

## Elektromos vezetőképesség két dimenzióban (10 pont)

A munka elkezdése előtt olvasd el a külön borítékban található általános utasítást!

### Bevezetés

Az új generációs, félvezető technológiára alapuló eszközök (mint például számítógép chippek vagy napelemek) fejlesztéséhez a kutatók kiemelkedő transzport tulajdonságokkal, például kis elektromos ellenállással rendelkező anyagokat keresnek. Ezeknek a tulajdonságoknak a méréséhez véges méretű mintákat, véges kontaktellenállású kontaktusokat és speciális geometriát használnak. Ezeket a hatásokat figyelembe kell venni ahhoz, hogy meghatározzák az anyagok valódi tulajdonságait. Ezen kívül egy vékonyréteg egész másképp viselkedik, mint egy tömbanyag.

Ebben a feladatban elektromos tulajdonságok mérését fogod tanulmányozni. Két különböző definíciót fogunk használni:

- **$R$  ellenállás**: Az ellenállás egy minta vagy egy eszköz elektromos tulajdonsága. Ez az a mennyiség, amelyet egy adott méretű adott mintán mérünk.
- **$\rho$  fajlagos ellenállás**: A fajlagos ellenállás egy anyagjellemző tulajdonság, amely meghatározza az ellenállást. Ez magától az anyagtól és külső körülményektől, mint például a hőmérséklet függ, de független a minta geometriájától.

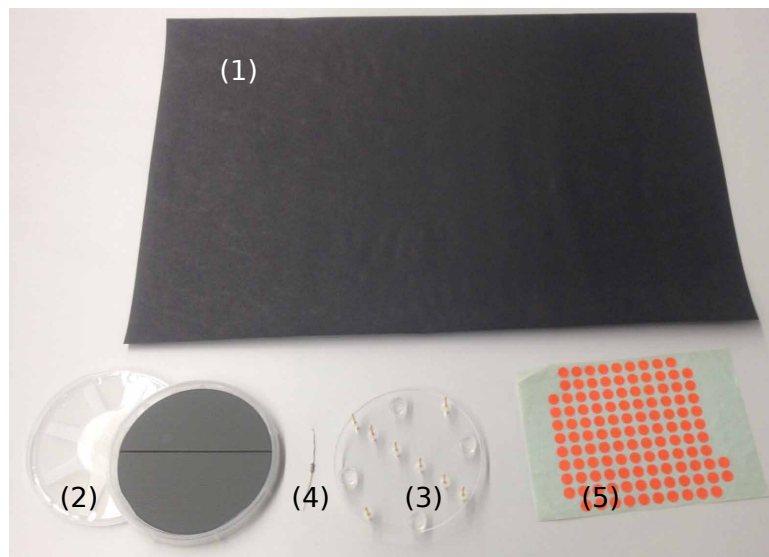
Főleg az úgynevezett *vékonyréteg ellenállást* fogod mérni. Ez a fajlagos ellenállás osztva a nagyon vékony réteg vastagságával.

A vékonyréteg anyagok eélektromos ellenállásának mérését befolyásoló következő paraméterek hatását fogjuk vizsgálni:

- a mérő áramkörök,
- a mérési geometria
- és a minta méretei.

Egy vezető papírlap és egy fémmel bevont szilícium szelet lesznek a minták.

## Az eszközök jegyzéke



1. ábra: Csak ehhez a méréshez tartozó további eszközök.

1. Grafittal borított vezető papírlap
2. Egy vékony króm réteggel beborított szilícium szelet (egy szelettartóban)
3. Plexiüveg lap 8 rugós tűvel
4. Egy ohmos ellenállás
5. Színes öntapadó pöttyök

### Fontos figyelmeztetések:

- A szilícium szelet könnyen eltörik, ha leesik, vagy ha meghajlítod. Ne érh hozzá és ne karcold meg a fényes fémes felületét!

### Utasítások

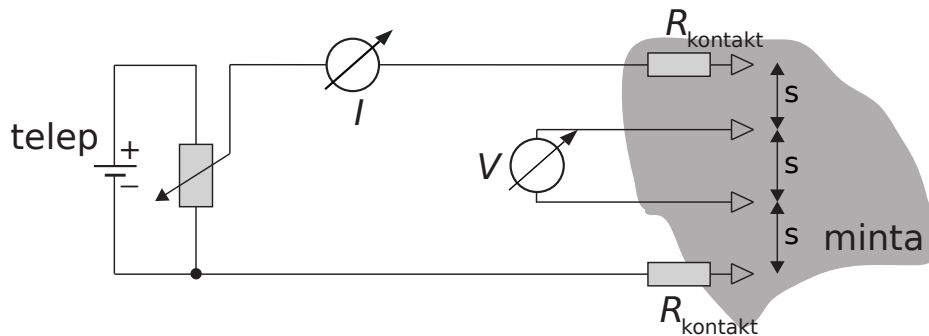
- Ebben a mérésben a jelgenerátort egy DC feszültségforrásként használsz. Ebben az üzemmódban a jelgenerátor egy állandó feszültséget ad ki az (5)-ös "voltage" és a (7)-es "GND" csatlakozó között. A számok az általános utasításban lévő fényképre vonatkoznak.
- A feszültséget (0- 5 V tartományban) a bal oldali, (3)-as "adjust voltage" potenciométerrel lehet szabályozni a csavarhúzó segítségével.
- Amikor ezt a mérést csinálod, akkor győződj meg arról, hogy a hangszórót meghajtó része a jelgenerátornak ki van kapcsolva a (8)-as kapcsolóval. Ezt úgy ellenőrizheted, hogy megméred a feszültséget a (6)-os "speaker amplitude" ellenőrző csatlakozó és a (7)-es "GND" csatlakozó között. Ha a hangszóró meghajtó rész ki van kapcsolva, akkor a két csatlakozó között nulla a feszültség.

## Part A. Négy pontos (four-point-probe, 4PP) mérés (1,1 pont)

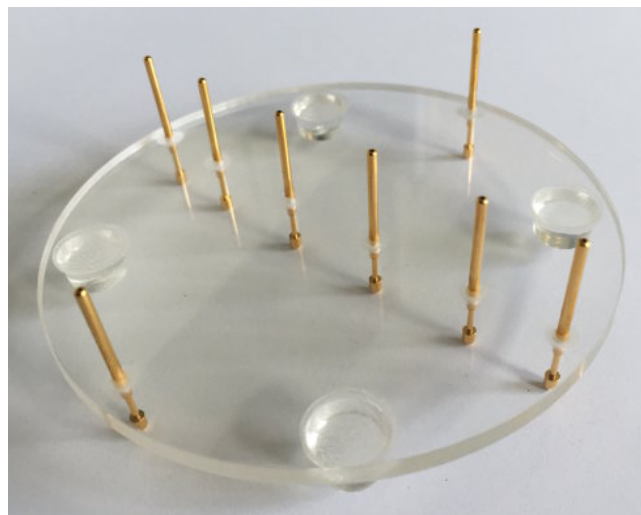
A fajlagos ellenállás pontos méréséhez a feszültségméréshez használt kontaktusokat el kell különíteni az áram bevezetéséhez használt kontaktusoktól.

Ezt a módszert négy pontos (four-point-probe, 4PP) ellenállásmérésnek nevezik. A négy érintkezőt a lehető legegyszerűbben, szimmetrikusan helyezik el: az  $I$  áram az egyik külső (forrásnak nevezett) érintkezőn át folyik be a mintába, majd minden lehetséges úton áthalad a mintán, végül a másik külső érintkezőn (nyelő) kilép a mintából. Közben a  $V$  feszültséget egy bizonyos  $s$  úthosszon mérik a mintán.

Minden egyszerűvé válik, ha egy szimmetrikus elrendezést használunk, azaz ugyanaz az  $s$  távolság van minden érintkező között, és az érintkezők a minta közepén vannak, ahogy a következő ábra mutatja:



Az  $I(V)$  görbe ábrázolja a minta  $I - V$  karakterisztikáját, és lehetővé teszi a minta darab ellenállásának meghatározását. A következőkben kizárólag a 4PP módszert fogjuk használni. Először a képen látható nyolc érintkező közül négy, lineárisan, *azonos távolságban* elrendezett érintkezőt.



2. ábra: Akrilüveg lemez a 4PP mérésekhez, négy gumi lábbal és a négy érintkezővel.

A következő méréshez a teljes vezető papírlapot használd!

**Fontos tanácsok az összes ezutáni méréshez:**

- A papírlap hosszú oldala a referencia. A négy érintkező legyen ezzel párhuzamos helyzetben.
- Figyelj, hogy a papírlap beborított (fekete) oldalát használd, és ne a barna hátoldalát. Megjelölheted a helyes orientációt színes öntapadó pöttyökkel.
- Ellenőrizd, hogy a papíron nincsenek lyukak vagy vágások!
- Ebben a mérésben az érintkezőket a lehető legközelebb helyezd a minta középpontjához.
- Nyomd az érintkezőket elegendő erővel, hogy mindegyik jól érintkezzen. A műanyag lábak épp csak érintsék a felületet.

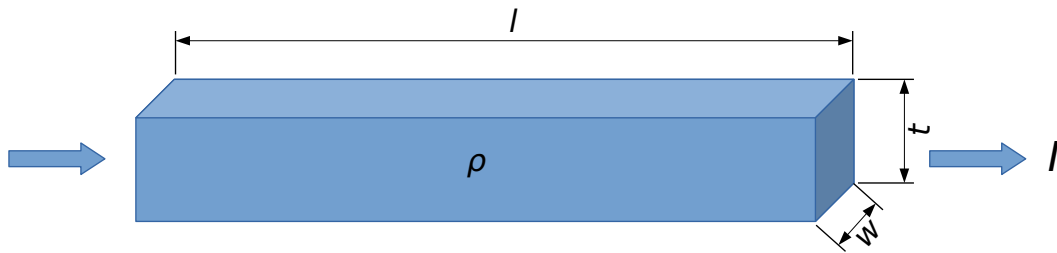
<b>A.1</b>	Négypontos (4PP) mérés: Mérd meg a $V$ feszültségesést egy $s$ hosszúságú darabon a rajta átfolyó $I$ áramerősség függvényében. Legalább 4 értéket mérjél, készíts táblázatot, és ábrázold az $I$ áramerősséget a $V$ feszültségesés függvényében az <b>Graph A.1</b> grafikonon!	0.6pt
------------	---	-------

<b>A.2</b>	Határozd meg az $R = \frac{V}{I}$ effektív elektromos ellenállást a <b>Graph A.1</b> grafikon alapján!	0.2pt
------------	--	-------

<b>A.3</b>	A <b>Graph A.1</b> grafikon alapján határozd meg az $R$ ellenállás $\Delta R$ hibáját!	0.4pt
------------	--	-------

## Part B. Vékonyréteg ellenállás (0,3 pont)

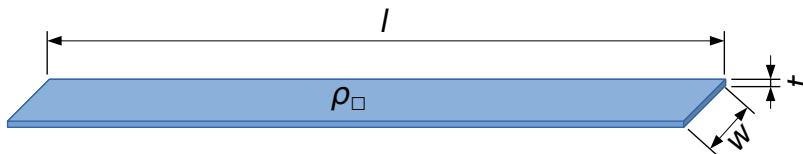
A  $\rho$  fajlagos ellenállás egy olyan anyagra jellemző tulajdonság, amely segítségével egy adott méretű 3D vezető ellenállása meghatározható. Tekintsünk egy rudat, amely hossza  $l$ , szélessége  $w$  és vastagsága  $t$ :



A fenti, vastag vezető  $R$  elektromos ellenállása:

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

Hasonlóan ehhez definiálhatjuk egy  $t \ll w$  és  $t \ll l$  vastagságú 2D vezető ellenállását is



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

ahol a  $\rho_{\square} \equiv \rho/t$  ("rho box") vékonyréteg ellenállást használjuk. Ennek mértékegysége ohm:  $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$ .

**Fontos:** A (2) egyenlet csak homogén árameloszlásnál és a vezető keresztmetszeti síkjában konstanspotenciál esetében érvényes. A felszínen lévő pontszerű kontaktusok esetében ez nem teljesül. Ebben az esetben meg lehet mutatni, hogy a vékonyréteg ellenállást az ellenállásból így lehet kifejezni:

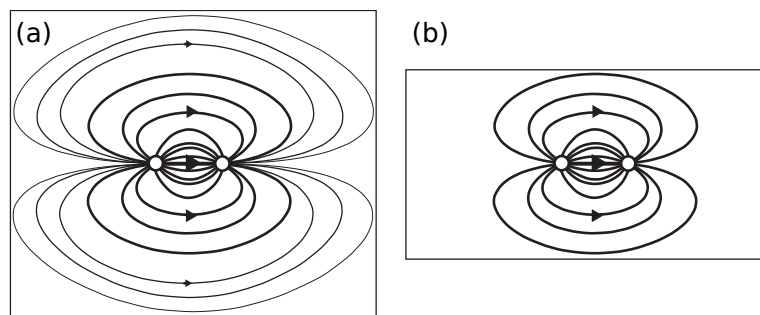
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

ahol  $l, w \gg t$ .

- |  |       |
|--|-------|
| <p><b>B.1</b> Számítsd ki a papír <math>\rho_{\square}</math> vékonyréteg ellenállását a part A rész 4PP mérései alapján! Ezt az értéket <math>\rho_{\infty}</math>-nek fogjuk nevezni (és a part A részben mért ellenállást <math>R_{\infty}</math>-nek), mert a teljes lap méretei sokkal nagyobbak, mint az érintkezők <math>s</math> távolsága: <math>l, w \gg s</math>.</p> | 0.3pt |
|--|-------|

## Part C. Mérések különböző mintaméretekkel (3,2 pont)

Mostanáig a minta véges  $w$  és  $l$  méretét nem vettük figyelembe. Ha a minta mérete kisebbé válik, akkor csak kisebb áramot tud vezetni állandóan tartott feszültség mellett: ha a fehér köröcskével jelzett két kontaktusra feszültséget kapcsolunk, akkor az áram minden lehetséges, egymást nem keresztező úton folyni fog, amit a vonalak ábrázolnak: minél hosszabb a vonal, annál kisebb az áram, amit a vonal vastagsága szemléltet. Egy kisebb (b) mintánál azonos feszültség esetén az áram lecsökken, mert kevesebb lehetséges áramút van. Emiatt a mért ellenállás megnő:



A fajlagos (és a vékonyréteg) ellenállás nem változhat a minta mérete függvényében. Így, ahhoz hogy a mért ellenállásokat vékonyréteg ellenállásokká alakítsuk a (3) egyenlettel, be kell vezetnünk egy  $f(w/s)$  korrekciós tényezőt:

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

Egy olyan mintánál, ahol  $l \gg s$  az  $f$  tényező csak a  $w/s$  aránytól függhet, és nagyobb, mint 1:  $f(w/s) \geq 1$ . Az egyszerűség kedvéért csak a  $w$  szélességtől való függésre koncentrálunk, és csak azt biztosítjuk, hogy a minta elég hosszú legyen a méréseinkhez. Feltesszük, hogy az érték nagy méreteknél a helyes  $\rho_{\square}$  értékhez tart:

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

**C.1** A 4PP-módszerrel mérd meg az  $R(w, s)$  ellenállásokat 4 különböző, 0,3 és 5,0 tartományban változó  $w/s$  érték esetében, és jegyezd fel eredményeidet a **Table C.1** táblázatba! Biztosítsd, hogy a minta hossza legalább ötszöröse legyen az érintkezők távolságának:  $l > 5s$ , és hogy a minta  $l$  hosszúsága mindig a páírlap ugyanazon (hosszú) oldala mentén legyen. Minden egyes  $w/s$  értékhez mérd meg a feszültséget 4 különböző áramérték esetén, és számítsd ki az átlagos  $R(w/s)$  ellenállást a 4 mérésből. Eredményeidet írd be a **Table C.1** táblázatba! 3.0pt

**C.2** Számítsd ki  $f(w/s)$  értékét minden egyes méréshez! 0.2pt

## Part D. Geometriai korrekciós tényező: skálatörvény (1,9 pont)

A part C részben láttad, hogy a mért ellenállás skálázódik a  $w/s$  szélesség – érintkező-távolság aránnyal.

A part C részben kapott adatokból kiindulva a következő alakú függvényt választunk a mérésstartományunkban lévő adatok leírására:

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

Vedd észre, hogy nagyon nagy  $w/s$  estén  $f(w/s)$  1.0 kell, hogy legyen.

<b>D.1</b>	Annak érdekében, hogy a (6) egyenlettel leírt modell függvény illeszkedjen a part C részben felvett $f(w/s)$ adatokra, válaszd ki a legmegfelelőbb milliméterpapírt (lineáris <b>Graph D.1a</b> , semi-log <b>Graph D.1b</b> , vagy log-log <b>Graph D1.c</b> ) az adatok ábrázolására!	1.0pt
------------	---	-------

<b>D.2</b>	Határozd meg az $a$ és $b$ paraméterek értékét az illesztésből!	0.9pt
------------	---	-------

## Part E. A szilícium szelet és a van der Pauw-módszer (3,4 pont)

A félvezetőiparban a félvezetők és fém vékonyrétegek elektromos (vékonyréteg) ellenállásának ismerete nagyon fontos, mert ezek határozzák meg az eszközök működését. A következőkben egy szilícium szelettel fogsz dolgozni. A félvezető szelet be van borítva egy nagyon vékony króm réteggel (csak a fényes oldala).

Nyisd ki a szelettartót (forgasd a RELEASE nyíl irányába a tetejét) és vedd ki a szeletet. Legyél óvatos, ne ejtsd le, ne törjed el, ne karcold meg és ne érijél hozzá a fényes oldalához. A méréshez helyezd az asztalra úgy, hogy a fényes oldala nézzen felfelé.

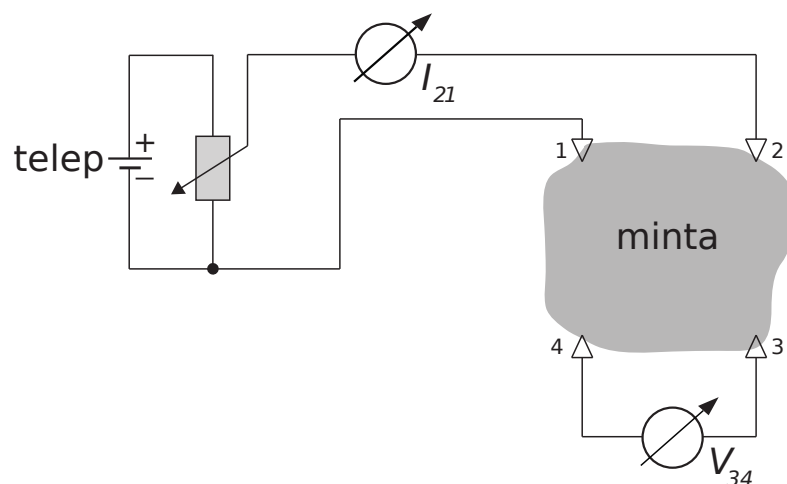
**E.1** Használd ugyanazt a 4PP összeállítást, mint az előbb, hogy megmérjed a  $V$  feszültséget az  $I$  áramerősség függvényében. Írd fel a szeleted sorszámát az Answer Shee megfelelő helyébe. Ezt a számot a műanyag szelettartón találod. 0.4pt

**E.2** Ábrázold az adatokat a **Graph E.2** grafikonban, és határozd meg a  $R_{4PP}$  ellenállást! 0.4pt

**E.3** Annak érdekében, hogy meghatározd a korrekciót egy kör alakú mintára, mint amilyen a szelet, közelíteni fogjuk a minta effektív  $w$  szélességét a szelet  $D = 100$  mm átmérőjével. Ezzel a feltételezéssel számítsd ki a  $w/s$  arányt. Használd a (6) egyenletben felírt illesztőfüggvényt és az  $a$  és  $b$  paramétereidet, hogy meghatározd a  $f(w/s)$  korrekciós tényezőt a szelet méréshez. 0.2pt

**E.4** Számítsd ki a króm réteg  $\rho_{\square}$  vékonyréteg ellenállását a (4) egyenlettel! 0.1pt

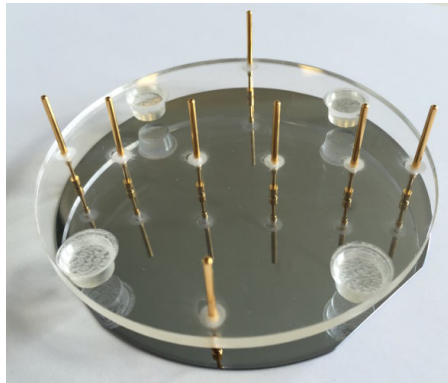
Annak érdekében, hogy a vékonyréteg ellenállást pontosan mérhesse a geometriai korrekció nélkül, a Philips mérnöke, L.J. van der Pauw kifejlesztett egy egyszerű mérési módszert: A négy érintkezőt a tetrszögletes alakú minta peremére erősíti, ahogy az az ábrán látható (1-től 4-ig számozva). Az áram két szomszédos érintkezőn át folyik, pl. az 1-es és 2-es érintkezőn, a feszültséget pedig a 3-as és 4-es érintkező közt méri. Ez az  $R_{I,V} = R_{21,34}$  ellenállás értéket eredményezi





Szimmetriaokokból  $R_{21,34} = R_{34,21}$  és  $R_{14,23} = R_{23,14}$ . Van der Pauw megmutatta, hogy egy tetszőleges, de egyszerűen összefüggő (nincsenek lyukak) alak és pontszerű kontaktusok esetében érvényes a következő egyenlet:

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



3. ábra: 4PP eszköz a fémmel bevont szilícium szeleten. A kör alakú szelet jobb oldalán egy vágás van, nevezzük ezt "él"-nek.

Csatlakoztasd a négy rugós érintkezőt úgy, hogy a mérő érintkezők egy négyzetet formáljanak. Köss két szomszédos érintkezőt az áramforrásra az árammérővel, és kösd a maradék kettőt a feszültségmérőre. Forgasd addig a négyzete, amíg egyik oldala párhuzamos a szelet "él"-ével.

**E.5** Vázold a áram szállító kontaktusok irányítottágát és a szelet "él"-ét. Mérd meg a  $V$  feszültséget legalább 6 különböző  $I$  áramértéknél, nagyjából egyforma közőkkel. Írd be az eredményeket a **Table E.5** táblázatba! 0.6pt

**E.6** Ismételd meg az eljárást úgy, hogy az áramot szállító kontaktusok merőlege- sek az első lépésben használt elrendezéshez képest. Írd be az eredményeket a **Table E.6** táblázatba! 0.6pt

**E.7** Ábrázold az adatokat egy közös **Graph E.7** grafikonba, különböző színeket vagy/és szimbólumokat használva. Határozd meg az átlagos  $\langle R \rangle$  értékeket a két görbéből! 0.5pt

**E.8** Behelyettesítve az összes  $R_{kl,mn}$  helyére  $\langle R \rangle$ -t, oldd meg a (7) egyenletet  $\rho_{\square}$ -ra, és határozd meg a króm réteg  $\rho_{\square}$  vékonyréteg ellenállását! 0.4pt

**E.9** Hasonlítsd össze a lineáris elrendezéssel kapott eredményt (**E.4**) és a van der Pauw-módszerrel kapott eredményt (**E.8**). Add meg a két méréssel kapott eredmény különbségét, mint relatív hibát, százalékban! 0.1pt

**E.10** A króm (Cr) réteg névleges vastagsága  $8 \text{ nm}$ . Használd ezt az értéket és a van der Pauw-módszerrel kapott végső eredményt a Cr fajlagos ellenállásának meghatározására az (1) és (2) egyenlet felhasználásával! 0.1pt