

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „a.4.3_P-N.exe“.

Zobrazeny jsou oddělené polovodiče P a N, majoritní nositelé náboje (elektrony – červené, 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 P a N. Probíhá difúze nositelů náboje. Díky nevykompenzovaným iontům vzniká difúzní napětí (označení **+**, **-** v kroužku), energetické hladiny se zakřivují. Rovnováha na P-N přechodu nastává po vyrovnání Fermiho hladin. V oblasti styku částí P a N, vznikla hradlová vrstva (zelená barva), která je znázorněna i v grafu koncentrací (tečkovaná čára). 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 zanedbatelný proud, tvořený pouze minoritními nositeli.

5. Zvyšování vnějšího **napětí** na **-3 V**.

Dochází k dalšímu zakřívování hladin a rozšiřování hradlové vrstvy.

6. Nastavení vnějšího **napětí: 0 V**.

7. Nastavení vnějšího **napětí: 0,4 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 vnějšího **napětí: 0,7 V**.

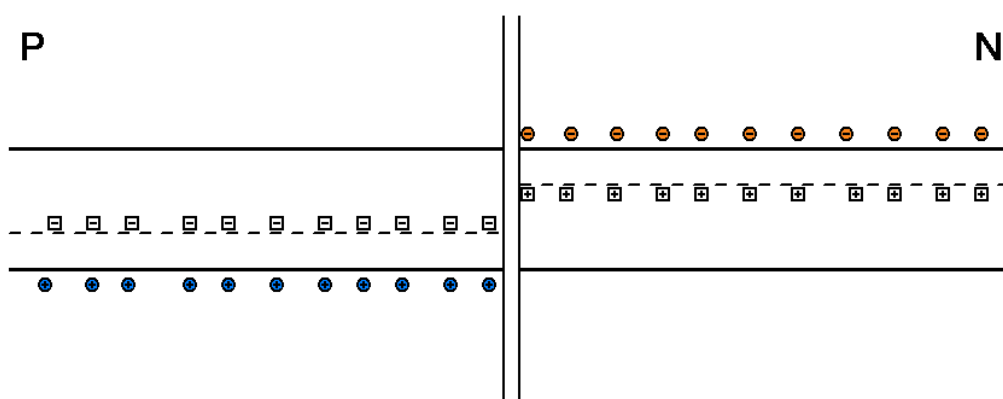
Při tomto napětí je zcela zrušena energetická bariéra a elektrony mohou volně procházet do oblasti P, kde rekombinují s děrami. Také díry také procházejí do oblasti N, kde rekombinují s elektrony. Přechodem nyní prochází proud, zachycený ve V-A charakteristice i ve schématickém obvodu pomocí pohybujících se červených čárek V grafu koncentrací je vidět zvýšený počet nositelů náboje v sousedních oblastech.

9. Nastavení vnějšího **napětí: 0,8 V**.

Dojde k zakřivení hladin ve směru pohybu nositelů, což způsobuje nárůst proudu, znázorněného ve V-A charakteristice.

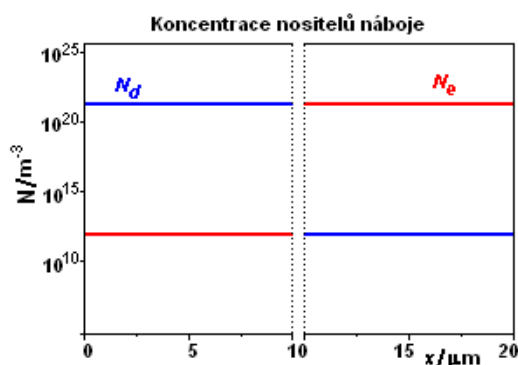
Výklad:

Po spuštění jsou v okně programu zobrazeny dva oddělené polovodiče (obr. 3.4). Polovodič typu P obsahuje příměsi s volnými elektronovými pozicemi energeticky blízkými valenčnímu pásu. Elektrony valenčního pásu proto mohou snadno přeskočit na tyto pozice, kde vznikají akceptorové ionty znázorněné čtverečky. Na místě, které elektron opustil vzniká volná pozice (díra), která slouží jako nositel elektrického náboje. Díry jsou znázorněny modře. Polovodič typu N obsahuje příměsi s elektrony energeticky blízkými vodivostnímu pásu. Tyto elektrony mohou do vodivostního pásu snadno přeskočit. Získáváme tak volné elektrony, znázorněné červeně, které se účastní vedení elektrického proudu. Po těchto elektronech zůstává z příměsi donorový iont, znázorněný čtverečkem. Představa spojení dvou původně oddělených polovodičů typu P a N se provádí pouze pro snadnější pochopení vlastností P-N přechodu. Je však třeba zdůraznit, že P-N přechod musí být vytvořen v jediném monokrystalu. Proto si energetické hladiny valenčního a vodivostního pásu navzájem odpovídají. Čárkovaně je znázorněna Fermiho energetická hladina. U části typu N se, díky donorovým příměsím, nachází v blízkosti vodivostního pásu. V části typu P je tato hladina blízko pásu valenčního, díky akceptorovým příměsím.



Obr. 3.4 Oddělené části polovodič P, polovodič N

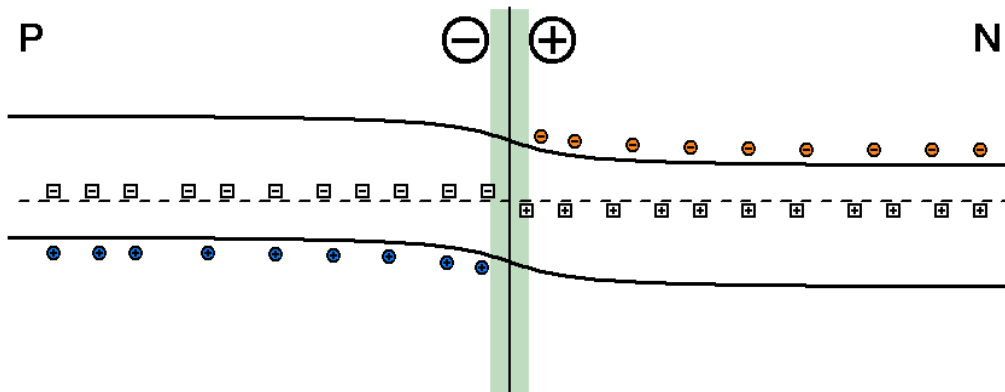
Volné elektrony v polovodiči typu N a díry v polovodiči typu P nazýváme majoritní nositelé elektrického náboje. Polovodič P obsahuje kromě akceptorových příměsí i malý podíl příměsí donorových. To zapříčiňuje, že v polovodiči typu P se kromě děr vyskytují i volné elektrony. Stejně tak se i polovodiči N objevují akceptorové příměsí a s nimi díry. Tyto nositele elektrického náboje, jež tvoří pouze zanedbatelnou část nazýváme minoritní nositelé. Jejich koncentrace je o několik řádů nižší než koncentrace majoritních nositelů (obr. 3.5). Protože minoritní nositelé náboje nehrají v tomto případě tak důležitou roli, jsou v animaci znázorněni pouze nositelé majoritní (obr. 3.4).



Obr. 3.5 Koncentrace nositelů náboje v oddělených částech P a N

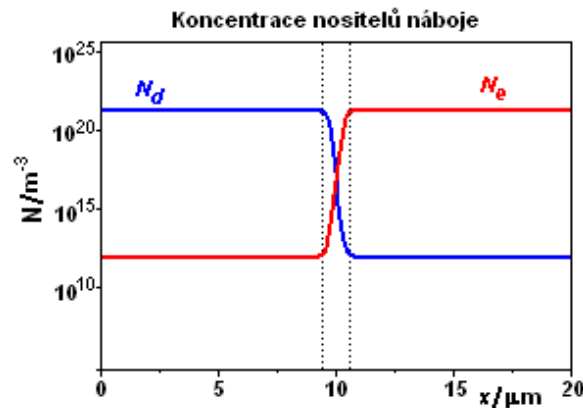
Nyní je k dispozici pouze tlačítko **START**. Po jeho stisknutí dojde ke spojení obou polovodičů. Díky rozdílným koncentracím elektronů a děr v těchto dvou částech, začne docházet k jejich difúzi. Díry přecházejí do části typu N, elektrony do části typu P. Díry, které odejdou z oblasti P, po sobě zanechají nevykompenzované ionizované akceptory, elektrony zanechávají nevykompenzované

ionizované donory. Difundující elektrony rekombinují v oblasti P s děrami, stejně tak díry, které difundují do oblasti N zde rekombinují s elektrony. Vzniká tak nábojová dvojvrstva s vysokou intenzitou elektrického pole (difúzní napětí, označení $+$, $-$ v kroužku), způsobující zakřivení energetických hladin, bránící další difúzi. Rovnovážný stav je v modelu znázorněn zastavením pohybu volných elektronů a děr. Ve skutečnosti však nedochází k úplnému zastavení difúze. Difúzní napětí způsobuje drift minoritních elektronů a děr ve směru opačném k difúzi. Když se driftová proudová hustota vyrovná difúzní proudové hustotě, nastává na P-N přechodu rovnováha. V tomto stavu jsou Fermiho energetické hladiny vyrovnány. Oblast v blízkosti spojení obou částí má sníženou koncentraci nositelů náboje, nazývá se hradlová vrstva (na obr. 3.6 je znázorněna zeleně). Takto již vypadá i skutečná situace na P-N přechodu, pokud neuvažujeme původně rozdělené oblasti P a N.



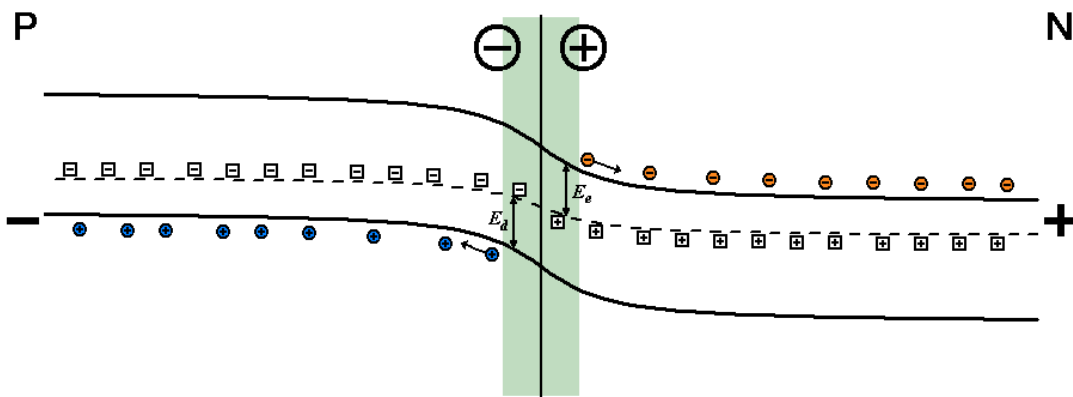
Obr. 3.6 Rovnovážný stav po spojení částí P a N

Koncentrace nositelů náboje je znázorněna v grafu na obr. 3.7. Tlačítkem **STOP** lze oba polovodiče od sebe oddělit a po jejich spojení opět sledovat difúzi a změny energetických hladin.



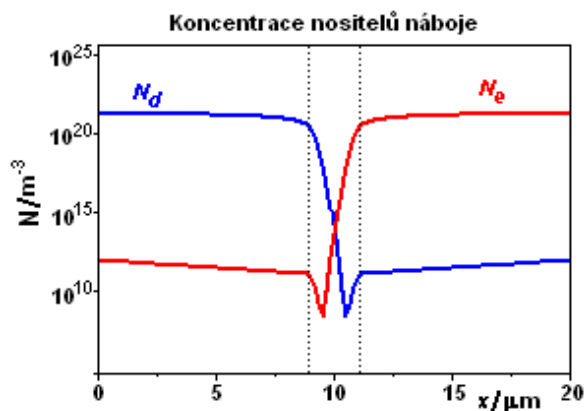
Obr. 3.7 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu

Pokud jsou oba polovodiče spojeny a soustava je v rovnováze, je možné pomocí posuvníku připojit na P-N přechod vnější zdroj napětí.



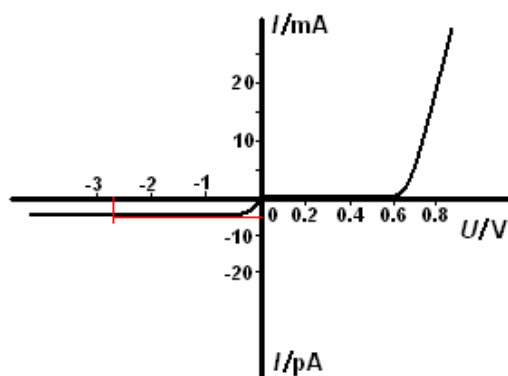
Obr. 3.8 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v závěrném směru

Nejdříve sledujeme změny na P-N přechodu, pokud je připojeno napětí se stejnou polaritou jako difúzní napětí (posuvník vlevo od nulové polohy). Dochází ke zvýšení energetické bariéry. Nositelé náboje putují do energeticky výhodnějších míst. Elektrony do míst s nižší energií, díry do míst s vyšší energií (obr. 3.8). Zároveň se zvyšuje energie E_e , potřebná k přechodu elektronů z donorových příměsí (z Fermiho hladiny) do vodivostního pásu a energie E_a potřebná k vytvoření díry, přechodem elektronů z valenčního pásu do akceptorových příměsí (na Fermiho hladinu). V blízkosti přechodu proto dochází ke snížení koncentrace nositelů náboje (obr. 3.9). Hradlová vrstva se rozšiřuje. Šířka hradlové vrstvy je naznačena v grafu koncentrací čárkovanými čarami. Tato hodnota je pro různé polovodiče různá, závisí především na množství příměsí. Dokonce v rámci jednoho P-N přechodu má část P a část N zpravidla různou šířku hradlové vrstvy.



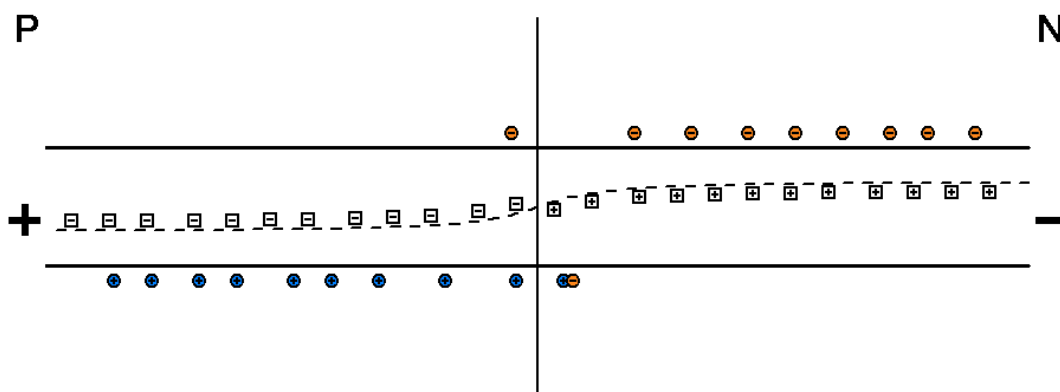
Obr. 3.9 Koncentrace nositelů náboje při závěrném napětí na P-N přechodu

Při této polaritě procházejí přechodem pouze minoritní nositelé, ty nejsou z důvodu přehlednosti v modelu zakresleny. Závěrný proud je znázorněn ve V-A charakteristice (obr. 3.10). Jeho velikost jsou řádově pikoampéry, je téměř zanedbatelný.

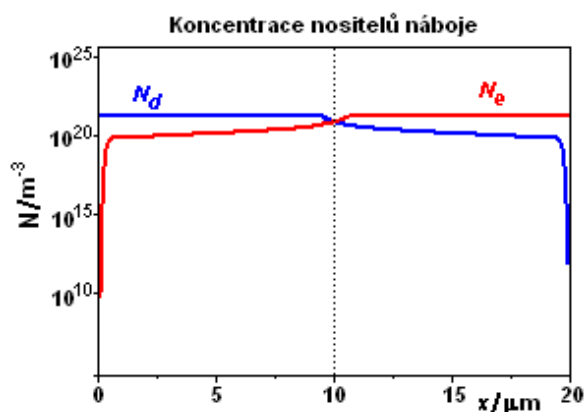


Obr. 3.10 V - A charakteristika P - N přechodu – závěrný proud

Pokud je připojeno napětí opačné polarity, než je difúzní napětí (posuvník vpravo od nulové polohy), snižuje se energetická bariéra a zmenšuje se šířka hradlové vrstvy. Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do polovodiče P , kde rekombinují s majoritními děrami a díry do polovodiče N , kde rekombinují s majoritními elektrony (obr. 3.11). Přechodem prochází proud. Zvýšená koncentrace elektronů v oblasti P a děr v oblasti N je patrná i z grafu na obr. 3.12.

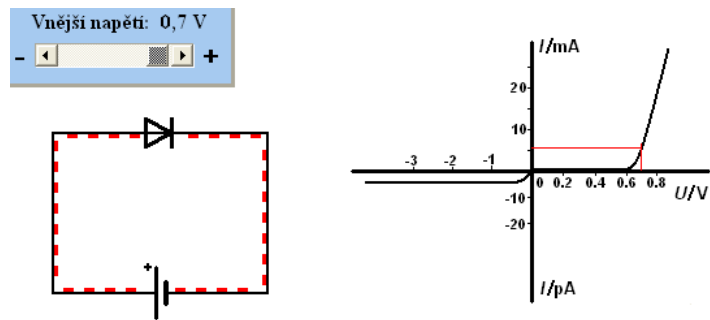


Obr. 3.11 Připojení vnějšího napětí na P - N přechod v propustném směru



Obr. 3.12 Koncentrace nositelů náboje na P - N přechodu při průchodu proudem

Model dále nastiňuje využití usměrňujících účinků P - N přechodu v usměrňovacích diodách. V dolní části okna je umístěna její schématická značka, připojení ke zdroji napětí a V - A charakteristika, na níž je zakreslována aktuální situace. Pokud napětí v propustném směru přesáhne hodnotu 0,6V, začne diodou procházet proud, znázorněný čárkovanými čarami (obr. 3.13).



Obr. 3.13 Usměrňovací dioda s V - A charakteristikou