

Elektrická vodivost ve dvou rozměrech (10 bodů)

Než se pustíte do řešení úlohy, přečtěte si prosím obecné pokyny umístěné v samostatné obálce.

Úvod

Ve snaze vyvinout zařízení nové generace založená na polovodičové technologii, jako jsou počítačové čipy nebo solární články, hledají vědci materiály, které vykazují vynikající přenosové vlastnosti, např. nízký elektrický odpor. Měření těchto vlastností se děje na vzorcích s konečnými rozměry, s kontakty o konečném přechodovém odporu a ve speciálním prostorovém uspořádání. Tyto vlastnosti je třeba brát v potaz, pokud chceme zjistit skutečné vlastnosti daného materiálu. Tenká vrstva z určitého materiálu se navíc může chovat jinak, než pokud je materiálu větší množství.

V této úloze budete zkoumat měření elektrických vlastností. Vyděte z následujících dvou definicí:

- **Odpor R :** Odpor je elektrická vlastnost vzorku materiálu nebo konkrétního přístroje. Jde o veličinu kterou přímo naměříme na určitém vzorku s danou velikostí.
- **Měrný odpor (rezistivita) ρ :** Měrný odpor je vlastnost materiálu, která určuje jeho odpor. Je závislý na samotném materiálu a na vnějších parametrech, jako je teplota, ale nezávisí na geometrických vlastnostech vzorku.

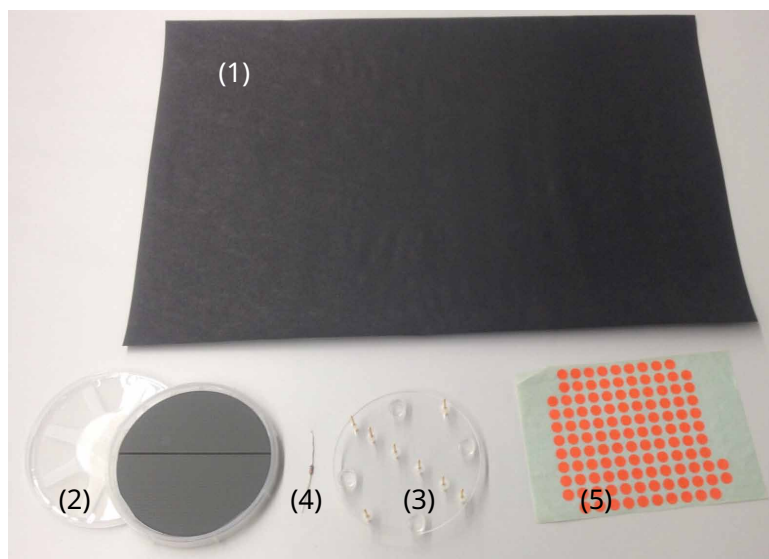
Konkrétně budete měřit takzvaný *měrný plošný odpor (sheet resistivity)*. Jde o měrný odpor vydělený tloušťkou velmi tenké vrstvy.

Budete zkoumat vliv následujících parametrů na měření měrného elektrického odporu tenké vrstvy různých materiálů:

- zapojení měřicího obvodu
- geometrické uspořádání měření
- velikost vzorku

Jako vzorky vám poslouží list vodivého papíru a křemíkový plátek pokrytý tenkou vrstvou kovu.

Pomůcky



Obrázek 1: Dodatečné pomůcky pro tuto úlohu.

1. Vodivý papír pokrytý vrstvou grafitu.
2. Křemíkový plátek pokrytý tenkou vrstvou chromu (uložený v držáku křemíkového plátku).
3. Plexisklo s 8 pružinovými hrotovými konektory.
4. Rezistor.
5. Barevné samolepky.

Důležitá upozornění

- Silikonový plátek se snadno zlomí, pokud se ho budete snažit ohnout, nebo s ním hodíte o zem. Nedotýkejte se a nepoškrábejte si lesklou kovovou vrstvu.

Pokyny

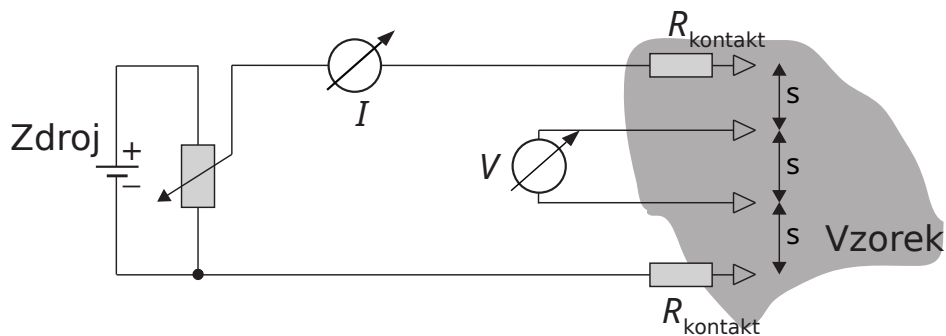
- V této úloze bude signálový generátor použit jako zdroj stejnosměrného napětí.
V tomto zapojení dává generátor konstantní napětí mezi zdířkou *voltage (napětí)* (5) a zdířkou *GND (země)* (7). Čísla odpovídají fotografii, která se nachází v obecných pokynech.
- Napětí (o rozsahu 0- 5 V) může být nastaveno levým potenciometrem označeným *adjust voltage (nastav napětí)* (3) pomocí šroubováčku.
- Když budete provádět měření, ujistěte se, že část signálového generátoru určená k ovládní reproduktoru je páčkovým vypínačem (8) vypnutá. Můžete to zkontrolovat změřením napětí mezi zdířkou *speaker amplitude (napětí na reproduktoru)* (6) a zdířkou *GND (země)* (7). Pokud je část k ovládní reproduktoru vypnutá, napětí mezi těmito zdířkami bude rovné nule.

Část A. Čtyřbodová metoda (4BM) měření (1,2 bodu)

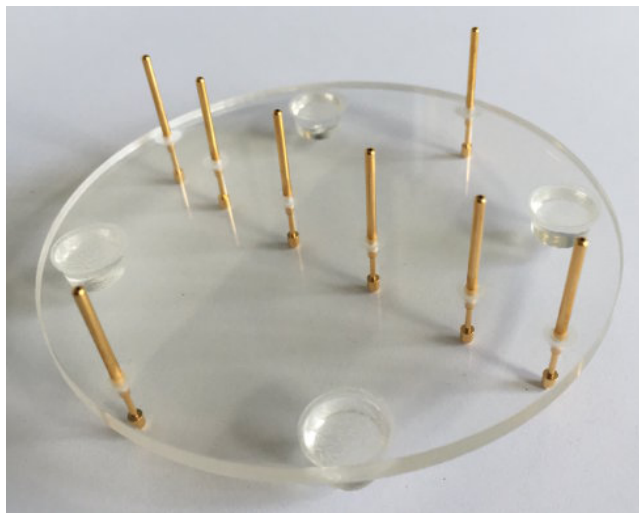
Abychom změřili měrný odpor daného vzorku přesněji, měly by být kontakty pro měření napětí a kontakty pro měření proudu odděleny.

Tato metoda se nazývá čtyřbodová metoda (4BM). Čtyři kontakty jsou v symetrickém geometrickém uspořádání, které je tak jednoduché, jak jen to je možné: Proud I teče do vzorku z jednoho z vnějších kontaktů (nazvaných zdroj), dále po všech možných cestách skrz vzorek a ven ze vzorku skrz druhý kontakt (odtok). Mezi těmito kontakty je měřeno napětí V přes určitou vzdálenost s na vzorku.

Vše se výrazně zjednoduší, použijeme-li symetrické uspořádání, tj. mezi sousedními kontakty bude stejná vzdálenost s , jak je ukázáno na následujícím obrázku:



Závislost I na V představuje $I - V$ (voltampérovou) charakteristiku vzorku a umožňuje nám určit odpor tohoto kousku vzorku. V následujícím budete používat pouze 4BM měření. Nejprve použijete lineární (na jedné přímce) *stejně vzdálené* uspořádání čtyř z osmi kontaktů zobrazených na fotografii.



Obrázek 2: Plátek akrylového plexiskla pro 4BM měření, má na sobě čtyři gumové nožičky a osm kontaktů.

V následujícím měření použijte celý list vodivého papíru.

Důležité hinty pro všechna následující měření:

- Delší strana listu papíru slouží jako referenční strana. Spojnice čtyř používaných kontaktů by měla být rovnoběžná s touto stranou.
- Ujistěte se, že používáte potaženou vodivou stranu papíru (tu černou), ne hnědou zadní stranu! Správnou stranu si můžete označit barevnými samolepkami.
- Ujistěte se, že v papíru nejsou žádné dírky nebo trhliny.
- V tomto měření umístěte kontakty co nejbližší středu papíru.
- Přitlačte kontakty dostatečnou silou, aby každý z nich byl v dostatečném kontaktu se vzorkem. Plastové nožičky by se měly dotýkat povrchu vzorku.

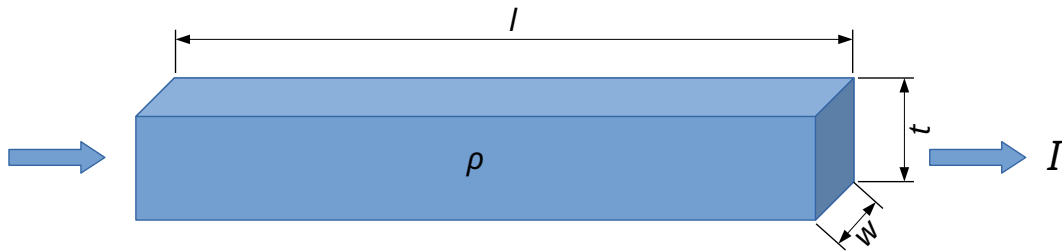
A.1	Čtyřbodová metoda (4BM) měření: Změřte úbytek napětí V na úseku délky s jako funkci proudu I procházejícího tímto úsekem. Provedte alespoň 4 měření, sestavte tabulku naměřených hodnot a sestrojte graf závislosti úbytku napětí V na proudu I do Grafu A.1 .	0.6pt
------------	---	-------

A.2	Určete efektivní elektrický odpor $R = \frac{V}{I}$ celého listu papíru z Grafu A.1 .	0.2pt
------------	--	-------

A.3	Použijte Graf A.1 k určení chyby měření ΔR odporu R ve 4BM měření.	0.4pt
------------	---	-------

Část B. Měrný odpor tenké vrstvy. (0,3 bodu)

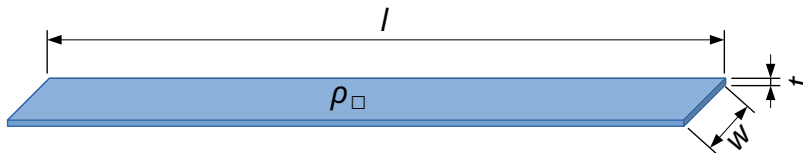
Měrný odpor ρ představuje vlastnost materiálu, pomocí které lze určit odpor trojrozměrného vodiče o daných rozměrech a daném tvaru. Zde budeme uvažovat kvádr o délce l , šířce w , a tloušťce t :



Elektrický odpor R výše zobrazeného tlustého vodiče je:

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

Stejným způsobem můžeme zavést odpor dvojrozměrného vodiče tloušťky $t \ll w$ a $t \ll l$



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

s použitím *měrného plošného odporu* $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ ("ró čtvereček"). Jeho jednotky jsou Ohmy: $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$.

Důležité: Rovnice 2 je platná pouze v případě homogenní hustoty proudu a homogenního elektrického pole v kolmém průřezu vodiče. V případě bodových kontaktů na povrchu vodiče rovnice již neplatí. Naopak lze ukázat, že vztah mezi měrným plošným odporem a odporem je v tomto případě

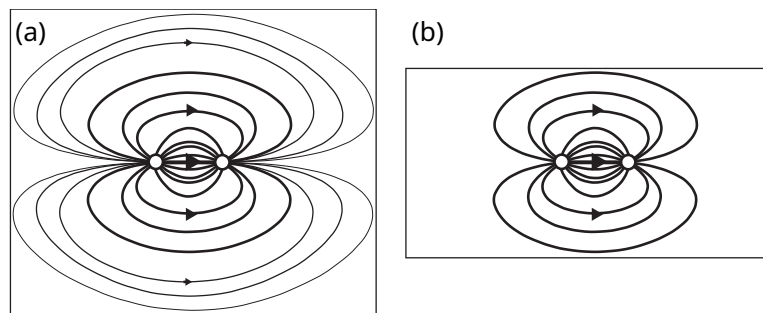
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

pro $l, w \gg t$.

- B.1** Spočítejte měrný plošný odpor ρ_{\square} papíru z výsledků 4BM měření v části A. Tu- 0.3pt
to konkrétní hodnotu označíme ρ_{∞} (a naměřený odpor z části A R_{∞}), protože
rozměry celého listu papíru jsou výrazně větší než vzdálenosti mezi kontakty s :
 $l, w \gg s$.

Část C. Měření různých velikostí vzorku (3,2 bodu)

Až do teď jsme nebrali v úvahu konečné rozměry vzorku w a l . Máme-li menší vzorek, projde jím méně proudu, pokud udržujeme konstantní napětí: Pokud přiložíme napětí mezi dva bodové kontakty (bílé kroužky), proud bude téct po všech možných nekřížících se drahách skrz vzorek, jak je vyobrazeno křivkami: Čím delší je dráha, tím menší je protékající proud, což je naznačeno tloušťkou jednotlivých čar. V malém vzorku (b) se při stejném napětí celkový proud zmenší, jelikož je zde méně možných drah. Změřený odpor se tedy zvýší:



Měrný (plošný) odpor se nebude měnit s velikostí vzorku. Abychom tedy mohli převést změřený odpor na měrný odpor pomocí rovnice 3, musíme zavést korekční člen $f(w/s)$:

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

Pro vzorek o délce $l \gg s$ závisí člen f pouze na poměru w/s a je větší než 1: $f(w/s) \geq 1$. Pro jednoduchost se zaměříme jen na závislost na šířce w a pouze se ujistíme, že vzorek je dostatečně dlouhý pro naše měření. Předpokládáme, že pro dostatečně velké rozměry se hodnota měrného odporu blíží správnému výsledku ρ_{\square} :

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

C.1 S použitím 4BM metody určete odpor $R(w, s)$ pro 4 hodnoty w/s v rozsahu od 0,3 do 5,0 a zaznamenejte výsledky do **Tabulky C.1**. Ujistěte se, že délka vzorku je alespoň pětkrát větší, než vzdálenost kontaktů: $l > 5s$ a že se vzorky stříhají vždy rovnoběžně s delší stranou listu papíru. Pro každou hodnotu w/s změřte napětí pro 4 různé hodnoty proudu a spočítejte průměrný odpor $R(w/s)$ z těchto 4 měření. Výsledky zapište do **Tabulky C.1**. 3.0pt

C.2 Spočítejte $f(w/s)$ pro každé z těchto měření. 0.2pt

Část D. Geometrický korekční člen: zákon škálování (1,9 bodu)

V části C jste viděli, že změřený měrný odpor se škáluje společně s poměrem šířky vzorku ku vzdálenosti kontaktů w/s . S využitím údajů z části C zvolíme následující obecnou funkci k popisu dat v naměřeném rozsahu:

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

Všimněte si, že pro velká w/s , musí být $f(w/s)$ rovno 1.0.

D.1	Abychom mohli nafitovat křivku z našeho modelu pomocí rovnice 6 a dat $f(w/s)$ naměřených v části D, zvolte nejvhodnější milimetrový papír (lineární Graf D.1a , semi-logaritmický Graf D.1b , nebo log-logaritmický Graf D1.c) k zakreslení dat.	1.0pt
------------	---	-------

D.2	Odhadněte parametry a a b z vašeho fitování.	0.9pt
------------	--	-------

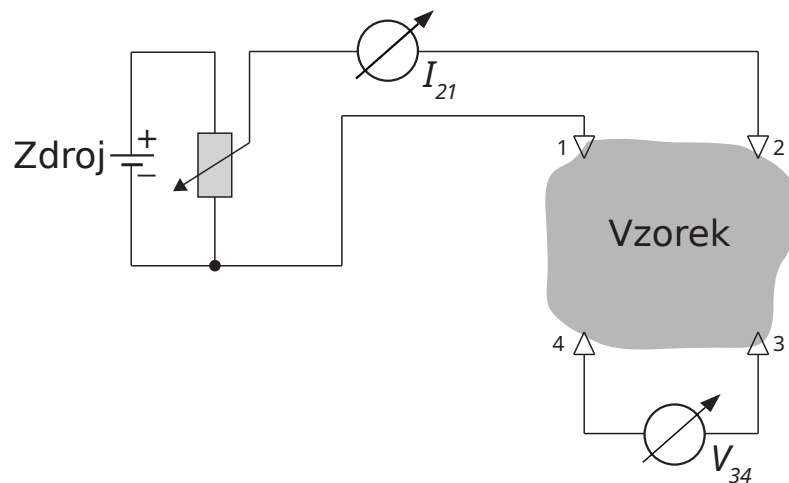
Část E. Křemíkový plátek a metoda van der Pauwa (3,4 bodu)

V polovodičovém průmyslu je podstatná znalost elektrického (plošného) odporu polovodičů a tenkých kovových vrstev, protože významně ovlivňují vlastnosti součástek. V následující části budete pracovat s křemíkovým plátkem. Polovodičový plátek je potažen velmi tenkou vrstvou chromu (na lesklé straně).

Otevřete nádobu s křemíkovým plátkem (otočte ve směru šipky "RELEASE") a vyndejte plátek ven. Buďte opatrní, abyste ho neupustili, nerozbili, nepoškrábali a hlavně se nedotýkejte lesklého povrchu. Při měření ho umístěte na stůl lesklou stranou nahoru.

E.1	Použijte stejné 4BM zapojení jako v předchozích částech pro určení závislosti proudu I na napětí V . Zapište referenční číslo vašeho plátku do Listu odpovědí. Toto číslo naleznete na plastovém držáku křemíkového plátku.	0.4pt
E.2	Zaneste naměřená data do Grafu E.2 a určete odpor R_{4PP} .	0.4pt
E.3	Abychom určili korekční člen pro kulatý vzorek jako je plátek křemíku, nahradíme efektivní šířku vzorku w průměrem plátku $D = 100$ mm. Za tohoto předpokladu určete poměr w/s . Použijte fitovací funkci z rovnice 6 a vaše parametry a a b k určení korekčního členu $f(w/s)$ pro měření s křemíkovým plátkem.	0.2pt
E.4	Spočtete měrný plošný odpor ρ_{\square} chromové vrstvy pomocí rovnice 4.	0.1pt

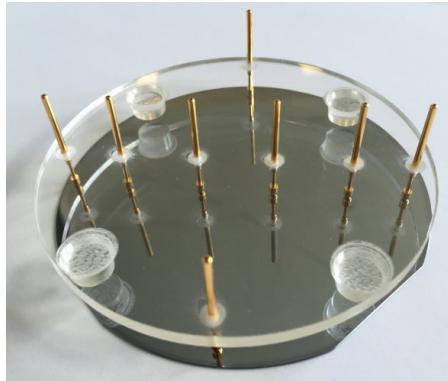
Abychom změřili měrný plošný odpor přesně bez potřeby geometrických korekcí, inženýr ze společnosti Philips, L.J. van der Pauw, navrhnul jednoduchý měřicí postup: Čtyři konektory se upevní po obvodu vzorku libovolného tvaru, jak je ukázáno na obrázku (čísla 1 až 4). Proud teče dvěma sousedními konektory, např. 1 a 2 a napětí se měří mezi konektory 3 a 4. To nám dá hodnotu odporu $R_{I,V} = R_{21,34}$.



Ze symetrie platí $R_{21,34} = R_{34,21}$ a $R_{14,23} = R_{23,14}$. Van der Pauw ukázal, že pro libovolný, ale jednoduše

spojitý tvar (bez děr) vzorku a bodové kontakty platí následující rovnice:

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



Obrázek 3: 4BM zařízení na kovem pokrytém křemíkovém plátku. Všimněte si řezu na pravé straně kruhového plátku. Tento řez se nazývá rovný.

Připojte konektory na čtyři pružinové kontakty tak, aby tvořily čtverec. Připojte dva sousední kontakty ke zdroji elektrického proudu s ampérmetrem a připojte dva zbylé pružinové kontakty k voltmetru. Otočte čtvercem tak, aby jedna z jeho stran byla rovnoběžná s rovným řezem na plátku.

E.5	Načrtněte orientaci dvojice kontaktů, ke kterým je přiveden zdroj elektrického proudu a orientaci rovného řezu na plátku. Změřte napětí V pro alespoň 6 různých, od sebe zhruba stejně vzdálených hodnot proudu I . Výsledky zapište do Tabulky E.5 .	0.6pt
E.6	Otočte kontakty, ke kterým je připojen zdroj proudu tak, aby byly kolmé na ty, které jste použili v prvním kroku (tj. otočte o 90° vůči prvnímu případu) a měření zopakujte. Výsledky zapište do Tabulky E.6 .	0.6pt
E.7	Vyneste všechny data dohromady do jednoho Grafu E.7 s použitím různých barev a/nebo symbolů. Určete střední hodnotu $\langle R \rangle$ z těchto dvou křivek.	0.5pt
E.8	Nahradte všechny odpory $R_{kl,mn}$ odporem $\langle R \rangle$, vyřešte rovnici 7 pro ρ_{\square} a spočtěte měrný plošný odpor ρ_{\square} chromové vrstvy.	0.4pt
E.9	Porovnejte výsledky měření provedeného v lineárním uspořádání (E.4) a výsledky metody van der Pauwa (E.8). Uveďte rozdíl mezi těmito metodami jako relativní chybu v procentech.	0.1pt
E.10	Chromová (Cr) vrstva má jmenovitou tloušťku 8 nm. Použijte tuto hodnotu a konečné výsledky metody van der Pauwa k výpočtu měrného odporu Cr s pomocí rovnic 1 a 2.	0.1pt