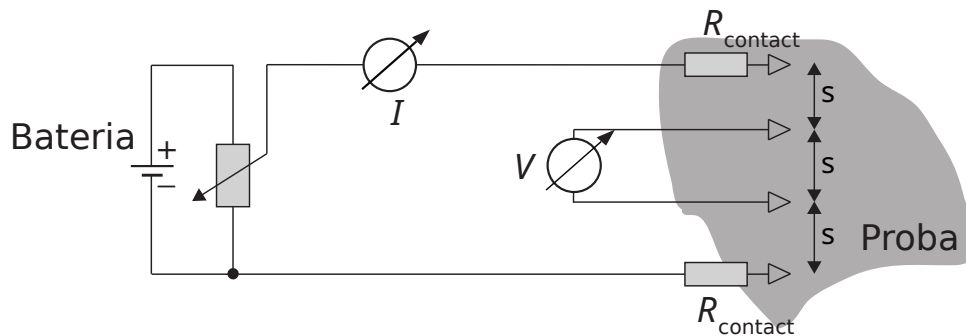
- În acest experiment, generatorul de semnal va fi folosit ca o sursă de tensiune continuă. În modul folosit, generatorul de semnal debitează o tensiune continuă între borna *voltage* (5) și borna *GND* (7). Numerele se referă la fotografia prezentată în instrucțiunile generale.
- Tensiunea (în domeniul: 0- 5 V) poate fi reglată cu ajutorul potențimetrului din stânga, inscripționat *adjust voltage* (3) prin rotirea acestuia cu ajutorul șurubelniței.
- Când efectuezi acest experiment asigură-te că secțiunea generatorului de semnal care alimentează difuzorul este decuplată, prin folosirea adecvată a întrerupătorului (8). Situația poate fi verificată, măsurând tensiunea între borna *speaker amplitude* (6) și borna *GND* (7). Dacă secțiunea de alimentare a difuzorului este oprită, tensiunea între aceste două borne este zero.

Partea A. Măsurarea cu 4 sonde în 4 puncte (4PP) (1,2 puncte)

Pentru a măsura precis rezistivitatea probei, contactele folosite pentru măsurările de tensiune și contactele folosite pentru injecția curentului trebuie să fie separate.

Această tehnică este numită măsurare cu 4 sonde în 4 puncte (4PP). Cele patru sonde sunt aranjate într-o geometrie simetrică, cât mai simplă cu putință. Curentul I intră în probă prin una dintre sondele extreme (numită sursă) și apoi curge prin toate drumurile posibile prin probă, părăsind-o printr-o altă sondă (numit drenă). Se măsoară tensiunea V între sondele aflate la o anumită distanță s pe probă.

Totul devine destul de simplu, dacă se folosește un montaj simetric, adică dacă sondele sunt dispuse la distanțe egale s ca în schița următoare:



Curba I versus V reprezintă caracteristică $I - V$ a probei și permite determinarea rezistenței probei. În cele ce urmează vei folosi numai tehnica 4PP. Pentru început vei folosi un aranjament liniar, de patru contacte *echidistante* asigurate de patru dintre cele opt ale sondei, așa cum este arătat în fotografie.

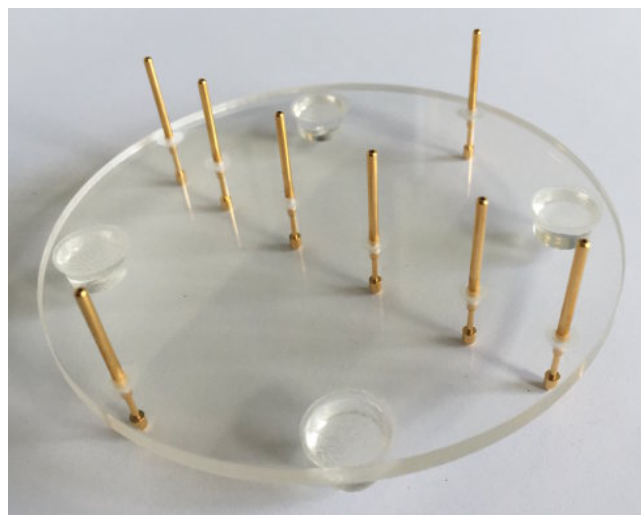


Figura 2: Placa de sticlă acrilică pentru măsurări 4PP, prevăzută cu patru picioare de cauciuc și cu opt sonde (contacte).

Pentru măsurările care urmează folosește întreaga foaie de hârtie conductoare.

Indicație importantă pentru toate măsurările care urmează:

- Latura lungă a foi de hârtie servește ca referință. Cele patru sonde trebuie aliniate paralel cu această latură.
- Folosește partea acoperită (neagră) a hârtiei și nu dosul de culoare maronie al acestei foi! Poți marca orientarea corectă cu stickerele colorate.
- Asigură-te că nu sunt găuri sau tăieturi în hârtie.
- Pentru aceste măsurări, plasează contactele (sondele) cât mai aproape cu putință de centrul probei.
- Apasă contactele (sondele) cu suficientă forță pentru a asigura un contact electric bun pentru fiecare dintre ele. Picioarele trebuie să atingă ușor suprafața.

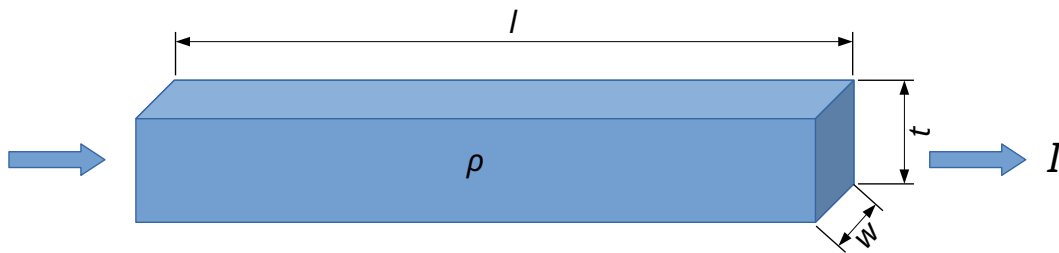
A.1	Măsurarea cu 4 sonde (4PP) : Măsoară diferența de potențial V de-a lungul segmentului de lungime s , ca funcție de intensitatea I a curentului care trece prin acest segment. Ia în total cel puțin 4 valori, construiește un tabel și trasează graficul Graph A.1 al tensiunii V ca funcție de curentul I .	0.6pt
------------	---	-------

A.2	Determină rezistența electrică efectivă $R = \frac{V}{I}$ pe care o obții din Graph A.1 .	0.2pt
------------	--	-------

A.3	Folosește Graph A.1 pentru a determina eroarea ΔR a rezistenței R din măsurarea 4PP.	0.4pt
------------	---	-------

Partea B. Rezistivitatea de suprafață (0,3 puncte)

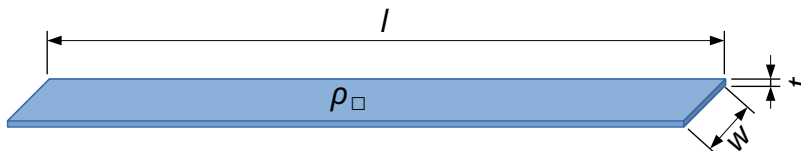
Rezistivitatea ρ reprezintă o proprietate a materialului cu ajutorul căreia se poate calcula rezistența unui conductor tridimensional 3D cu geometrie și dimensiuni date. Vei considera o bară cu lungimea l , lățimea w și grosimea t :



Rezistența electrică R a conductorului masiv din poza de mai sus este dată de:

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

Pe aceeași bază putem defini rezistența unui conductor bidimensional 2D a cărui grosime este $t \ll w$ și $t \ll l$



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

folosind rezistivitatea de suprafață $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ ("rho box"). Unitatea sa este dată în Ohms: $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$.

Important: Eq. 2 este validă numai pentru o densitate omogenă de curent și pentru un potențial constant în orice secțiune transversală plană a conductorului. În cazul contactelor punctiforme pe suprafață, relația nu mai este validă. În schimb, se poate arăta că rezistivitatea de suprafață este corelată în acest caz cu rezistența prin relația

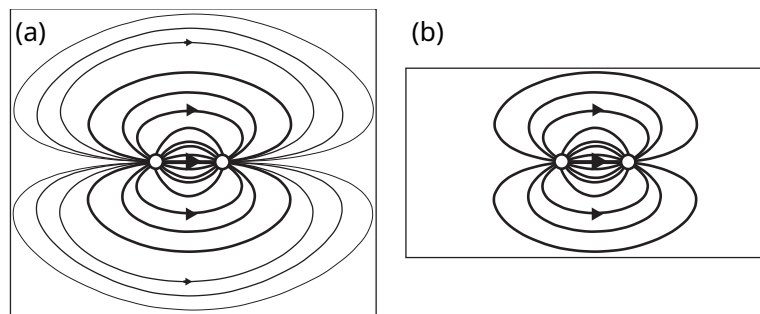
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

pentru $l, w \gg t$.

- | | |
|---|-------|
| <p>B.1 Calculează rezistivitatea ρ_{\square} a hârtiei pentru măsurările 4PP din partea A. Vei numi această valoare particulară ρ_{∞} (și vei numi R_{∞} rezistența măsurată în partea A), deoarece dimensiunile foii de hârtie întregi sunt cu mult mai mari decât distanța dintre contacte s: $l, w \gg s$.</p> | 0.3pt |
|---|-------|

Partea C. Măsurări pentru diferite dimensiuni ale probei (3,2 puncte)

Până acum nu s-a luat în considerare dimensiunile finite ale probei w și l . Dacă proba este mai mică, iar tensiunea este menținută constantă, proba permite trecerea unui curent mai mic. Dacă aplici o diferență de potențial între două contacte punctiforme (cercurile albe), curentul va trece pe toate căile posibile care nu se taie unele cu altele, urmând căile reprezentate prin linii. Cu cât liniile sunt mai lungi cu atât este mai mic curentul a cărei intensitate este indicată în desen prin grosimea liniei. Pentru o probă mică (b) și pentru aceeași tensiune aplicată curentul total descrește deoarece sunt mai puține drumuri posibile. Prin urmare, rezistența măsurată va crește.



Rezistivitatea de suprafață nu depinde de dimensiunea probei. Ca urmare, pentru a converti rezistența măsurată într-o rezistivitate, folosind ecuația 3 este necesară introducerea unui factor de corecție $f(w/s)$:

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

Pentru o probă cu lungimea $l \gg s$ factorul f depinde numai de raportul w/s și este mai mare decât 1: $f(w/s) \geq 1$. Pentru simplificare, ne vom concentra pe dependența de lățimea w și ne vom asigura că proba este suficient de lungă pentru măsurările făcute. Presupunem că valoarea determinată aproximează rezultatul corect ρ_{\square} pentru dimensiuni mari:

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

C.1 Folosind metoda 4PP măsoară rezistența $R(w, s)$ pentru 4 valori ale lui w/s în domeniul de la 0,3 la 5,0 și scrie rezultatele în **Table C.1**. Asigură-te că lungimea a probei este de cel puțin 5 ori mai mare decât distanța dintre sonde: $l > 5s$ și că lungimea l a probei este întotdeauna luată de-a lungul aceleiași laturi (cea lungă) a foi ide hârtie. Pentru fiecare valoare w/s măsoară tensiunea pentru 4 valori diferite ale curentului și calculează rezistența medie $R(w/s)$ rezultată din cele 4 măsurări. Scrie rezultatele în **Table C.1**. 3.0pt

C.2 Calculează $f(w/s)$ pentru fiecare dintre aceste măsurări. 0.2pt

Partea D. Factorul de corecție geometric: legea de scalare (1,9 puncte)

Ai văzut în partea C că rezistivitatea măsurată se modifică proporțional cu raportul lățimii la distanța dintre sonde w/s . Pornind de la datele achiziționate în partea C vei alege următoarea funcție generică

pentru a descrie datele în domeniul de măsurare:

$$\text{Generic fit function: } f(w/s) = 1,0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

De notat că pentru valori foarte mari ale raportului w/s , $f(w/s)$ trebuie să fie 1,0.

D.1	Pentru a găsi o curbă conformă ecuației 6, care să fiteze datele experimentale $f(w/s)$, obținute în partea C, alege hârtia pentru grafice potrivită (lineară pentru Graph D.1a , semi-logaritmică pentru Graph D.1b , sau dublu logaritmică pentru Graph D1.c) pentru a reprezenta grafic datele.	1.0pt
------------	---	-------

D.2	Dedu parametrii a și b ai fitului pe care îl propui.	0.9pt
------------	--	-------

Partea E. Placheta de siliciu și metoda van der Pauw (3,4 puncte)

În industria semiconductoarelor cunoașterea rezistenței electrice (de suprafață) a semiconductoarelor și a straturilor metalice subțiri este foarte importantă deoarece acestea determină proprietățile dispozitivului. În continuare, vei lucra cu o plachetă de siliciu. Placheta semiconductoare este acoperită cu un strat foarte subțire, metalic, de crom (partea lucitoare)

Deschide cutia plachetei (rotind-o în sensul săgeții RELEASE) și scoate placheta. Fii atent să nu o scapi ori să o spargi și nici să o zgârii sau să atingi suprafața lucitoare. Pentru măsurări plaseaz-o pe masă cu fața strălucitoare în sus (către tine)

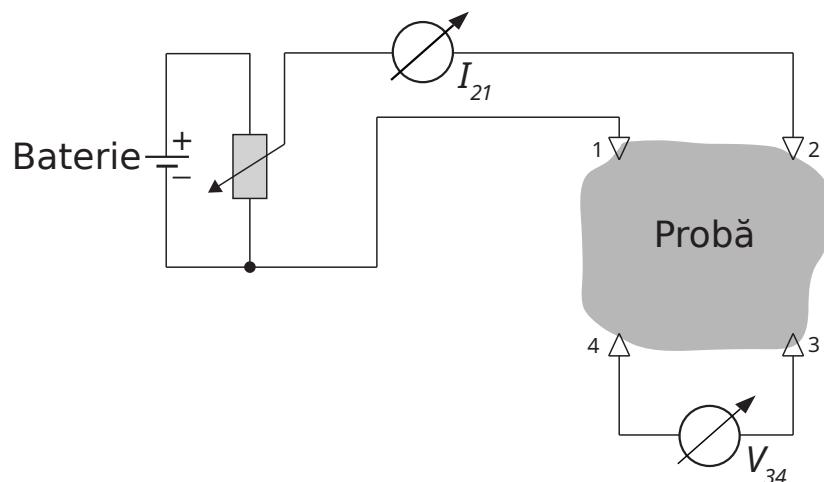
E.1 Folosește același dispozitiv 4PP ca anterior, pentru a măsoară tensiunea V ca funcție de curentul I . Scrie numărul de referință al plachetei în Foaia de Răspunsuri . Găsește acest număr pe suportul din plastic al plachetei. 0.4pt

E.2 Reprezintă grafic datele în **Graph E.2** și determină rezistența R_{4PP} 0.4pt

E.3 Pentru a determina corecția pentru o probă circulară ca placheta vei aproxima lățimea efectivă w a probei prin diametrul $D = 100$ mm al plachetei. Folosind aceste presupuneri, calculează raportul w/s . Folosește funcția de fit din Eqn. 6 și parametrii tai a și b pentru a determina factorul de corecție $f(w/s)$ pentru măsurarea plachetei. . 0.2pt

E.4 Calculează rezistivitate ρ_{\square} a stratului de crom folosind Eq. 4. 0.1pt

Pentru a măsura precis rezistivitatea de suprafață , fără fi nevoie de corecții geometrice inginerul L.J. van der Pauw de la Philips a dezvoltat o schemă de măsurare simplă. Cele 4 sonde sunt montate pe circumferința unei probe de formă arbitrară, așa cum este arătat în figură; sondele sunt numerotate de la 1 la 4. Curentul curge prin două sonde adiacente de exemplu sondele 1 și 2 iar tensiunea este măsurată între sondele 3 și 4. Măsurarea conduce la o valoare a rezistenței $R_{I,V} = R_{21,34}$.



Din motive de simetrie $R_{21,34} = R_{34,21}$ și $R_{14,23} = R_{23,14}$. Van der Pauw a arătat că pentru o formă arbitrară

dar conexă (fără goluri) pentru sonde cu contacte punctiforme este adevărată următoarea ecuație :

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

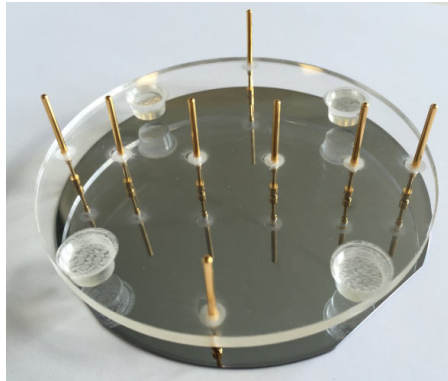


Figura 3: dispozitivul 4PP pe o plachetă de siliciu acoperită cu metal. Ai în vedere tăietura din dreapta a plachetei circulare. Această tăietură este numită flat.

Conectează cele 4 contacte cu resort astfel încât sondele de măsurare să formeze un pătrat. Conectează două sonde adiacente la sursa de curent printr-un ampermetru și conectează celelalte două contacte cu arcuri la voltmetru. Rotește pătratul astfel încât una din laturile sale să fie paralelă cu flat-ul plachetei.

E.5	Realizează o schiță a contactelor prin care trece curentul și a orientării flat-ului plachetei. Măsoară tensiunea V pentru cel puțin 6 valori diferite ale curentului I , spațiate relativ egal. Scrie rezultatele în Table E.5 .	0.6pt
E.6	Repetă procedura aranjând de această dată contactele de curent astfel încât linia lor să fie perpendiculară pe ce utilizată în etapa anterioară. Scrie rezultatele în Table E.6 .	0.6pt
E.7	Reprezintă grafic toate datele într-un singur grafic Graph E.7 folosind culori diferite și /sau semne diferite. Determină valoarea medie $\langle R \rangle$ rezultată din cele două curbe.	0.5pt
E.8	Înlocuind toate rezistențele $R_{kl,mn}$ prin $\langle R \rangle$, rezolvă Eqn. 7 pentru ρ_{\square} și calculează rezistivitatea de suprafață ρ_{\square} pentru stratul de crom.	0.4pt
E.9	Compară rezultatul măsurărilor făcute cu aranjamentul liniar (E.4) cu rezultatul măsurărilor făcute cu metoda van der Pauw (E.8). dă diferența celor două măsurări ca eroare relativă în procente.	0.1pt
E.10	Straturile de crom (Cr) au o grosime nominală de 8 nm. Folosește această valoare și rezultatele finale ale măsurărilor van der Pauw pentru a calcula rezistivitatea cromului, folosind ecuațiile 1 și 2.	0.1pt