

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

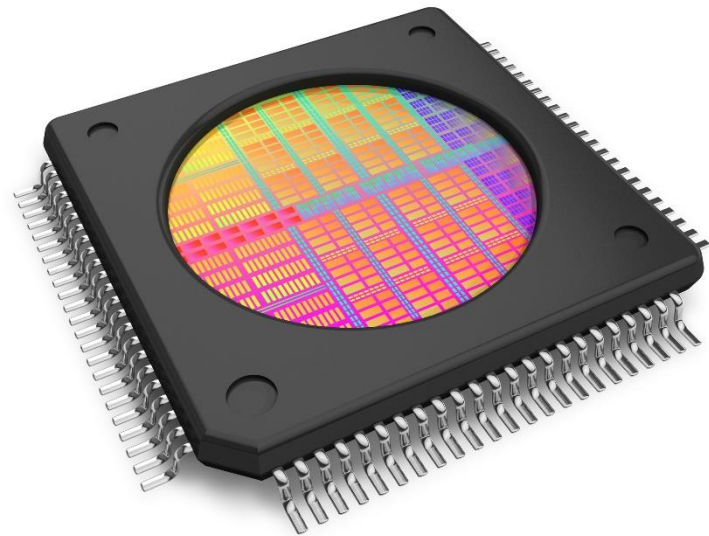


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



Měření na polovodičích

Přednáška 6



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAKÉ METODY SE POUŽÍVAJÍ K MĚŘENÍ PARAMETRŮ POLOVODIČŮ.
- DOZVÍTE SE, JAKÝ JE ROZDÍL MEZI DVOUBODOVOU A ČTYŘBODOVOU METODOU.
- ZJISTÍTE, CO JE METODA VAN DER PAUW.
- DOZVÍTE SE, JAKÝM ZPŮSOBEM LZE ZJISTIT TYP POLOVODIČE.
- ZJISTÍTE, JAK URČIT KONCENTRACI NOSIČŮ V POLOVODIČI.
- ZJISTÍTE, JAKÉ METODY POUŽÍT PRO URČENÍ POHYBLIVOSTI A DRIFTOVÉ RYCHLOSTI NOSIČŮ.
- DOZVÍTE SE, JAK URČIT ŠÍŘKU ZAKÁZANÉHO PÁSU POLOVODIČE.

Měření základních vlastností polovodičů

Téměř vždy se jedná o **nepřímé metody měření**. Nejprve se měří **hodnoty určité veličiny** a potom se provádí **vlastní výpočet**. Nejčastěji se zjišťuje:

- **Vodivost polovodiče**
- **Dobu života nosičů náboje**
- **Koncentrace příměsí**

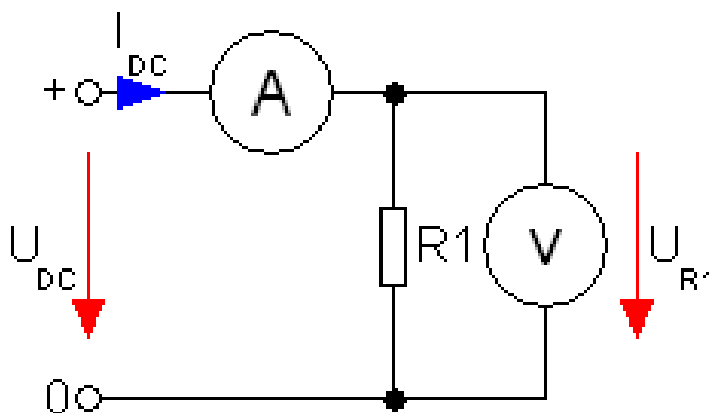
Základní měřicí metody

- **Metoda využívající hrotové sondy**
 - dvouhrotové sondy
 - čtyřhrotové sondy
- **Metoda Van der Pauw**
- **Optické metody měření**

Přímá metoda

Přímá metoda je nejjednodušší metodou měření elektrického odporu. Měřený objekt zapojený v sérii s ampérmetrem je připojen ke zdroji stejnosměrného napětí. Celkový odpor získáme z Ohmova zákona. V případě polovodičů má však tato metoda jen omezený význam. Lze jí totiž uplatnit jen na vzorky s jednoduchou geometrií s konstantními a známými rozměry (délkou, průřezem) a je tedy možnost vypočítat rezistivitu ze změřeného elektrického odporu R .

Při aplikaci této metody je vzorek opatřen na koncích dvěma proudovými kontakty, jejichž odpor se započítá do změřeného elektrického odporu R . Proto je potřeba, aby tyto kontakty byly provedeny co nejkvalitněji.

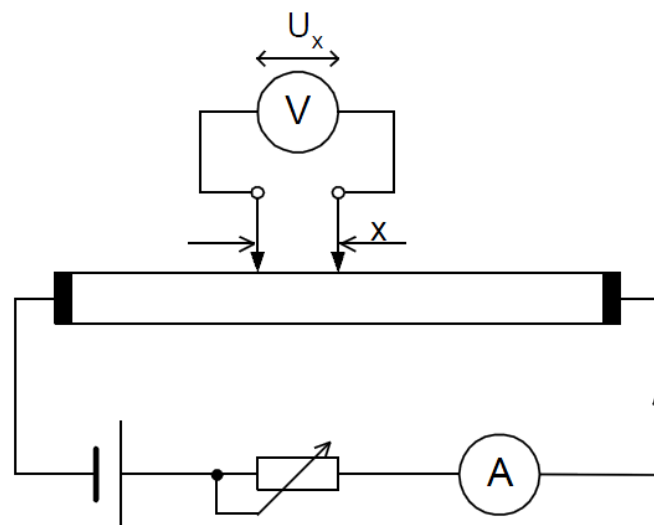


Dvoubodová metoda

Vzorek konstantního průřezu S je zapojen do elektrického obvodu pomocí plošných proudových kontaktů. Pro zjištění rezistivity se používá **měřicí sonda se dvěma hrotovými potenciálovými sondami**, které mají stálou vzdálenost x . **Hroty se dotýkají polovodiče na rovinné plošce ve tvaru pásku o různé šířce.**

Metoda **není experimentálně náročná** a její hlavní výhoda spočívá v možnosti zjistit rozložení rezistivity podél vzorku a při malé vzdálenosti hrotů též velmi **podrobně vyšetřovat případné nehomogenity polovodiče**. Nejčastěji je metoda využita pro měření rezistivity monokrystalického ingotu válcového tvaru, který je připraven pro další operaci, tj. rozřezání na destičky.

$$\rho = \frac{U_x \cdot S}{I \cdot x}$$



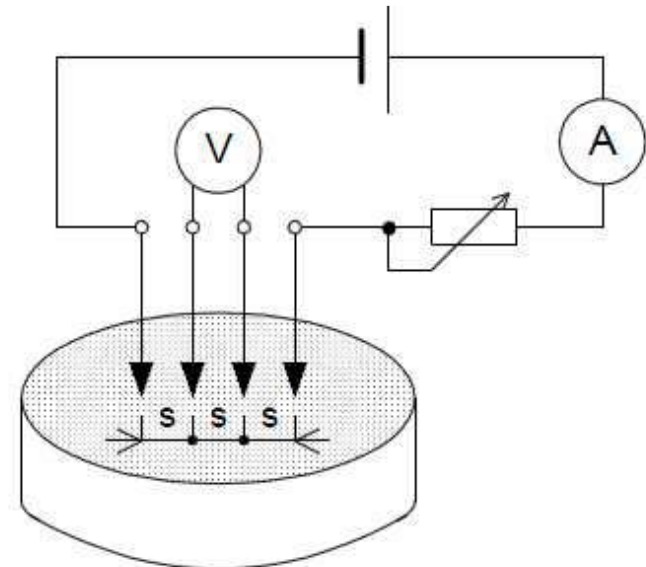
Čtyřbodová metoda

Metoda, využívající čtyřhrotovou sondu. Tato metoda byla vyvinuta pro měření rezistivity masivních plošných vzorků polovodičů, které nemají jednoduchý geometrický tvar. Základem měření je měřicí hlava se čtyřmi hrotovými kontakty uspořádanými v přímce, přičemž dva krajní jsou proudové a dva vnitřní jsou napěťové. Vzdálenost mezi jednotlivými hrotovými kontakty bývá stejná, aby byl výpočet jednodušší. Její velikost se pohybuje kolem 1 mm.

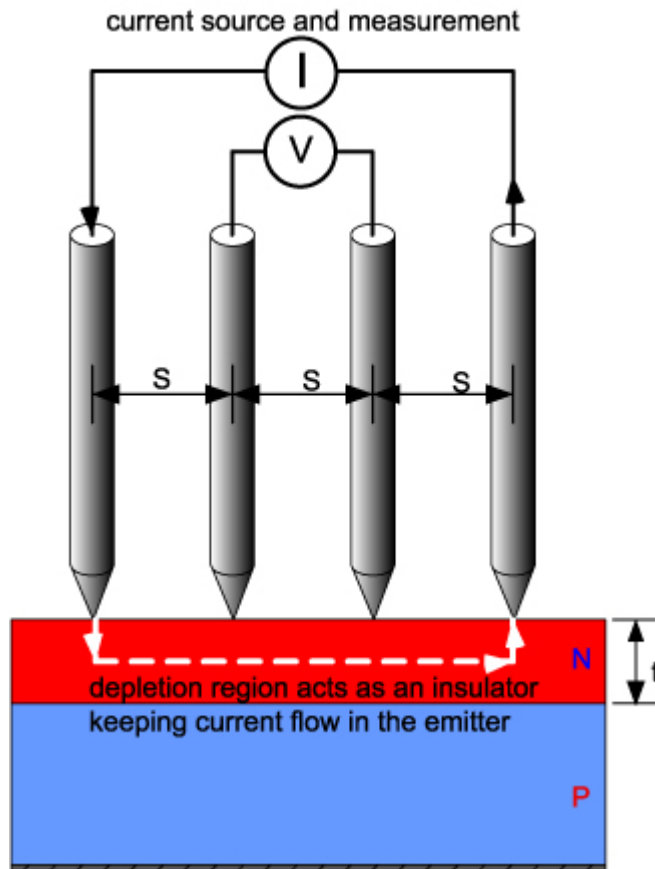
Rezistivitu lze potom určit ze vztahu:
$$\rho = 2\pi s \frac{U}{I}$$

s - vzdálenost mezi kovovými hroty
U, I - jsou změřené velikosti napětí a proudu
h - tloušťka vzorku
D - průměr vzorku

Platí pro vzorky silnější než $h/s > 3$
a s průměrem $d > 10s$!!!



Čtyřbodová metoda se hodí pro **běžná orientační i kontrolní měření rezistivity**, je **jednoduchá a pohotová** a v polovodičovém průmyslu **nejpoužívanější**. Měřicí hlavice jsou profesionálně vyráběny.



Polovodičové prvky (diody, tranzistory atd.) se vyrábějí z polovodičových destiček, jejichž **tloušťka je desetiny milimetru** → **nelze použít uvedenou čtyřbodovou metodu** (okrajové efekty). Odvozen experimentální vztah zahrnující korekci tloušťky materiálu. Pro měření rezistivity tenkých destiček čtyřbodovou metodou tedy platí:

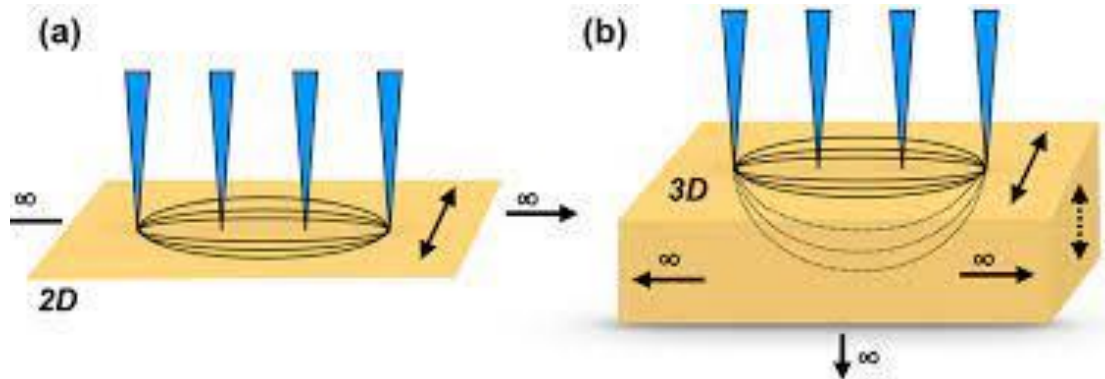
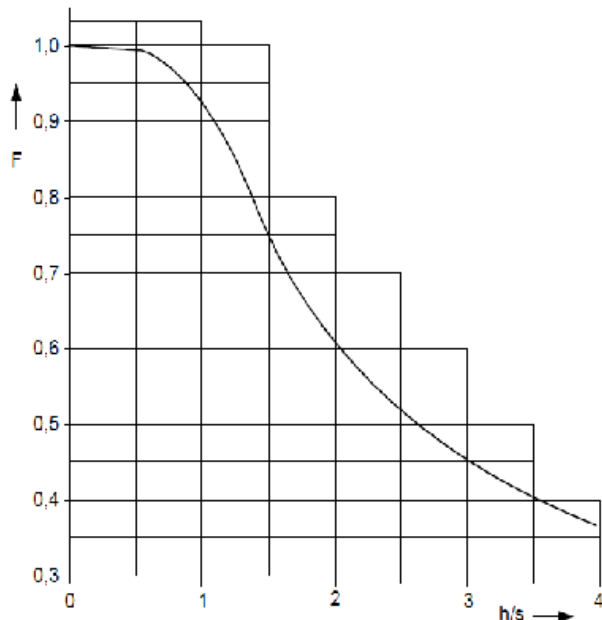
$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \cdot h \cdot F(h/s)$$

U je napětí mezi vnitřními hroty

I je proud procházející obvodem

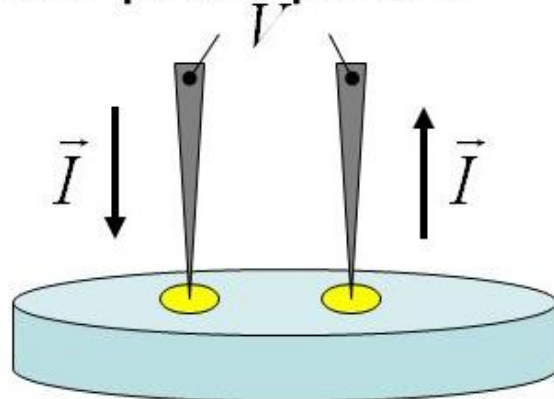
h je tloušťka destičky

F (h/s) je údaj korekčního faktoru, který je vyjádřen graficky

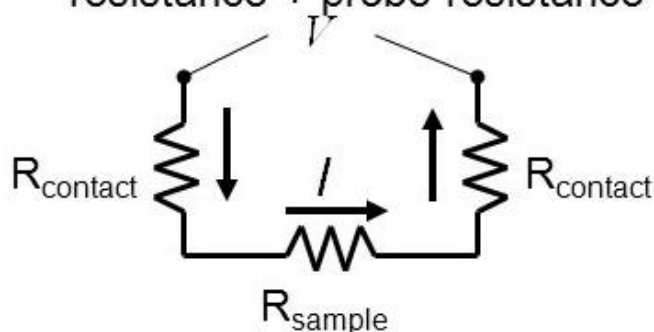


Porovnání dvoubodové a čtyřbodové metody

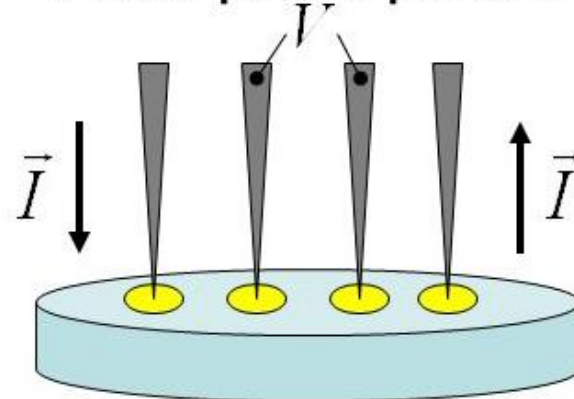
Two-point probe



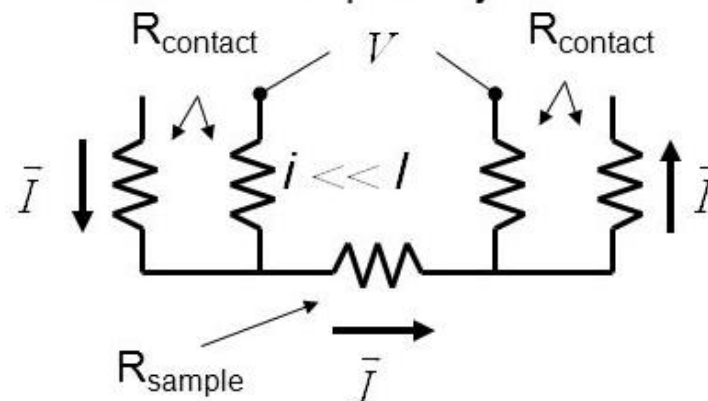
Measures sample + contact resistance + probe resistance



Four-point probe



Measures sample only



In four-point probe, negligible current flows through the voltmeter, the only voltage drop measured is across R_{sample} .

Metoda Van der Pauw

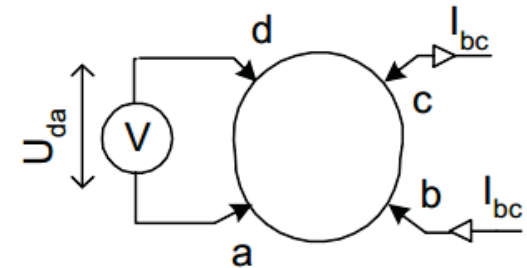
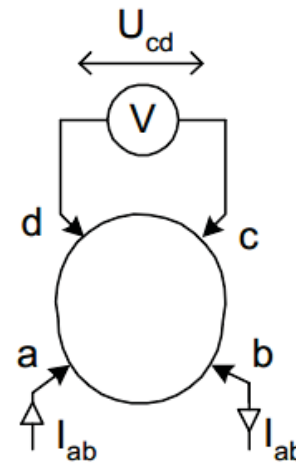
Metoda Van der Pauw se používá u vzorků, jež mají o mnoho menší tloušťku než šířku a délku. Umožňuje určit rezistivitu destiček polovodiče při splnění požadavku, aby celé uspořádání, tzn. destička s elektrodovým systémem, je ploché. Destička musí mít stejnou tloušťku, ale nemusí mít jednoduchý pravidelný tvar. Bývá vybavena čtyřmi bodovými kontakty, vytvořenými na jejím obvodu. Měření se skládá ze dvou samostatných kroků.

1. krok: změření odporu R_1 $R_1 = \frac{U_{cd}}{I_{ab}}$

2. krok: změření odporu R_2 $R_2 = \frac{U_{ad}}{I_{bc}}$

Určení rezistivity:

$$\rho = \frac{\pi \cdot h}{\ln 2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f(R_1/R_2)$$

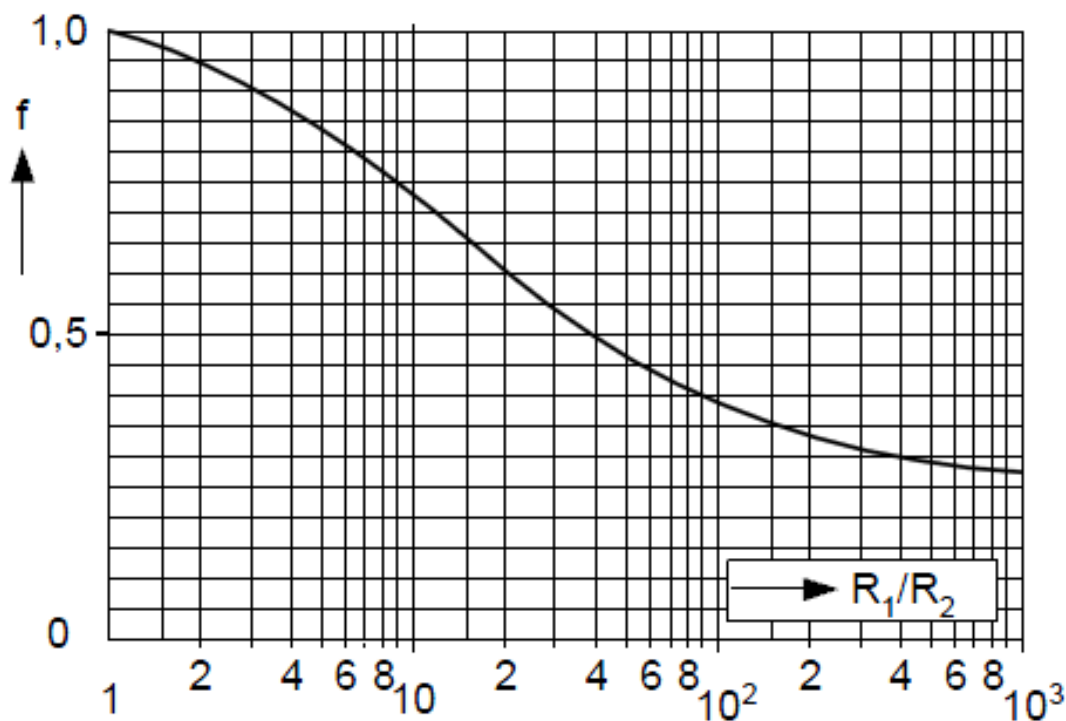


h je tloušťka destičky

$f(R_1/R_2)$ je korekční faktor, který je vyjádřen graficky

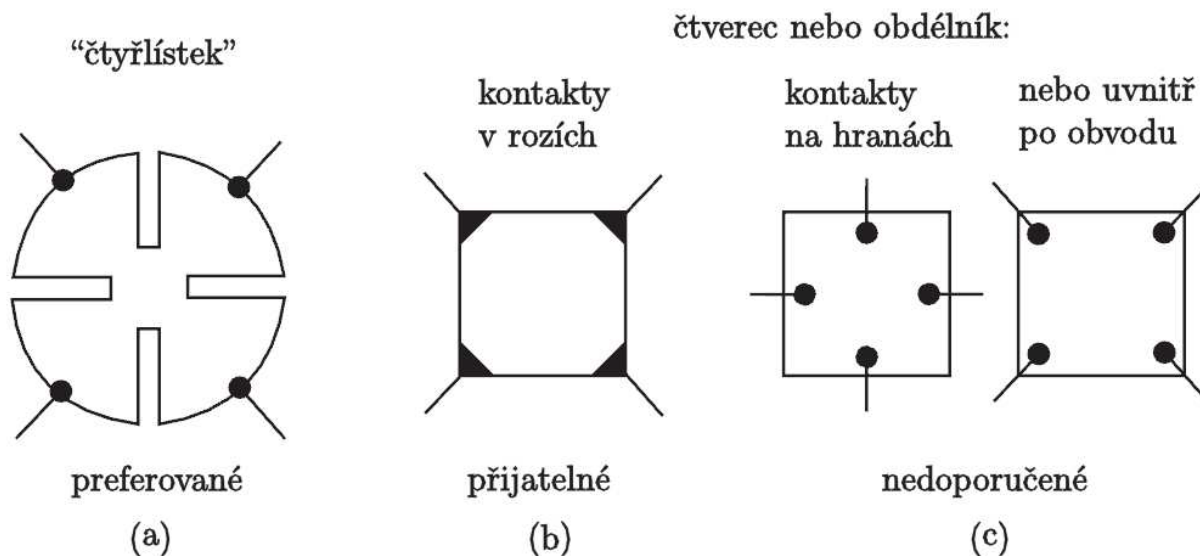
Korekční faktor přihlíží k rozdělení kontaktů po obvodu destičky. Kdyby destička byla kruhová a měla rozmístěné kontakty symetricky proti sobě, byly by odpory R_1 a R_2 u homogenního materiálu stejně velké a $f(R_1/R_2) = 1$.

Metoda se využívá u měření rezistivity křemíkových desek (waferů).



Aby bylo měření dostatečně přesné, jsou na kontakty kladeny tyto požadavky:

- **Ohmické kontakty musí být umístěny na okrajích vzorku.**
- **Ploška kontaktů musí být teoreticky nekonečně malá** – snažíme dosáhnout co nejmenších rozměrů kontaktů.
- **Kontakty by měly být ze stejného materiálu, aby se eliminoval vliv termoelektrického napětí.**



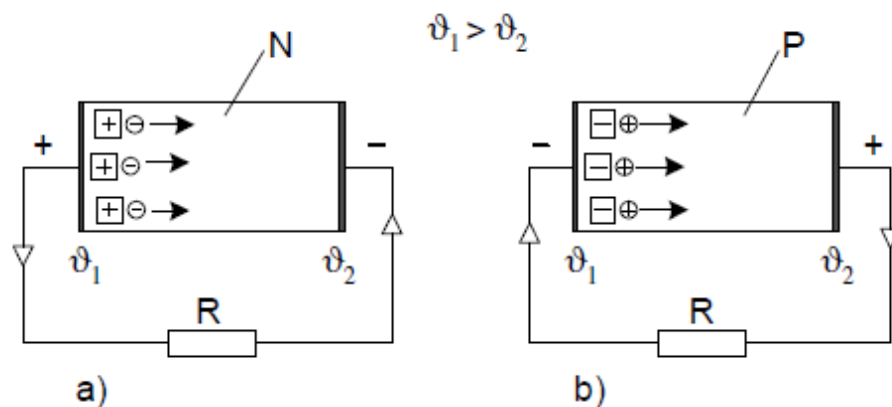
Geometrické uspořádání vzorků, používané při metodě Van der Pauw

Stanovení typu polovodiče

Stanovení typu vodivosti patří mezi základní informace o každém polovodiči. Typ vodivosti **ovlivňuje chování polovodičových součástek, jejich výrobu i aplikační vymezení**. Zjistit typ vodivosti není experimentálně složité. Lze to učinit prostřednictvím **termoelektrických jevů (Seebeckova i Peltierova) nebo galvanomagnetického Hallova jevu**.

Určení typu polovodiče na základě termoelektrického jevu

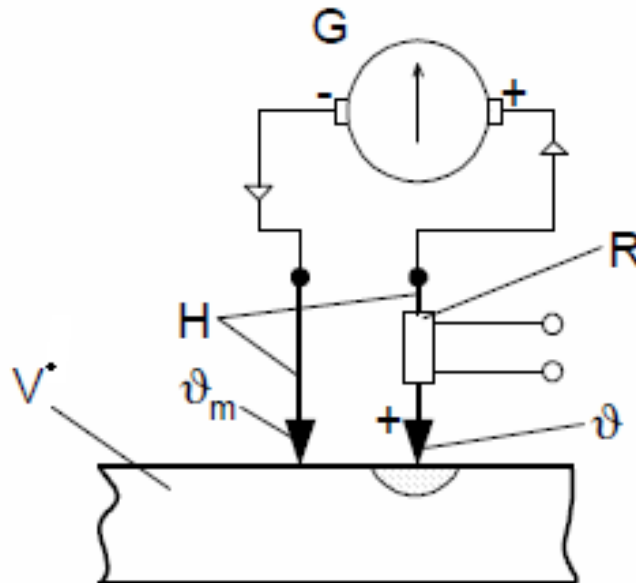
Polovodič je připojen do obvodu a **jeden jeho konec je zahříván** tak, aby vůči druhému konci polovodiče **vznikl teplotní gradient**. Následně dochází k **přesunu majoritních nosičů** (elektrony pro N typ) **do chladnější oblasti**. V teplejší oblasti zůstávají ionizované nosiče (díry pro N typ), které jsou nepohyblivé. **Polovodič se stává zdrojem termoelektrického napětí a obvodem začne protékat proud**.



K zjištění typu vodivosti polovodiče lze použít citlivý galvanometr a pohyblivé přívody zakončené hroty.

Jeden hrot (chladnější) má teplotu místnosti ϑ_m , druhý musí mít teplotu vyšší. Při styku těchto hrotů s povrchem vzorku se malý objem polovodiče pod teplým hrotem ohřeje. V případě polovodiče N získá tedy ohřátý hrot kladný potenciál. Za předpokladu, že je teplý hrot propojen s kladnou svorkou galvanoměru, ručička přístroje se vychýlí doprava. U polovodiče typu P je smysl výchylky opačný. Velikost výchylky není při tomto měření důležitá (závisí na teplotě a konduktivitě materiálu), rozhodující je pouze smysl výchylky.

G je galvanoměr
H jsou měřicí hroty
R je vyhřívací tělísko
 ϑ_m , ϑ jsou teploty hrotů
 V° je vzorek polovodiče



Stanovení koncentrace příměsí

Informace o počtu substitučních poruch krystalové mřížky polovodiče (žádaných a vytvářených určitou technologií během výroby polovodiče), neboli o úrovni dotace polovodiče, lze získat z měření rezistivity ρ , respektive vodivosti $\gamma = 1/\rho$ v daném místě.

U polovodičů je vodivost vyjádřena základním vztahem: $\gamma = q(n\mu_n + p\mu_p)$

Při výrobě polovodičových součástek vycházíme z polovodiče typu P nebo polovodiče typu N. Polovodič typu P má určitou koncentraci N_A bodových substitučních poruch, zvaných akceptory, u polovodiče typu N jsou to donory s koncentrací N_D . Protože atomy běžně používaných dopandů (tzv. mělká příměsová centra) jsou při teplotě místnosti zcela izolovány, potom u polovodiče, který obsahuje jeden typ příměsí, s dostatečnou přesností napsat:

$$n_n = N_D \quad a \quad p_p = N_A$$

Je-li v čistém polovodičovém křemíku nahrazen každý stý atom Si např. pětímocným atomem fosforu (vzniká polovodič typu N), pak koncentrace volných elektronů je vyšší než koncentrace děr. Proto u příměsových polovodičů platí:

$$\gamma = qn_n\mu_n$$

$$\gamma = qn_p\mu_p$$

Dosazením do předchozích rovni lze získat rezistivitu $\rho=1/\gamma$.

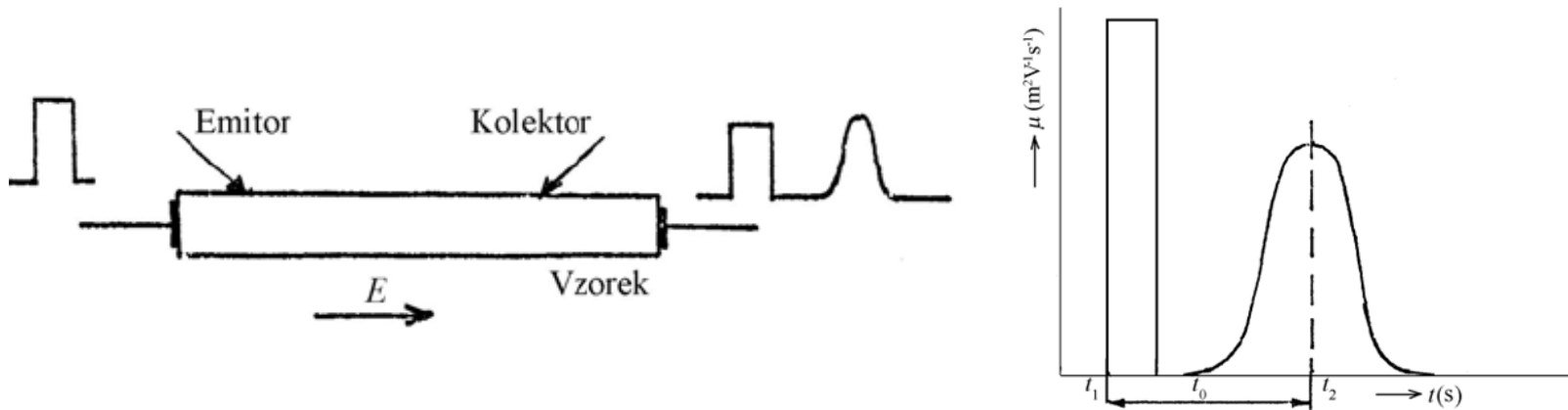
$$\rho = \frac{1}{qN_{D(A)}\mu_{n(p)}}$$

Vztah vyjadřuje významnou souvislost mezi makroskopickou a snadno měřitelnou rezistivitu a koncentrací atomů dopantu.

Stanovení driftové pohyblivosti nosičů

Impulzní metoda

Dlouhým vzorkem polovodiče necháme protékat proud. Podél vzorku vznikne elektrické pole E . Ke vzorku přiložíme dva hroty - emitor a kolektor.

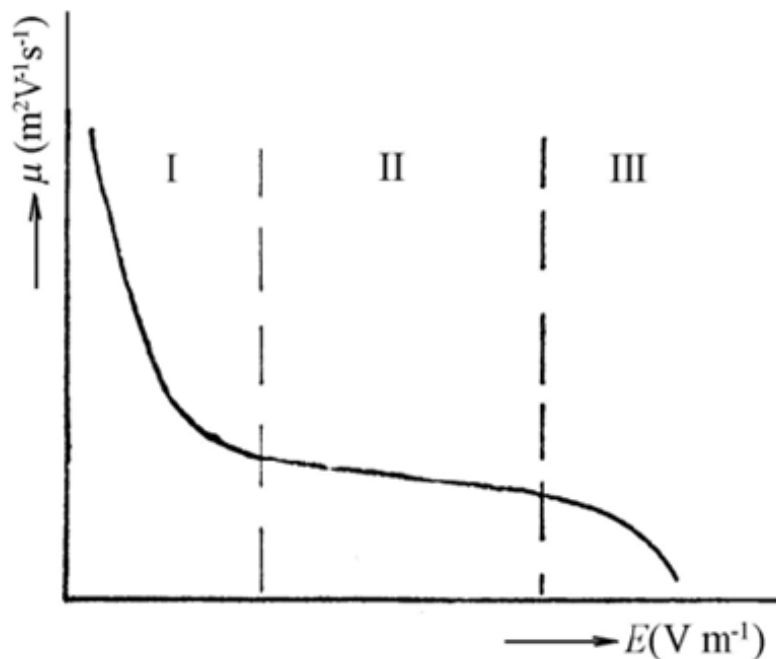


Na emitor přivedeme pravoúhlý impuls o šířce $0,1 - 20 \mu\text{s}$. Signál na kolektoru je pozorován osciloskopem, kde se objeví obraz pravoúhlého pulsu se zpožděním. Po čase t_0 se objeví další puls, přenesený minoritními nosiči. Deformace vznikne vlivem difúze a vlivem konečné doby života minoritních nosičů. Při vzdálenosti hrotů d , intenzitě elektrického pole E a časové vzdálenost pulsů t_0 , platí pro driftovou pohyblivost vztah:

$$\mu = \frac{d}{Et_0}$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{RI}{d} = \frac{\rho \frac{d}{S} I}{d} = \frac{\rho I}{S}$$

Z tvaru pulsů lze rovněž určit, při velmi přesném měření, **dobu života a difúzní konstantu**. Měřením závislosti $\mu = F(E)$ dostaneme závislost:



V oblasti I je závislost pohyblivosti na intenzitě elektrického pole silně zkreslena vlivem difúze. V oblasti II jeví křivka tendenci nasycení a blíží se ke skutečné hodnotě μ . V oblasti III je potom další zkreslení způsobeno zahříváním vzorku.

Hallův jev

Na základě Hallova jevu lze určit driftovou rychlost nosičů, pohyblivost nosičů a koncentraci nosičů. Při rovnováze elektrické a magnetické složky Lorentzovy síly lze vyjádřit vztah pro velikost driftové rychlosti. K měření se využívá metoda Van der Pauw.

$$v_d = \frac{U_H}{bB} \quad v_d = \frac{I}{n \cdot e \cdot S} \quad \rho = \frac{1}{en\mu} \quad \mu = \frac{U_H t}{BI\rho}$$

S je plocha průřezu polovodiče protékaného proudem

I je protékající proud

e je elementární náboj

n je koncentrace nosičů

U_H je Hallovo napětí

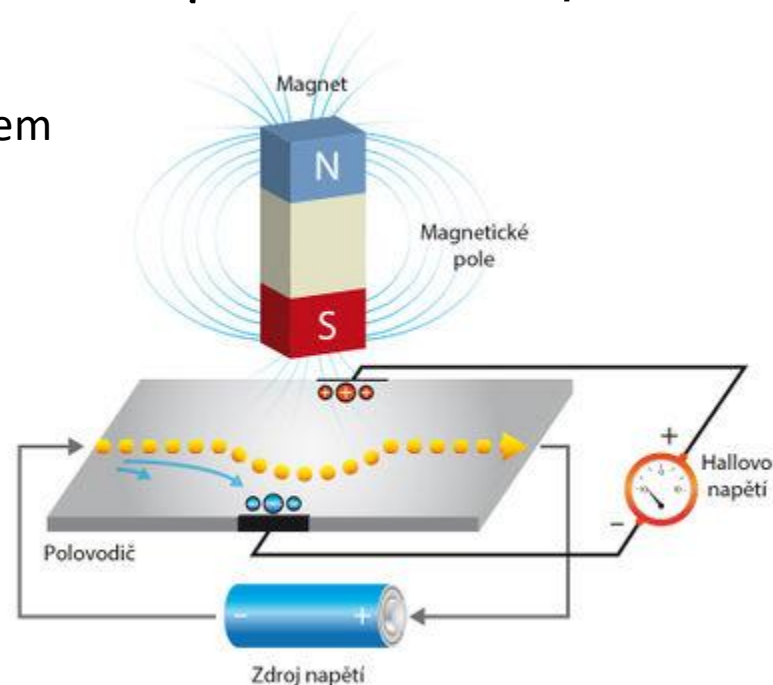
B je magnetická indukce

b je šířka polovodiče

t je tloušťka polovodiče

E je intenzita elektrického pole

μ je pohyblivost



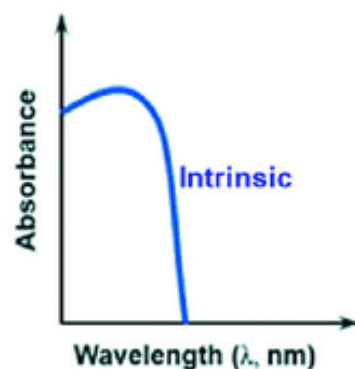
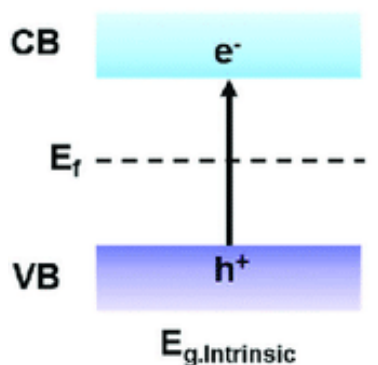
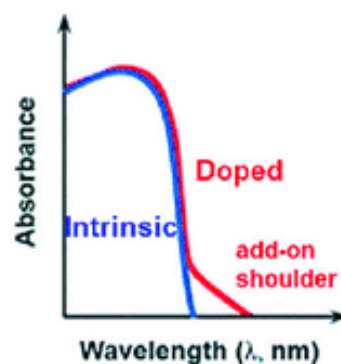
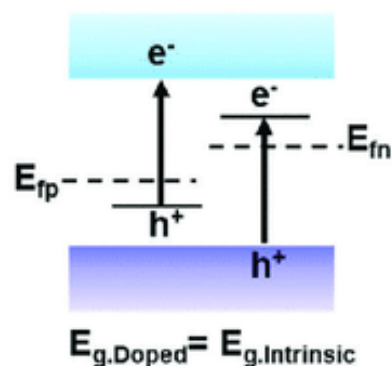
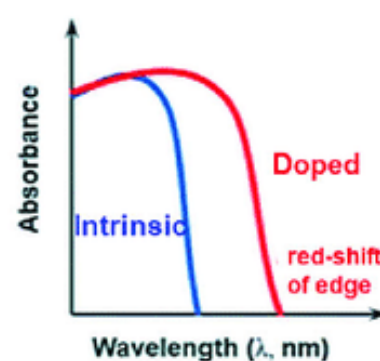
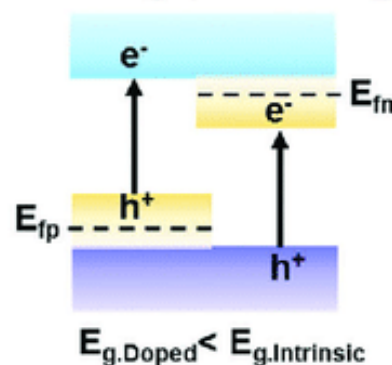
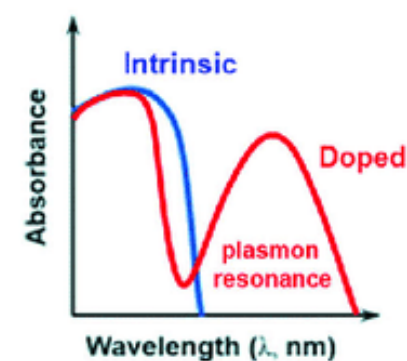
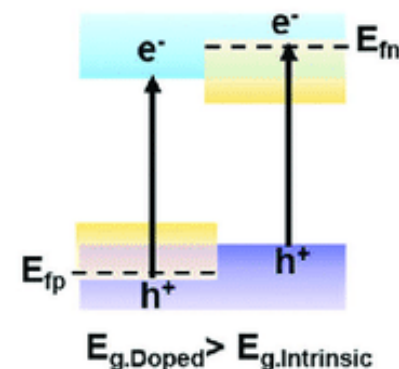
Optická měření

Měření šířky zakázaného pásu polovodiče

Aby elektron přešel z valenčního do vodivostního stavu, musí být dodána energie dostatečná k přechodu do vodivostního pásu. Jednou z takových možností je **dodání energie ve formě světla s vhodnou vlnovou délkou – vnitřní fotoelektrický jev**. Kromě vnitřního fotoelektrického jevu známe u polovodičů ještě tzv. **hradlový fotoelektrický jev**. Při tomto jevu se energie dopadajících fotonů spotřebuje na přechod elektronů, které jsou pak již ve vodivostním pásu. Na přechodu dvou polovodičů typu PN tak vznikne elektrické napětí.

$$E_g = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda}$$

K přechodu z valenčního do vodivostního pásu dojde tehdy, pokud **energie dopadajících kvant bude dostatečná k překonání zakázaného pásu – změna vodivosti, či vznik napětí**. Při dosažení mezní vlnové délky foton proud prudce roste. Při zkracování vlnové délky dojde k opětovnému poklesu vodivosti polovodiče z důvodu vyšší absorpce světla v krystalu a vyšší rekombinaci. **Fotoproud dosahuje maxima, dopadají-li fotony na polovodič s energií rovné šířce zakázaného pásu**. Je tedy možné ze spektrální fotocitlivosti polovodičů určit šířku zakázaného pásu.

a Intrinsic Semiconductor

b Doped Semiconductor – Local States

c Doped Semiconductor – Band gap narrowing

d Degenerately doped semiconductors


Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi dvouvodičovou a čtyřvodičovou metodou měření rezistivity polovodiče?
- Jaké jsou omezující podmínky použití čtyřvodičové metody?
- Vysvětlete princip metody Van der Pauw.
- Jakým způsobem stanovíte typ vodivosti polovodiče?
- Jak změříte koncentraci příměsí v polovodiči?
- Jak změříte pohyblivost nosičů v polovodiči?
- Jaké parametry polovodičů lze určit na základě optických měření?

