

Двумерна електрична проводимост (10 точки)

Преди да започнете да решавате задачата, прочетете общите инструкции, намиращи се в отделен плик.

Увод

В търсене на нови поколения прибори, използващи полупроводникова технология, изследователите търсят материали, които имат добри транспортни свойства, т.е. ниско електрично съпротивление. Измерванията на тези свойства се извършват като се използват образци с крайни размери и специфична геометрична форма и електроди с крайно контактно съпротивление. Тези особености трябва да се отчетат, когато се изчисляват материалните константи. Нещо повече, един тънък слой материал може да се държи различно в сравнение с обемен материал.

В тази задача ще изследвате измервания на електрични свойства:

- **Съпротивление R :** Съпротивлението е електрично свойство на образец. То зависи от специфичния материал и неговите размери.
- **Специфично съпротивление ρ :** Спец. съпротивление на материала определя съпротивлението му. То зависи от самия материал, но не зависи от геометрията на образца.

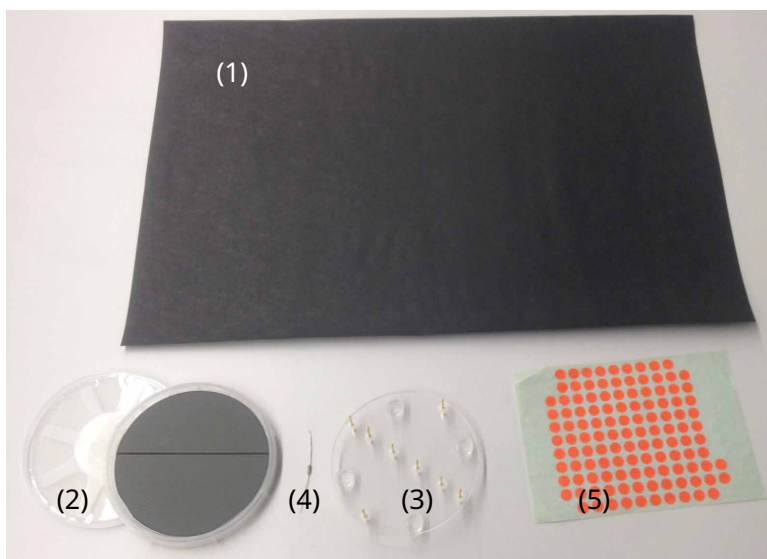
Допълнително, тук ще измервате и така нареченото *листно специфично съпротивление*. Това е величина, равна на специфичното съпротивление, разделено на дебелината на тънкия слой.

Ще изследвате влиянието на следните параметри върху измерването на електричното съпротивление на тънък слой материал:

- типа измерителна верига,
- геометрията на измерването,
- размерите на образца.

Двата образца ще бъдат проводяща хартия и силиций, покрит със слой метал.

Списък на оборудването



Фигура 1: Допълнително оборудване за този експеримент.

1. Проводяща хартия с графитно покритие
2. Силициева кристална плочка, покрита със слой от хром (намира се в пластмасова кутийка)
3. Плексигласова плочка с 8 контакта на пружини
4. Резистор
5. Цветни малки лепенки

Важни предупреждения

- Силициевата плочка може лесно да се счупи при отварянето на кутията или ако се огъва. Не пипайте и не драскайте блестящата метална повърхност.

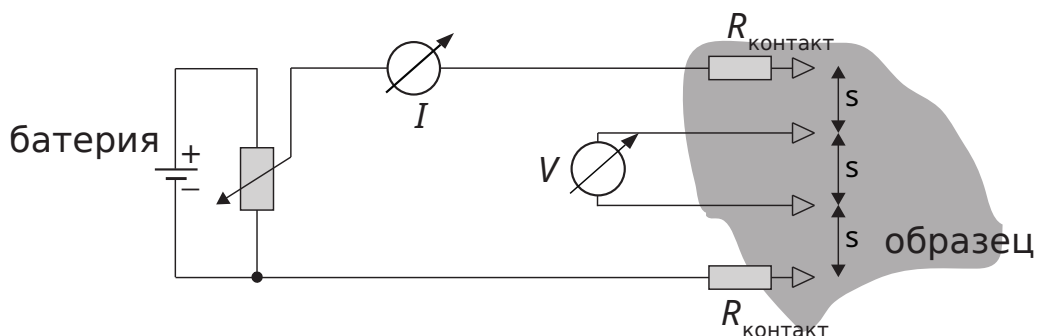
Указания

- В този експеримент тонгенераторът ще се използва като източник на постоянно напрежение. В този режим тонгенераторът дава постоянно напрежение между буксите *voltage* (5) и маса *GND* (7). Числото в скоби съответства на снимката в общите инструкции.
- Напрежението (интервал: 0- 5 V) може да се нагласи от левия потенциометър *adjust voltage* (3) с помощта на отвертката.
- Когато правите тази задача, уверете се, че вискоговорителят е изключен от ключа (8). Това може да се провери като се измери напрежението между букси *speaker amplitude monitor socket* (6) и масата *GND* (7). Ако вискоговорителят е изключен, напрежението е нула.

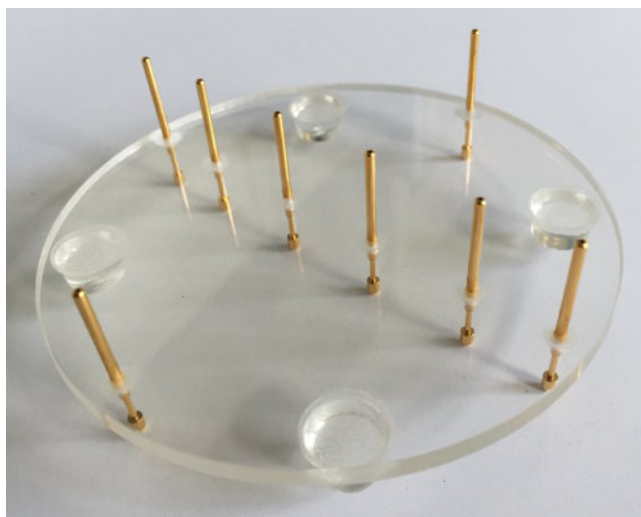
Part A. Четириточкови Four-point-probe (4PP) измервания (1.2 points)

За да се направят прецизни електрични измервания, контактите за протичане на тока и за измерване на напрежението са различни.

Тази техника се нарича четириточков метод (4PP). Четирите контакта се разположени симетрично: Токът I тече през образца влизайки и излизайки от външните два контакта. Напрежението V се мери на вътрешните два, разположени на разстояние s един от друг.



Зависимостта на I от V е волт-амперната $I - V$ -характеристика на образца и позволява да се изчисли съпротивлението на тази част от образца. Тук ще се използва само тази 4PP техника. Ще използвате контакти, разположени на една линия и на равни разстояния един от друг (виж снимката).



фигура 2: Плочка от акрилно стъкло с 4 гумени крачета и 8 контакта (електрода).

За следващите измервания използвайте целия лист проводяща хартия.

Важни неща за следващите измервания:

- Ориентир е дългата страна на листа. Четирите електрода трябва да са наредени в линия, успоредна на тази страна.
- Използвайте черната повърхност на листа.
- Внимавайте да не пробие или срежете листа.
- Четирите контакта трябва да са в средата на листа.
- Натиснете плочката с контактите, така че да осигурите добър електричен контакт. Пластмасовите крачета трябва да докосват листа по време на измерването.

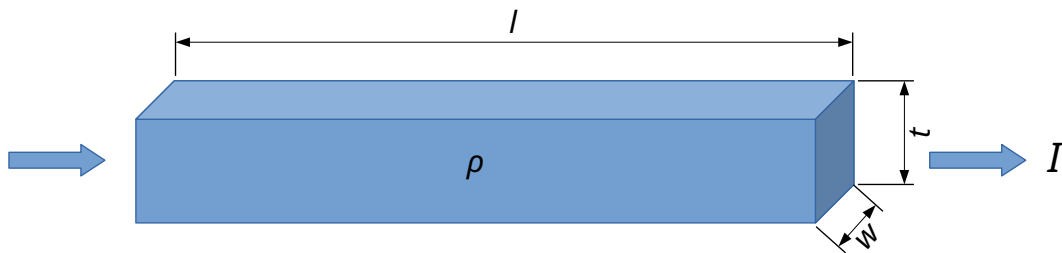
A.1	Четириточково (4PP) измервания: Измерете напрежението V върху участък с дължина s в зависимост от тока I минаващ през този участък. Измерете най-малко 4 стойности, табулирайте ги и направете графика на напрежението V от тока I в Graph A.1 .	0.6pt
------------	---	-------

A.2	Изчислете ефективното електрично съпротивление $R = \frac{V}{I}$ от Graph A.1 .	0.2pt
------------	--	-------

A.3	От Graph A.1 определете грешката ΔR на съпротивлението R .	0.4pt
------------	---	-------

Part B. Листно специфично съпротивление (0.3 точки)

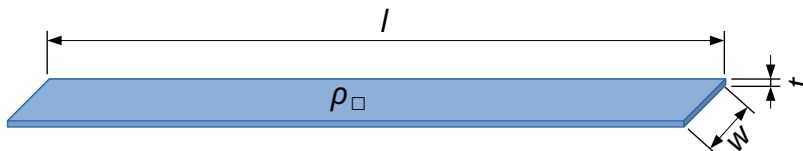
Специфичното съпротивление ρ е свойство на материала, от което може да се изчисли съпротивлението на 3D проводник с известни геометрия и размери. Тук размерите да дължина l , ширина w , и дебелина t :



Електричното съпротивление R за този проводник е:

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

По същия начин може да се дефинира и съпротивление на 2D проводник, когато $t \ll w$ и $t \ll l$



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

използвайки *листно специфично съпротивление* $\rho_{\square} \equiv \rho/t$. То се мери в Омове: $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$.

Important: Eq. 2 е вярно само за ток с еднородна плътност на тока и постоянен потенциал в равнина, перпендикулярна на тока. В случай на точкови контакти това не е изпълнено. В този случай може да се покаже, че листното специфично съпротивление е свързано със съпротивлението така

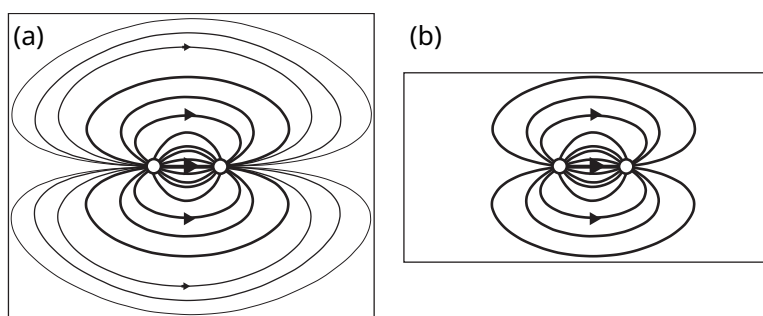
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

за $l, w \gg t$.

- | | |
|--|--------------|
| <p>B.1 Изчислете листното специфично съпротивление $\rho_{\square}$ на хартията от 4PP измерванията от part A. Това специфично листово съпротивление ще бележим с ρ_{∞} (и измереното съпротивление от part A с R_{∞}) защото размерите на целия лист хартия в този случай са много по-големи от разстоянието между контактите s: $l, w \gg s$.</p> | <p>0.3pt</p> |
|--|--------------|

Part C. Измервания на образци с различни размери (3.2 точки)

Досега размерите w и l не се отчитаха. Ако образецът започне да се прави все по-тънък, за да се запази напрежението, ще е нужен по-малък ток: ако подаваме напрежение между два точкови контакта (белите кръгчета) токът ще тече по всички възможни непресичащи се контури, визуализирани с линии. Колкото е по-дълга линията, толкова по-малък ток ще тече по този контур. За по-малък образец (b) и същото напрежение, общият ток ще е по-малък. Затова измереното ефективно съпротивление ще нараства:



Листовото специфично съпротивление не зависи от размерите на образца. Затова за да го изчислим от измереното ефективно съпротивление използвайки Eq. 3, трябва да въведем корекционен множител $f(w/s)$:

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

За образец с дължина $l \gg s$ множителят f зависи само от отношението w/s и е по-голям от единица: $f(w/s) \geq 1$. За простота ще изследваме само зависимостта от ширината w и ще приемем, че образецът е достатъчно дълъг. Приемаме също така, че той достига точния резултат за $\rho_{\square}$ при големи ширини:

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

C.1 Използвайки 4PP-метода, измерете съпротивлението $R(w, s)$ за 4 стойности на w/s в интервала от 0.3 до 5.0 и запишете резултатите в **Table C.1**. Дължината на образца (по дългата страна на хартията) да е поне 5 пъти по-голяма от разстоянието между електродите: $l > 5s$. За всяка стойност на w/s измерете напрежението при 4 различни стойности на тока и изчислете средното съпротивление $R(w/s)$ за тези 4 измервания. Резултатите запишете в **Table C.1**. 3.0pt

C.2 0.2pt

Part D. Коригиращ множител за геометрията: емпиричен закон (1.9 точки)

В part C се убедихме, че имерваното съпротивление зависи от отношението w/s . Данните, полу-

чени в part C ще апроксимираме с функцията:

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

Забележете, че за големи стойности на отношението w/s , $f(w/s)$ е 1.0.

D.1 За да изчислите параметрите във функцията от Eq. 6 $f(w/s)$, от данните, получени в part C, изберете най-подходящия тип графична хартия (линейна **Graph D.1a**, полу-логаритмична **Graph D.1b**, или двойно-логаритмична **Graph D1.c**), за да начертаете данните. 1.0pt

D.2 Изчислете параметрите a и b от вашата графика. 0.9pt

Part E. Силициева плочка и метод на ван-дер-Пау (3.4 точки)

Тук ще използвате силициева пластина. Тя е покрита в с тънък метален слой хром (откъм блестящата страна).

Отворете внимателно кутийката на пластината (завъртете в посока на стрелката RELEASE) и извадете пластината. Внимавайте да не я изпуснете, счупите или надраскате. За измерванията я поставяте на масата с блестящата страна нагоре.

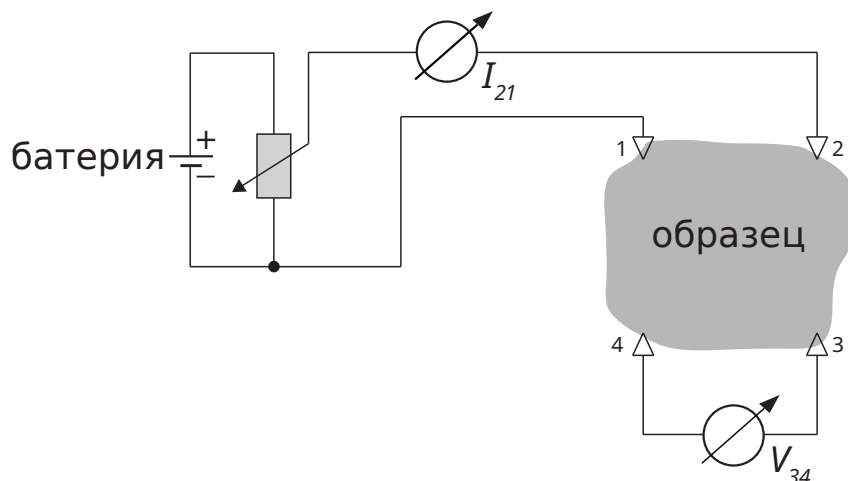
E.1 Използвайте същата 4PP установка за да измерите напрежението V като функция на тока I . Запишете номера на вашата пластина в Answer Sheet. Номерът е записан на кутийката ѝ. 0.4pt

E.2 Представете измерените данни в **Graph E.2** и определете съпротивлението R_{4PP} . 0.4pt

E.3 За да изчислим корекцията за образец с кръгла форма ще използваме за ефективна ширина w за образца неговия диаметър $D = 100 \text{ mm}$. При това допускане изчислете отношението w/s . Използвайте функцията от Eqn. 6 и изчислените параметри a и b за да определим множителя $f(w/s)$ за това измерване. 0.2pt

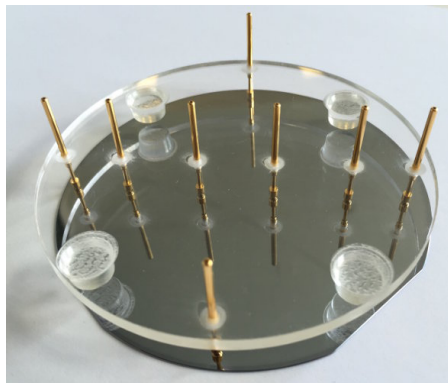
E.4 Изчислете листовото специфично съпротивление $\rho_{\square}$ на хромовия слой използвайки Eq. 4. 0.1pt

За да се измери прецизно листовото специфично съпротивление без нужда от въвеждане на геометрични корекции, инженерът L.J. van der Pau от Philips е предложил следната схема на измерване: Четирите електрода се поставят във върховете на квадрат върху образец с произволна форма, както е показано на фигурата (номерирани от 1 до 4). Токът тече през два съседни електрода, например 1 и 2, а напрежението се мери между останалите електроди 3 и 4. Така ще получим стойността на съпротивлението $R_{I,V} = R_{21,34}$.



От съображения за симетрия $R_{21,34} = R_{34,21}$ и $R_{14,23} = R_{23,14}$. Van der Pauw показал че за слой с произволна форма (но без дупки) и точкови контакти е валидно следното уравнение:

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



фигура 3: 4PP образец - покрита с метален слой силициева пластина . Забележете правият ръб на пластината от дясната ѝ страна.

Свържете тези четири контакта, които лежат във върховете на квадрат. Свържете два съседни контакта към източника на ток, а останалите два електрода - към волтметъра. Завъртете контактите, докато два съседни станат успоредни на правия ръб на образца.

E.5	Скицирайте ориентацията и разположението на електродите за ток и напрежение, както и правия ръб на образца. Измерете напрежението V за поне 6 еквиливантни стойности на тока I . Резултатите запишете в Table E.5 .	0.6pt
E.6	Повторете процедурата, като използвате двойка контакти за тока, перпендикулярни на двойката от предното подусловие. Запишете резултатите в Table E.6 .	0.6pt
E.7	Нарисувайте данните заедно на Graph E.7 използвайки различни цветове и символи. Определете следната стойност $\langle R \rangle$ от двете криви.	0.5pt
E.8	Замествайки съпротивления $R_{kl,mn}$ само с $\langle R \rangle$, решете Eqn. 7 за $\rho_{\square}$ и изчислете листовото специфично съпротивление $\rho_{\square}$ на слоя хром.	0.4pt
E.9	Сравнете резултата от измерванията с линейно разположените електроди (Част E.4) с този от метода на van der Pauw (E.8). Представете разликата от получените стойности като относителна грешка в проценти.	0.1pt

E.10 Слойт хром (Cr) има номинална дебелина 8 nm . Използвайки тази стойност и резултата от метода на van der Pauw, изчислете специфичното съпротивление на Cr, използвайки Eqns. 1 2. 0.1pt