

### Metodický návod:

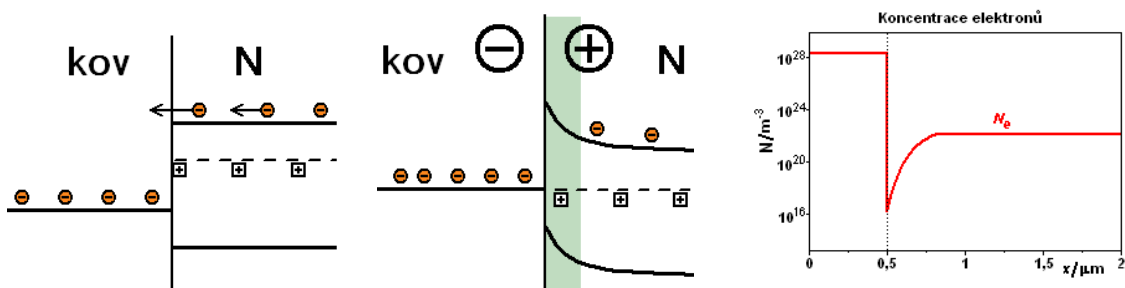
Tato část je vzhledem k analogii a stejnému provedení modelů přechodu kov-polovodič N a kov-polovodič P společná. V případě odlišností je popis modelu kov-polovodič P uveden v závorce.

1. Spuštění souborem „**a.4.1\_Kov-N.exe**“ („**a.4.2\_Kov-P.exe**“).  
Zobrazeny jsou oddělené části kov-polovodič, volné elektrony v kovu, majoritní nositelé náboje (u polovodiče N elektrony – červené, u polovodiče P díry – modré), ionty příměsí (čtverečky) a Fermiho energetické hladiny (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno grafem koncentrací nositelů. Na ovládacím panelu je možné pouze stisknutí tlačítka **START**.
2. Stisknutí tlačítka **START**.  
Dojde k ideálnímu spojení částí kov a polovodič. Probíhá difúze elektronů (u polovodiče P rekombinace s děrami). Díky nevykompenzovaným iontům vzniká difúzní napětí (označení **+**, **-** v kroužku), energetické hladiny se zakřivují. Rovnováha na přechodu nastává po vyrovnání Fermiho hladin. V polovodiči vznikla hradlová vrstva (zelená barva). Nyní je na ovládacím panelu k dispozici tlačítko **STOP** a posuvník.
3. Stisknutí tlačítka **STOP**.  
Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k nastavení počátečního stavu jako při spuštění programu. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po spojení obou částí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.
4. Nastavení vnějšího **napětí: -0,5 V** pomocí posuvníku.  
Vnější napětí se stejnou polaritou (označení **+**, **-** na okrajích struktury) jako napětí difúzní způsobuje zakřivení energetických hladin a úbytek nositelů náboje – rozšíření hradlové vrstvy. Pokles nositelů a rozšíření hradlové vrstvy je zřejmý i z grafu koncentrací. Z V-A charakteristiky je patrný malý závěrný proud, způsobený emisí majoritních nositelů přes bariéru.
5. Zvyšování **napětí** na **-2,0 V**.  
Dochází k dalšímu zakřivování hladin a rozšiřování hradlové vrstvy.
6. Nastavení **napětí: 0 V**.
7. Nastavení **napětí: 0,2 V**.  
Vnější napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní způsobuje vyrovnávání energetických hladin. Tím pádem se hradlová vrstva zužuje, což je spolu s přírůstkem nositelů zřejmé i z grafu koncentrace.
8. Nastavení **napětí: 0,3 V**.  
Při tomto napětí je zcela zrušena energetická bariéra a elektrony mohou volně procházet z polovodiče N do kovu (z kovu do polovodiče P, kde rekombinují s děrami). Přechodem nyní prochází proud, zachycený ve V-A charakteristice i ve schématickém obvodu pomocí pohybujících se červených čárek V grafu koncentrací je vidět zvýšený počet nositelů náboje v sousedních oblastech.
9. Nastavení **napětí: 0,4 V**.  
Dojde k zakřivení hladin ve směru pohybu nositelů, což způsobuje nárůst proudu, znázorněného ve V-A charakteristice.

## Výklad:

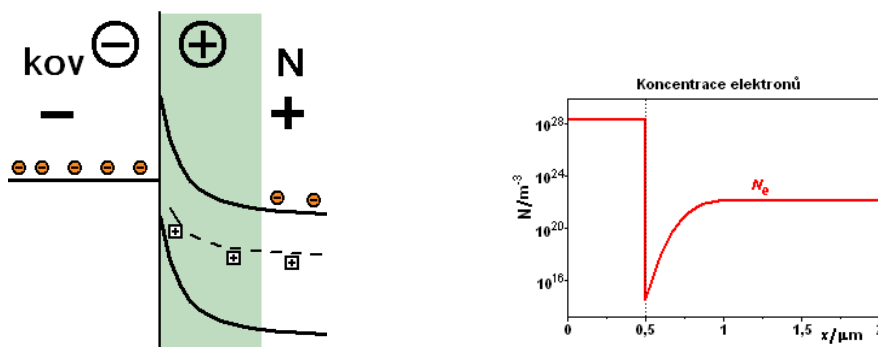
### Polovodič N-kov:

Výklad se provádí na představě ideálního spojení původně oddělených částí kov, polovodič. Důležitým krokem k pochopení činnosti této struktury je rozbor dějů probíhajících po tomto spojení. Z pásového modelu lze vyčíst energie volných elektronů v kovu a v polovodiči. Protože se elektrony vždy snaží obsadit místo s co nejnižší energií, začne docházet k jejich difúzi z polovodiče N do kovu (obr. 2.6 vlevo). Kov se proto nabíjí záporně. Polovodič N, kde zůstávají nevykompenzované ionizované donory (k zobrazení nehybných donorových atomů jsou zvoleny čtverečky, aby se vizuálně zdůraznila jejich nehybnost – nemohou se kutálet), se nabíjí kladně. V blízkosti styku kov-polovodič tak vzniká oblast prostorového náboje s vysokou intenzitou elektrického pole. Toto nábojové rozlišení (difúzní napětí označené  $+$ ,  $-$  v kroužku) způsobuje zakřivení energetických hladin a vznik bariéry bránící další difúzi elektronů. V blízkosti přechodu je vzhledem k bariéře a velké vzdálenosti vodivostního pásu od hladiny příměsí velmi malá koncentrace volných elektronů. Tato oblast s velkým odporem se nazývá hradlová vrstva (zelená oblast na obr. 2.6 uprostřed). Zde je nutné zdůraznit, že počet volných elektronů v kovu a polovodiči zobrazených v modelu je pouze ilustrativní. Ve skutečnosti je koncentrace elektronů v kovu cca  $10^{28} \text{ m}^{-3}$ , v polovodiči cca  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ , což je  $10^6$ krát méně (obr. 2.6 vpravo).



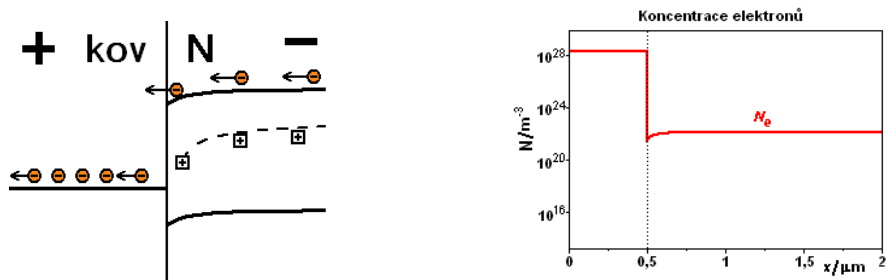
Obr. 2.6 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-N

Model dále umožňuje připojení vnějšího napětí pomocí posuvníku. Pokud má napětí stejnou polaritu jako napětí difúzní, dochází ke zvýšení energetické bariéry a rozšíření hradlové vrstvy. V hradlové vrstvě navíc dojde ke snížení koncentrace nositelů náboje (obr. 2.7).



Obr. 2.7 Připojení vnějšího napětí v závěrném směru

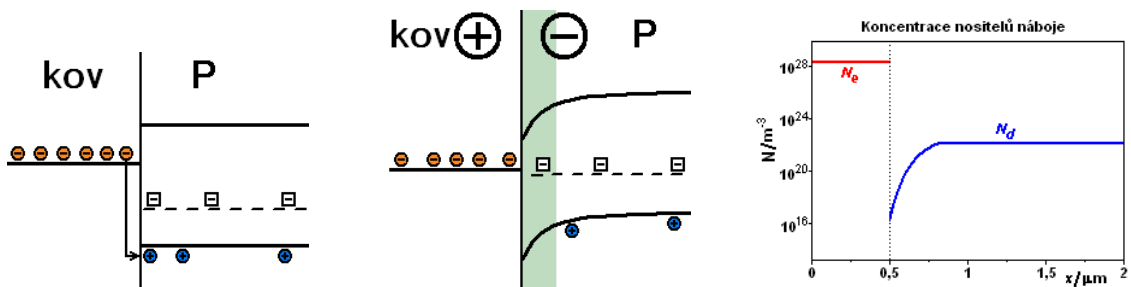
Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní snižuje energetickou bariéru, koncentrace elektronů v hradlové vrstvě roste. Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do kovu (obr. 2.8). Ze zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, přechodem prochází stálý proud. Vzhledem v řádově větší rezistivitě polovodiče než kovu se zakřivení energetických hladin projevuje prakticky pouze v polovodiči, v kovu není patrné.



Obr. 2.8 Připojení vnějšího napětí v propustném směru

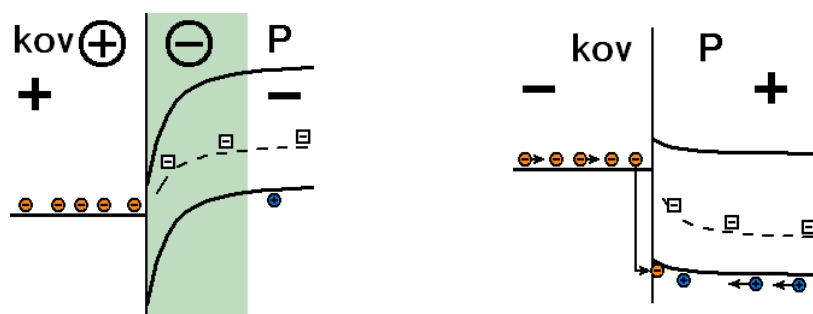
*Polovodič P-kov:*

I u této struktury začnou po spojení obou částí elektrony hledat místa s co nejnižší energií. Volným elektronům z kovu se nabízí energeticky výhodnější neobsazené pozice ve valenčním pásu polovodiče (díry). Začne docházet k jejich difúzi do polovodiče a rekombinaci (obr. 2.9 vlevo). Kov se díky odcházejícím elektronům začne nabíjet kladně, polovodiči P záporně, protože v blízkosti přechodu zůstávají pouze nevykompenzované akceptorové ionty (čtverečky). V blízkosti styku kov-polovodič vzniká oblast prostorového náboje s vysokou intenzitou elektrického pole. Toto nábojové rozlišení (difúzní napětí označené +, - v kroužku) způsobuje zakřivení energetických hladin. Díry se narozdíl od elektronů snaží zaujímat pozice s co nejvyšší energií – putují dále od rozhraní. Elektrony přecházející z kovu proto nenacházejí v polovodiči volné pozice a difúze se zastavuje. V blízkosti přechodu je vzhledem k bariéře a velké vzdálenosti valenčního pásu od hladiny příměsí velmi malá koncentrace děr. Tato oblast s velkým odporem se nazývá hradlová vrstva (zelená oblast na obr. 2.9 uprostřed). Zde je opět nutné zdůraznit rozdíl koncentrací nositelů náboje. Volných elektronů v kovu je opět o šest řádů více než děr v polovodiči (obr. 2.9 vpravo).



Obr. 2.9 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-P

Připojení vnějšího napětí má stejné účinky jako u struktury kov-polovodič N. Napětí se stejnou polaritou jako napětí difúzní způsobuje další zakřivení hladin, úbytek děr a rozšíření hradlové vrstvy (obr. 2.10 vlevo).

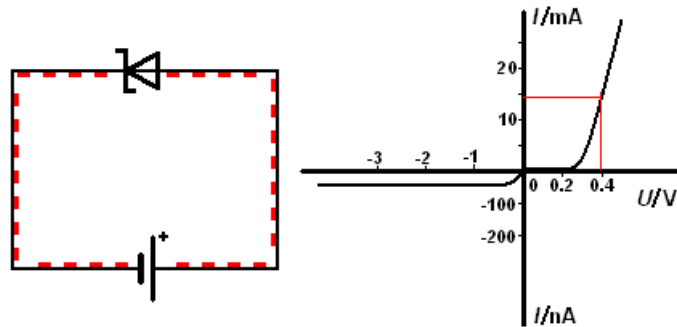


Obr. 2.10 Připojení vnějšího napětí v závěrném a propustném směru

Napětí s opačnou polaritou než difúzní napětí způsobuje vyrovnávání energetických hladin a

zvyšování koncentrace děr, hradlová vrstva se zužuje. Po vyrovnání difúzního napětí vnějším napětím hradlová vrstva zcela zaniká a díry mohou putovat ve směru elektrického pole až k rozhraní, kde nabízí volné pozice elektronům z kovu (obr. 2.10 vpravo). Dochází k jejich rekombinaci. Ze záporného pólu zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, odsáváním elektronů kladným pólem zdroje vznikají nové díry. Přechodem prochází proud.

Usměrňujících účinků přechodu kov-polovodič se využívá v Schottkyho diodách, jejíž schématická značka, připojení ke zdroji napětí a V-A charakteristika jsou také zobrazovány v modelu (obr. 2.11).



Obr. 2.11 Schottkyho dioda s V-A charakteristikou