

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

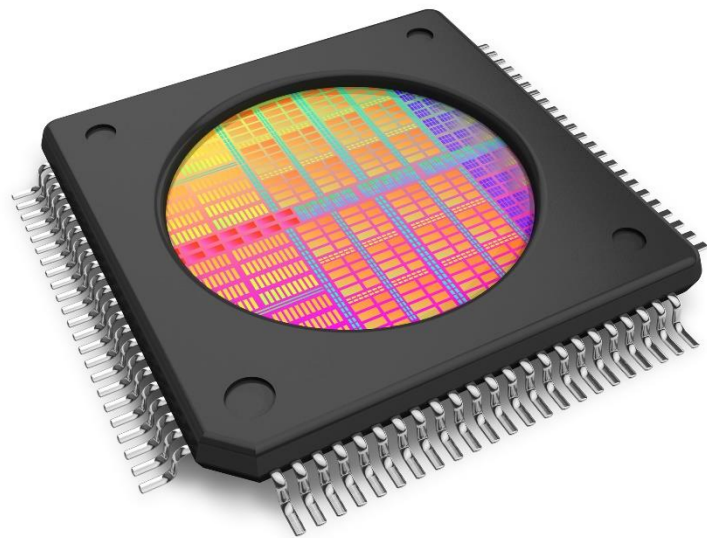
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

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



***Kontaktní jevy
polovodičových materiálů***

Přednáška 4



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

**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

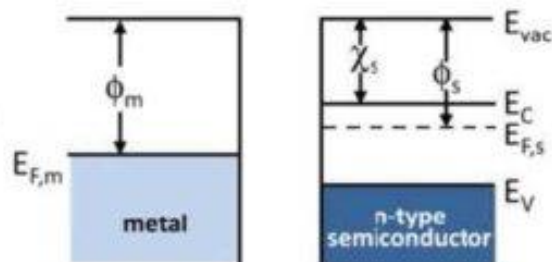
Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, CO SE STANE PŘI SPOJENÍ KOVU A POLOVODIČE.
- ZJISTÍTE, JAK URČIT SCHOTTKYHO A OHMICKÝ KONTAKT.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU DŮLEŽITÉ PARAMETRY SCHOTTKYHO KONTAKTU.
- ZJISTÍTE, PROČ JE SCHOTTKYHO KONTAKT VHODNĚJŠÍ PRO VYSOKOFREKVENČNÍ APLIKACE.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ ZPŮSOBY MĚŘENÍ SE POUŽÍVAJÍ PRO HODNOCENÍ OHMICKÝCH KONTAKTŮ.

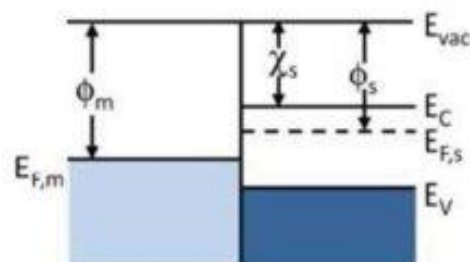
metal/semiconductor

$$\phi_m > \phi_s$$

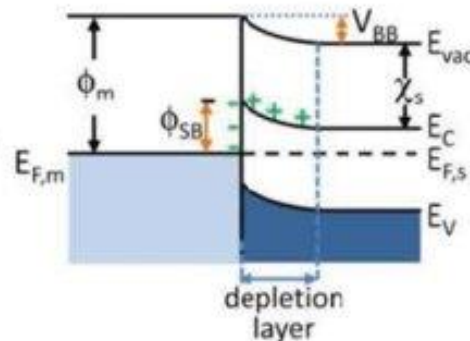
not in contact



in contact

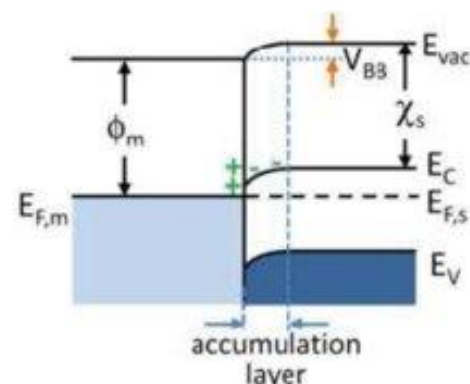
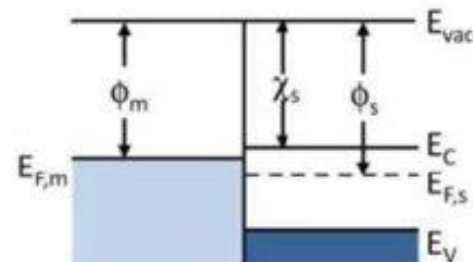
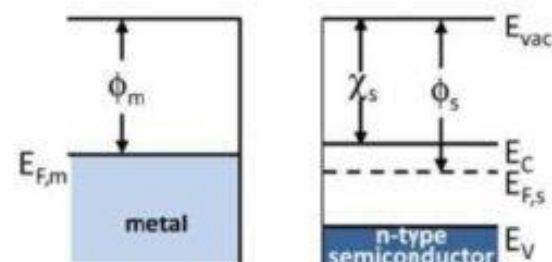


in contact
under equilibrium



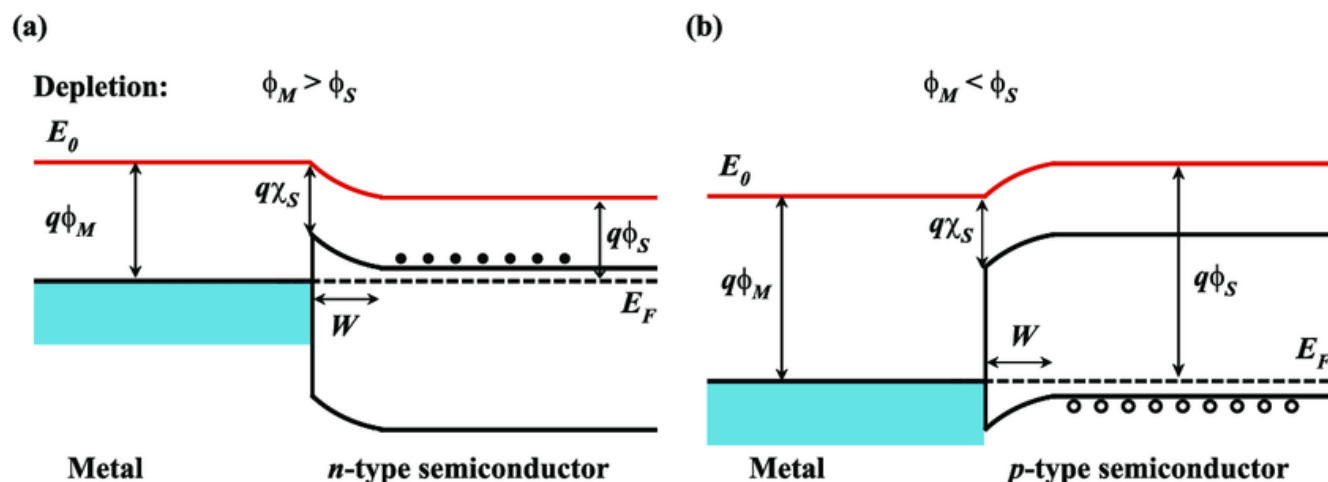
Vznik Schottkyho kontaktu

$$\phi_m < \phi_s$$

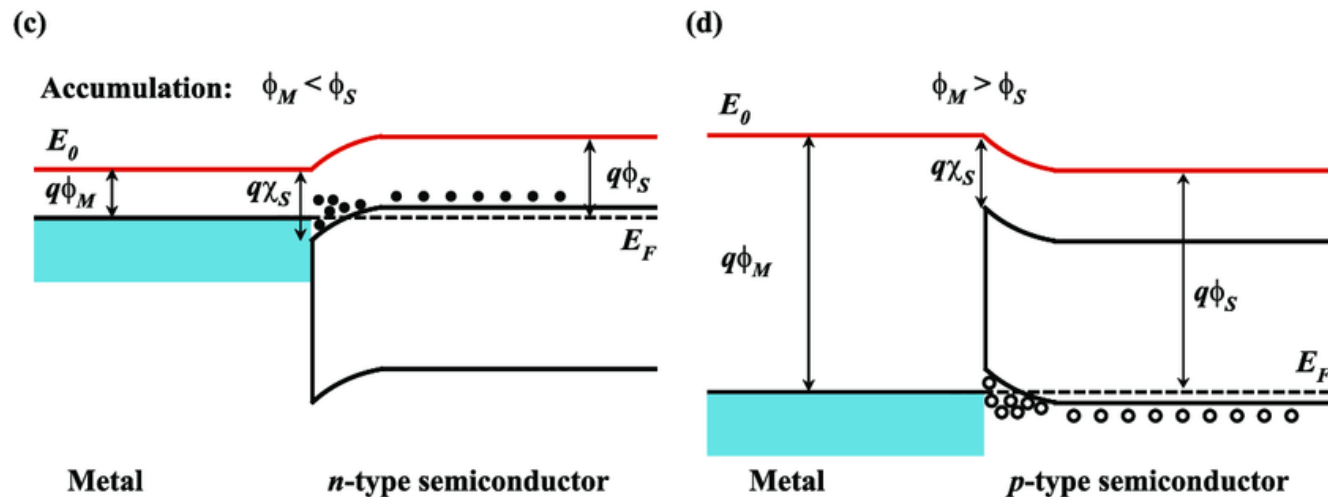


Vznik ohmického kontaktu

Schottkyho kontakt



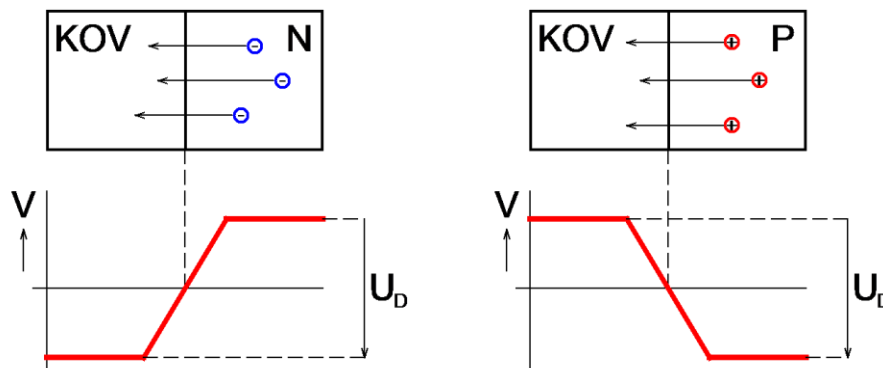
Ohmický kontakt



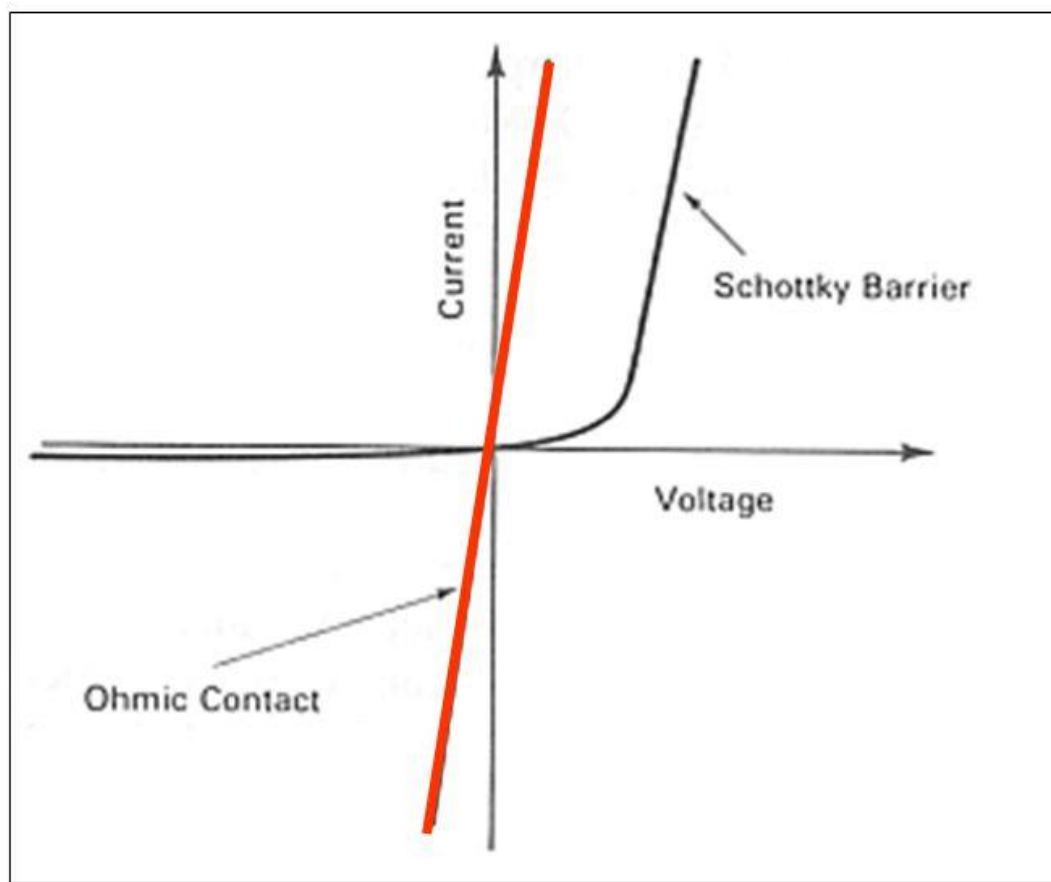
Spojení kov-polovodič může vykazovat (při splnění určitých podmínek) usměrňovací účinek stejně jako přechod PN nebo může mít pouze odporový charakter. Usměrňující spojení se nazývá Schottkyho kontakt a k jeho vytvoření je v zásadě potřeba, aby koncentrace příměsí v polovodiči byla malá.

Po vytvoření přechodu kov-polovodič lze smysl potenciálové přehrady (polaritu difúzního napětí) určit podle Schottkyho pravidla.

Volné nosiče náboje v polovodiči se snadněji pohybují z polovodiče do kovu než obráceně. Z toho plyne, že polovodič typu N při styku s kovem ztrácí elektrony a získává kladný potenciál, kdežto polovodič typu P ztrácí díry, a tak získává záporný potenciál.



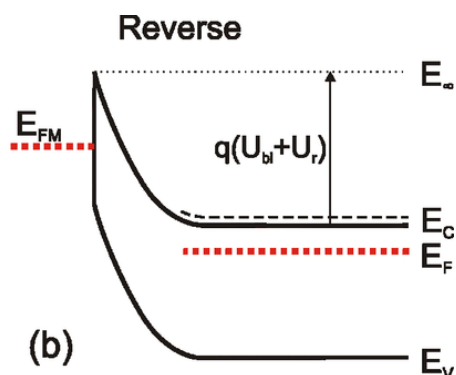
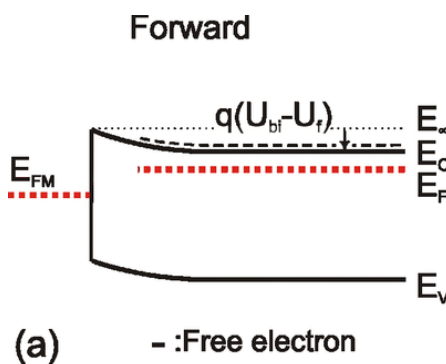
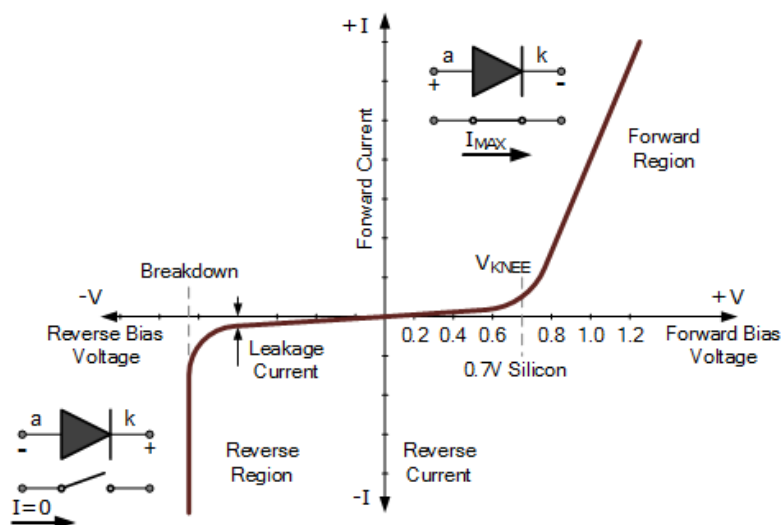
V-A charakteristika Schottkyho a ohmického kontaktu



Schottkyho kontakt

Pro vedení proudu se využívá jen majoritních nosičů náboje. Aby byl Schottkyho kontakt polarizován v přímém směru, je nutné připojit záporné napětí na polovodič typu N nebo kladné napětí na polovodič typu P.

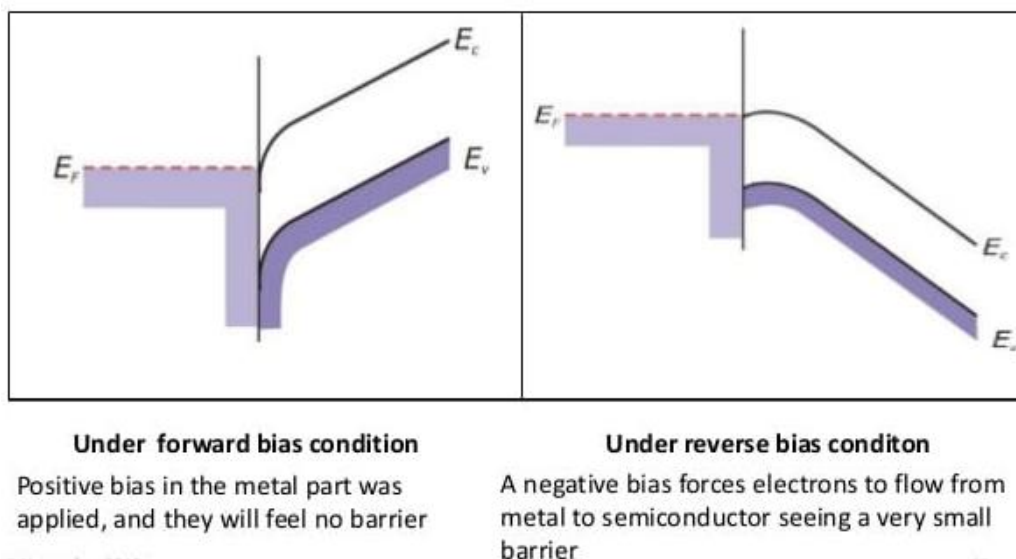
Velmi cennou vlastností tohoto kontaktu je zvláště vysoká rychlost, se kterou kov odebírá z místa přechodu volné nosiče náboje. Součástky, založené na Schottkyho kontaktu se používají jako **rychlé spínače** a nazývají se Schottkyho diody. Malý odpor tohoto kontaktu také upřednostňuje jejich použití při velmi vysokých kmitočtech.



Ohmický kontakt

Neusměrňující spojení se používá k vytvoření kontaktních ploch pro realizaci vývodů z polovodičových součástek. Vzniká tehdy, je-li koncentrace příměsí v polovodiči vysoká, potenciálová bariéra je v důsledku toho naopak malá, nosiče náboje ji překonávají bez překážek, **kontakt neusměrňuje a chová se jako odpor**. Polovodiče s vysokou koncentrací příměsí se nazývají degenerované a označují se N^+ , P^+ .

Vhodné kovy pro vytvoření těchto kontaktů jsou Al, Ti, Ni a sloučeniny Pt, Pd s Si.



Kapacita přechodu

Bariérová kapacita

Vyprázdněná vrstva přechodu má tloušťku d , která je **závislá na přiloženém napětí U** . Přechod se svou vyprázdněnou vrstvou se chová jako **deskový kondenzátor** s plochou S rovnou ploše přechodu, s relativní permeabilitou určenou polovodičem a s šířkou dielektrika rovné šířce vyprázdněné oblasti d .

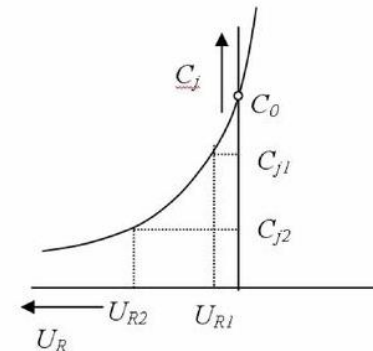
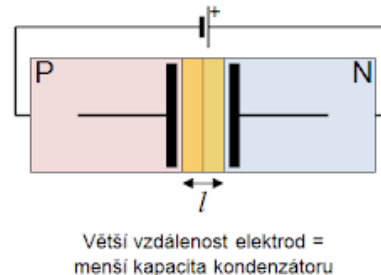
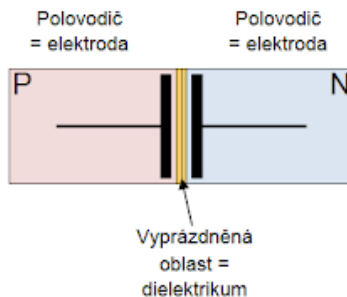
$$C_j = \frac{dQ}{dU} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad d = \sqrt{\left[\frac{2\varepsilon}{q} (U_D - U) \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]}$$

Difúzní kapacita

Vzniká, je-li na přechod **přiloženo stejnosměrné napětí v propustném směru**, na kterém je superponována střídavá složka. Nosiče vykazují jistou **dobu života τ** a tím i setrvačné vlastnosti. Je závislá na době života nosičů τ a velikosti stejnosměrného proudu I .

$$Q = I\tau_p = qSL_p p_n e^{\frac{qU}{kT}}$$

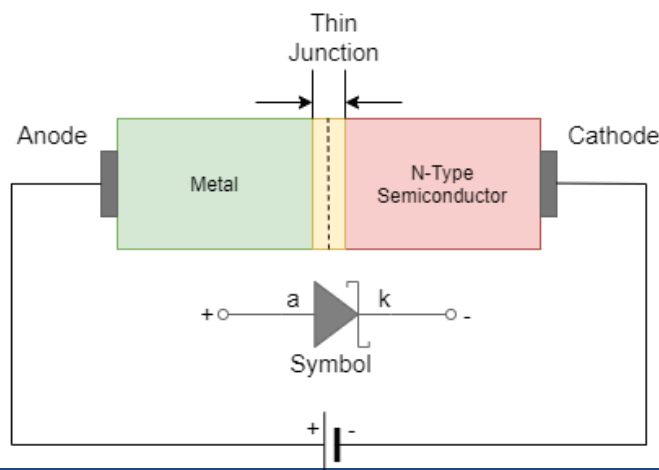
$$C_D = \frac{q^2}{kT} SL_p p_n e^{\frac{qU}{kT}} = \frac{q}{kT} I\tau_p$$



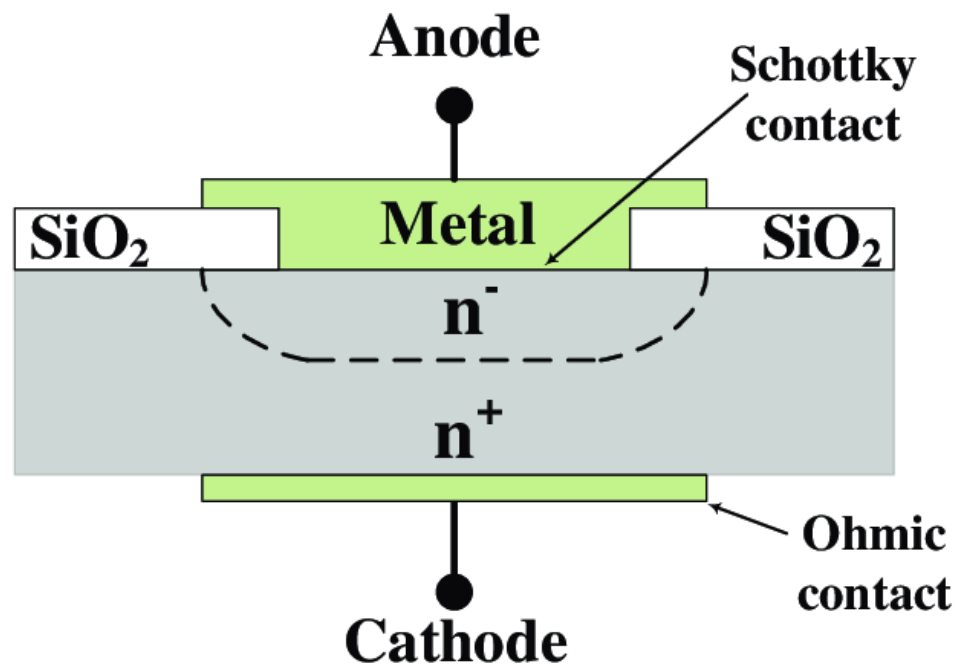
Konstrukce kontaktu kov-polovodič

Základní část krystalu tvoří **destička tloušťky asi 0,2 mm s velkou koncentrací příměsí s vodivostí typu N^+** . Na ní je **epitaxí vytvořena vrstva polovodiče stejného typu vodivosti tloušťky několik μm** . Koncentrace příměsí je mnohem menší než v základní destičce. Povrch epitaxní vrstvy je očištěn a pokryt oxidem, ve kterém je vyleptán otvor pro **napaření kovové elektrody diody**.

Tato **jednoduchá konstrukce diod** má však nevýhodu v tom, že **umožňuje vznik elektrických polí velké intenzity v okrajových oblastech** ochuzené vrstvy (strmé okraje, existence kladných nábojů na rozhraní SiO_2), což vede k **nárůstu proudu** v těchto oblastech, **nízkým průrazným napětím a špatným šumovým vlastnostem diod**.



Tento nedostatek **odstraňuje konstrukce diody s kovovou elektrodou překrývající oxidovou vrstvou**. Ochuzená vrstva je pod kondenzátorem zaoblena a její ostré okraje způsobující měkký průraz jsou eliminovány. **Oblasti překrytí oxidové vrstvy musí být malé, aby se vlivem přídavné kapacity nezhoršovaly kmitočtové vlastnosti diody**. Některé diody se proto opatřují ještě ochranným prstencem.



Čas zotavení

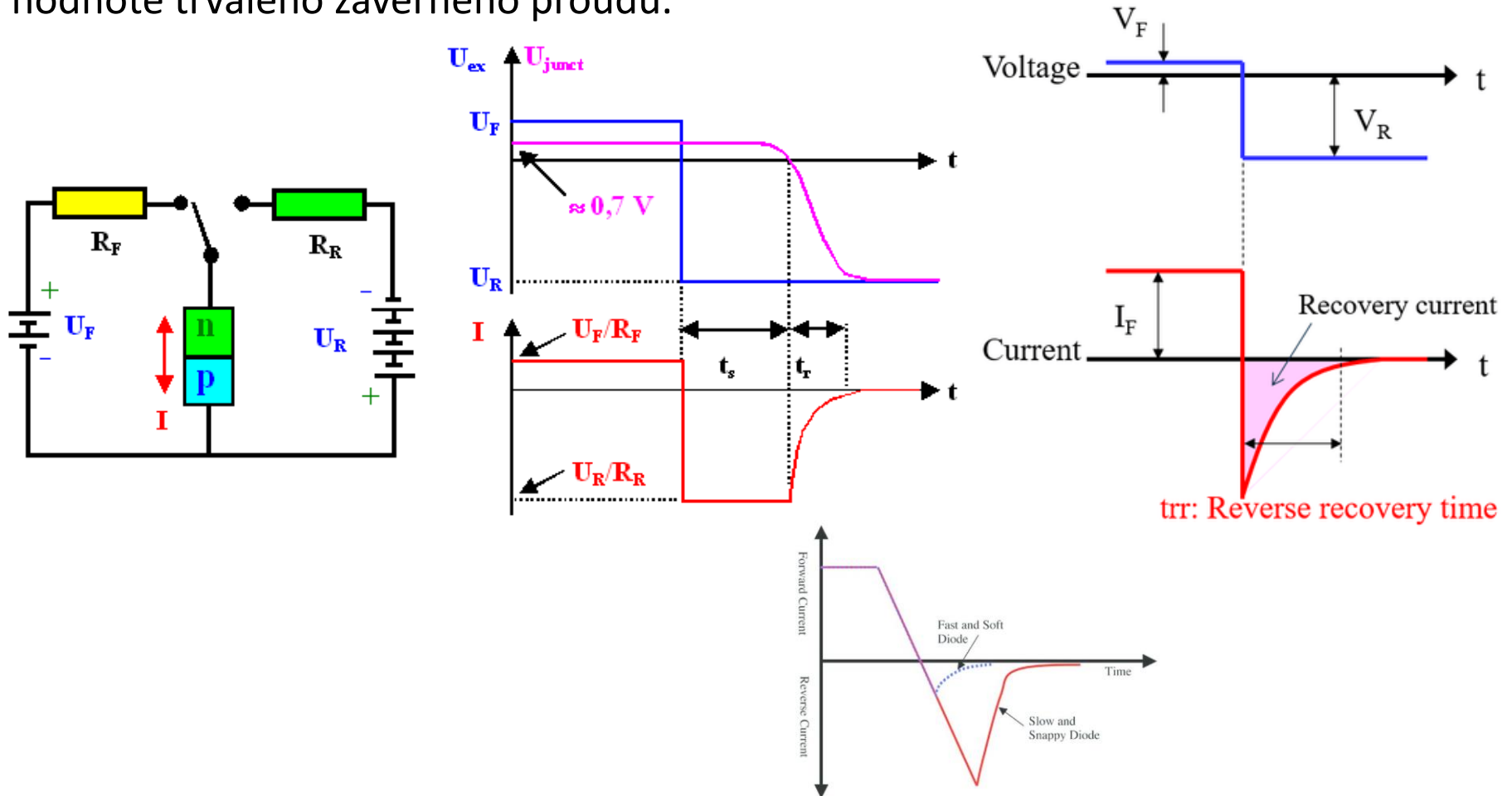
Oproti diodám s PN přechodem má Schottkyho dioda **menší úbytek napětí v propustném směru (Schottkyho dioda 0,3 V, křemíková dioda s PN přechodem 0,7 V) a vyšší proud (až stovky nA) v závěrném směru**.

Výhodou proti hrotovým diodám je také **vyšší mechanická odolnost a kratší zotavovací doba. Schottkyho diody mohou přejít z vodivého do nevodivého stavu za dobu menší než 1 ns**. Jednoduchost výroby umožňuje vyrábět diody s velmi malou plochou přechodu.

Výše zmíněné parametry předurčují Schottkyho diody pro **využití v extrémně rychlých spínacích obvodech** ve výpočetní technice, **radarových zařízeních** či k **usměrnění malých napětí s frekvencí až do desítek GHz**.

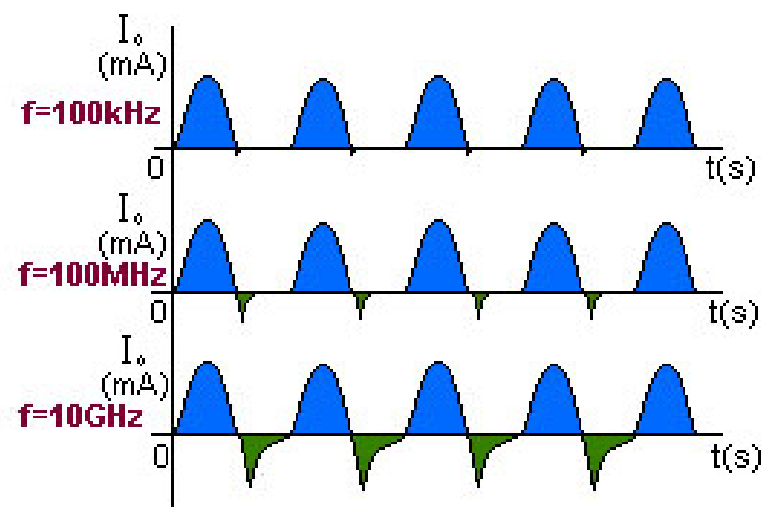
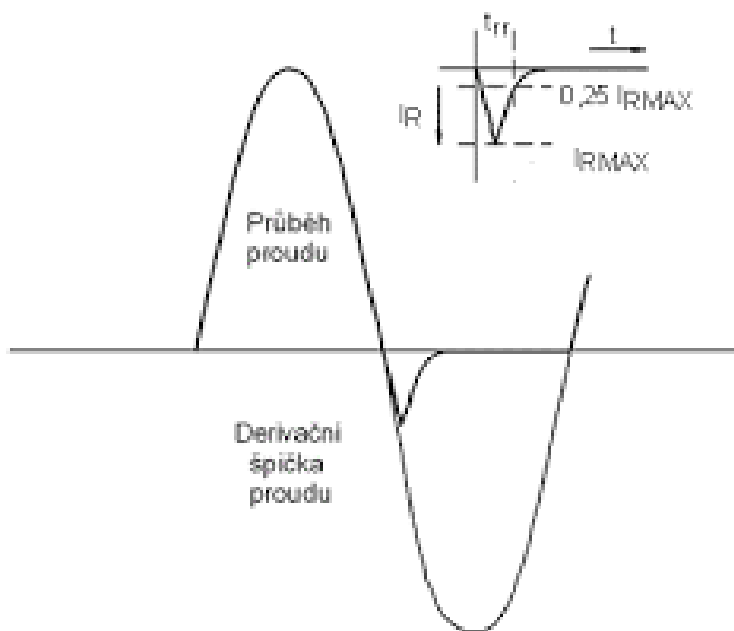
Také byly **vyvinuty výkonové verze těchto diod**, které se s oblibou využívají k **usměrňování malých napětí ve spínaných zdrojích** (například počítačové zdroje). Zde se sice jedná pouze o kmitočty stovek kHz, ale **proudy dosahují desítek ampér**.

Při přechodu s propustného do závěrného stavu diody hovoříme o tzv. **komutaci diody**. V důsledku jisté doby života nosičů (páru elektron-díra) **diodou prohází dočasně špičkový závěrný proud s max. hodnotou I_{RMAX} po dobu t_{rr}** než se ustálí na hodnotě trvalého závěrného proudu.



Mezní frekvence

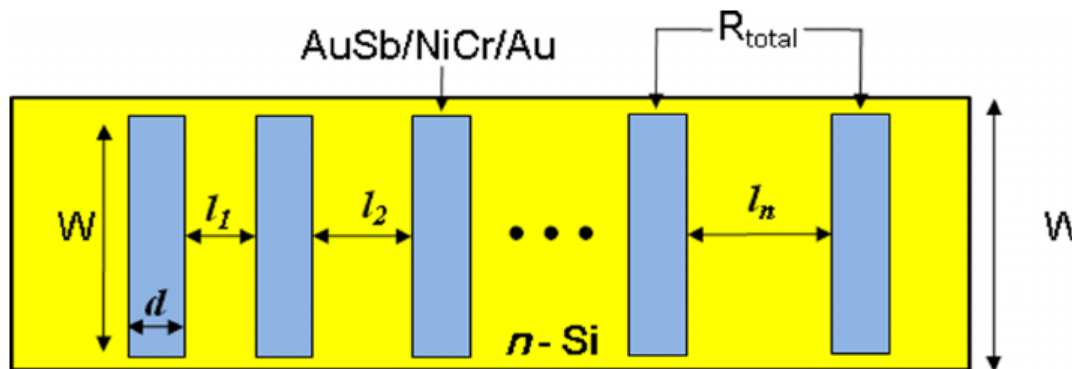
Vedení proudu se v Schottkyho diodě účastní pouze **majoritní nosiče** a při difúzi se na okrajích hradlové vrstvy **neakumulují minoritní nosiče**, proto je **doba mezi vznikem a zánikem hradlové vrstvy značně menší**. Z tohoto důvodu se mohou Schottkyho diody využít při **usměrňování vyšších frekvencí**.



Měření kontaktních odporů

TLM metoda

TLM (Transfer Length Method) je technika používaná ke **zjišťování kontaktního odporu mezi kovem a polovodičem**. Tato technika spočívá ve **vytvoření několika kontaktů kov-polovodič s různou vzdáleností mezi kontakty**. Měření kontaktního odporu je možné provádět několika způsoby. **Kontakty většinou mají různou vzdálenost**. Obvod se uzavírá přes metalický kontakt, spojení kov-polovodič, materiál polovodiče, znovu přes spojení kov-polovodič (v opačném směru) a nakonec druhý metalický kontakt. **Změřená hodnota odporu je kombinací kontaktního odporu prvního a druhého kontaktu (R_{PAD}) a odporu polovodiče (R_{POL}) mezi kontakty, přičemž vlastní odpor metalické vrstvy se zanedbává.**



Provede se několik takovýchto měření a ze získaných hodnot se sestojí graf hodnoty odporu v závislosti na vzdálenosti kontaktů. Aproximuje-li se získaná lineární závislost, průsečík s osou Y vyjadřuje dvojnásobnou hodnotu kontaktního odporu ($2R_{PAD}$). Výsledná hodnota kontaktního odporu se získá prostým vydělením hodnoty určené z grafu.

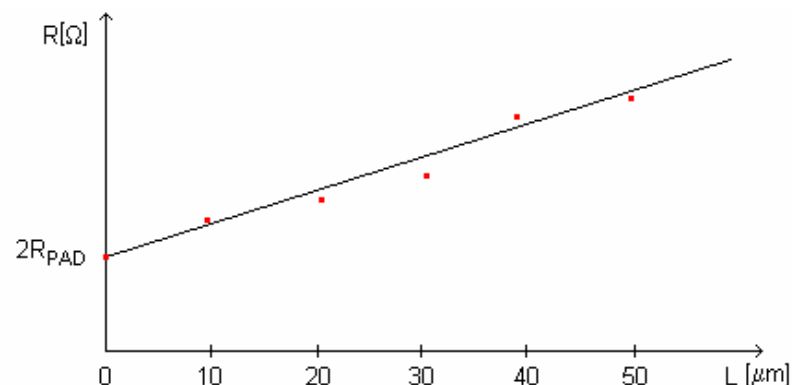
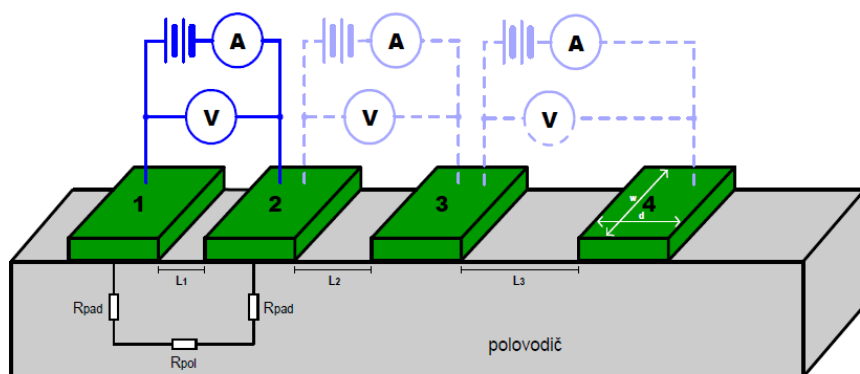
Další variantou je mít **všechny kontakty stejně daleko od sebe**. Zdroj proudu se potom připojí na první a poslední kontakt a měřením napětí mezi kontakty, počínaje prvním získáme hodnoty. **Aproximujeme-li získanou závislost, průsečík s osou Y vyjadřuje hodnotu kontaktního odporu (R_{PAD})**.

Různá vzdálenost mezi kontakty

Podmínkou této varianty je **stejná velikost kontaktů a jejich různá vzdálenost**.

Na dva sousední kontakty se přiloží zdroj napětí a změří se proud procházející obvodem. Z hodnoty napětí a proudu se podle Ohmova zákona spočítá **hodnota odporu, která se vynese do grafu v závislosti na vzdálenosti**. Takto změřená hodnota je **součtem tří odporů $R_{PAD} + R_{POL} + R_{PAD}$** . Když se **vzdálenost dvou sousedních kontaktů blíží k nule R_{POL} se blíží také k nule a výsledná hodnota je rovna $2R_{PAD}$** . Hodnota $2R_{PAD}$ se určí jako průsečík s osou Y. Hodnota kontaktního odporu se spočítá podle vzorce:

$$r_{PAD} = R_{PAD} S_{PAD} \quad [\Omega m^2]$$

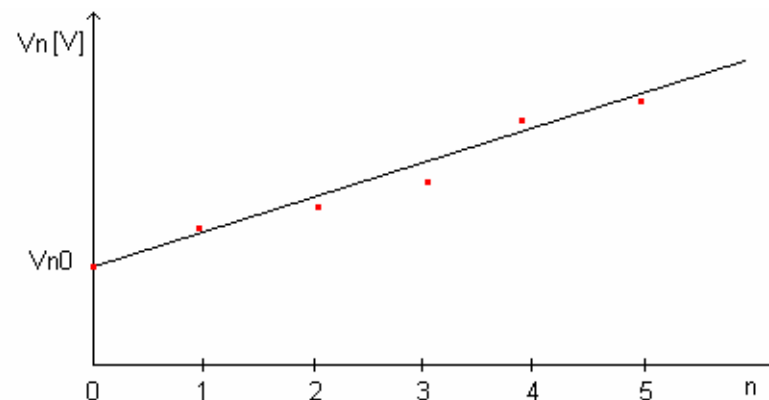
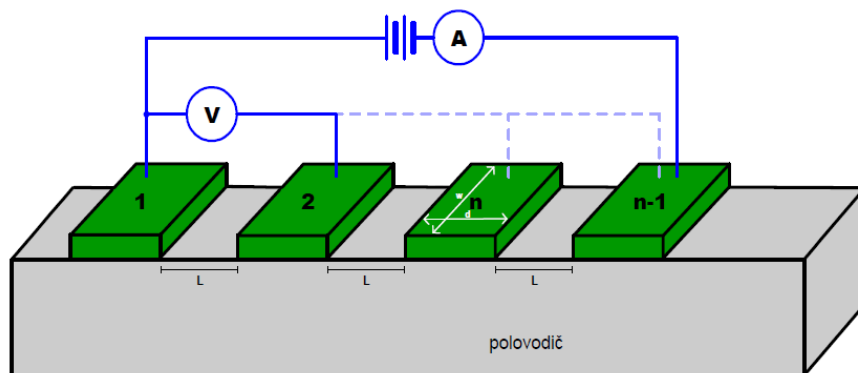


Stejná vzdálenost mezi kontakty

U této varianty musí být **metalické kontakty stejné veliké a jejich vzdálenost musí být také stejná.**

Na první a poslední kontakt se přiloží zdroj proudu a postupně se měří hodnoty napětí V_n na kontaktech 1 - 2, 1 - 3 až 1 - (n-1), které se vynesou do grafu, kde průsečík s osou Y určuje hodnotu napětí V_{n0} . Hodnota kontaktního odporu se spočítá podle vzorce:

$$r_{PAD} = \frac{V_{n0}}{I} S_{PAD} \quad [\Omega m^2]$$



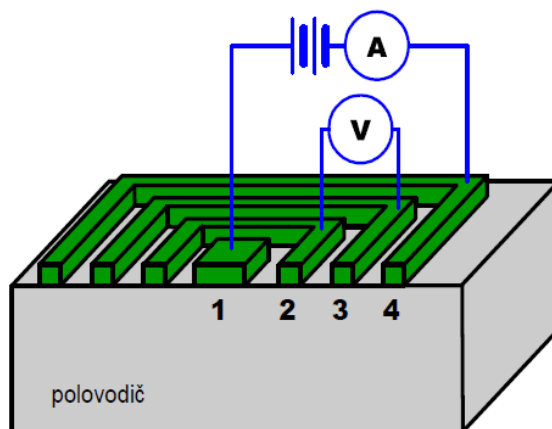
Vrstvový odpor difúzní vrstvy

Proudový zdroj je připojen k ploškám 1 a 4, voltmetr k ploškám 2 a 3.

Naměřené napětí je důsledkem proudu protékajícího přes difúzní křemíkovou vrstvu o ploše S_{DIF} . Podíl $R_{DIF} = U/I$ indikovaný ohmmetrem je odporem povrchové difúzní vrstvy. K výpočtu vrstevného odporu difúzní vrstvy použijeme následující vztah:

$$r_{DIF} = \frac{R_{DIF}}{S_{DIF}} \quad [\Omega/\text{čtverec}]$$

Hodnota kontaktního odporu se zanedbává.

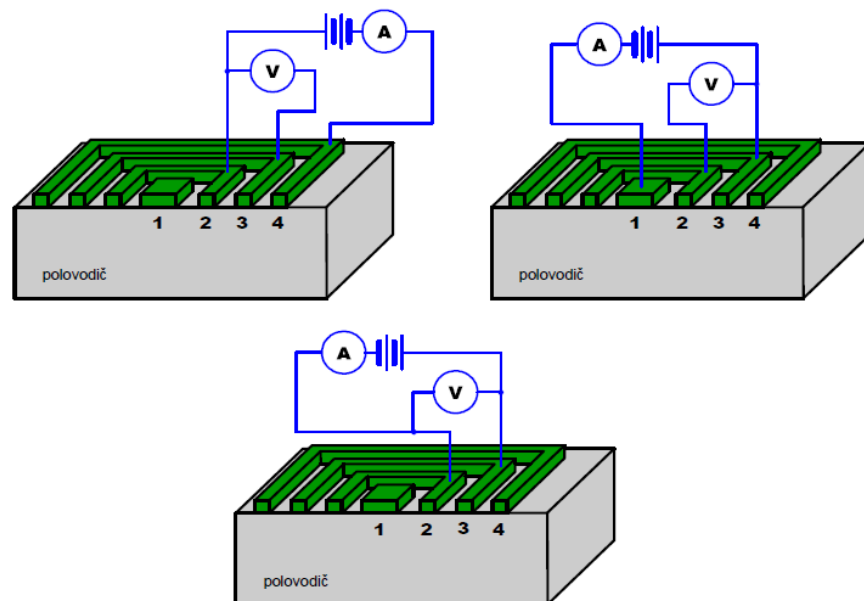


Kontaktní odpor

Přesunutím výstupů zdroje proudu na stejné kontaktní plošky, jež jsou spojeny s voltmetrem, je naměřena suma kontaktního odporu a odpor difúzní vrstvy. Pro tyto testy jsou možné tři různá zapojení. **Změřením všech tří možností získáme tři hodnoty odporu, který je kombinací kontaktního odporu a odporu difúzní vrstvy.** Předpokládáme-li, že proud je rovnoměrně distribuován přes plochu kontaktu, může být měrný elektrický odpor vypočten z odporů odečtených při jednotlivých testech.

$$r_{PAD2} = R_{PAD2} S_2 \quad [\Omega m^2]$$

$$r_{PAD3} = R_{PAD3} S_3 \quad [\Omega m^2]$$



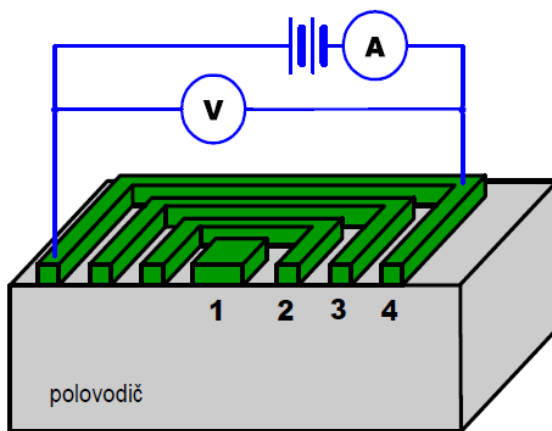
Vrstvový odpor metalizační vrstvy

Vrstvový odpor metalizační vrstvy (r_{MET}) je odporem vodivé cesty, který může být měřen při zapojení proudových, a napěťových výstupů ohmmetru na stejných kontaktních místech v protilehlých rozích testovacího obrazce.

Hodnota vrstvého odporu metalizační vrstvy se vypočítá podle vzorce:

$$r_{MET} = \frac{R_{MET}}{S_{MET}} \quad [\Omega/\text{čtverec}]$$

kde R_{MET} změřený je odpor metalizační vrstvy a S_{MET} je plocha metalizace.



Kontrolní otázky

- Co se stane, pokud dojde ke spojení polovodiče a kovu?
- Co je výstupní práce materiálů?
- Vysvětlete vznik Schottkyho kontaktu.
- Vysvětlete vznik Ohmického kontaktu.
- Jaký je rozdíl mezi difuzní a bariérovou kapacitou?
- Popište konstrukci a základní parametry kontaktu kov-polovodič.
- Co je komutace diody?
- Vysvětlete čas zotavení PN přechodu.
- Co je mezní frekvence PN přechodu a proč je důležitá?
- Jakým způsobem lze měřit kontaktní odpor?
- Vysvětlete princip TLM metody.

