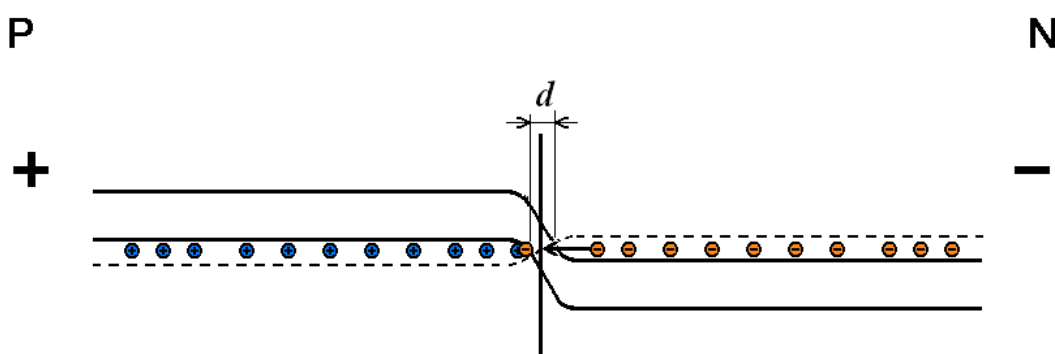


## Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a.4.6\_Tunelový jev.exe**“.  
Zobrazeno je pásové schéma silně dotovaného P-N přechodu, v rovnovážném stavu bez přiloženého vnějšího napětí, majoritní nositelé náboje (elektrony – červené, díry – modré), Fermiho energetická hladina (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno jednoduchým obvodem se Zenerovou diodou a V-A charakteristikou. Na ovládacím panelu je možné nastavovat hodnotu vnějšího napětí v propustném i závěrném směru pomocí posuvníku.
2. Nastavení vnějšího **napětí: 0,2 V** (polarita označena **+**, **-** na okrajích pásového schématu).  
Dochází k vyrovnávání energetických hladin. Díky silné dotaci obou polovodičů, jsou splněny podmínky pro tunelování elektronů. Elektrony v souladu s vnějším napětím tunelují z vodivostního pásu polovodiče N do valenčního pásu polovodiče P, kde dochází k rekombinaci s děrami.
3. Zvýšení vnějšího **napětí na 0,4 V**.  
Dojde k dalšímu vyrovnávání energetických hladin. Elektrony přestávají tunelovat, protože došlo k vyrovnávání horní hranice valenčního pásu polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu polovodiče N.
4. Zvýšení vnějšího **napětí na 0,6 V**.  
Dojde k vyrovnání energetických hladin. Elektrony mohou volně procházet do oblasti P, díry do oblasti N. V blízkosti rozhraní dochází k jejich rekombinaci.
5. Nastavení vnějšího **napětí: 0 V**.
6. Nastavení vnějšího **napětí: -0,1 V** (polarita označena **+**, **-** na okrajích pásového schématu).  
Podmínky pro tunelování jsou splněny. Elektrony mohou snadno procházet přes bariéru v souladu s polaritou vnějšího napětí.

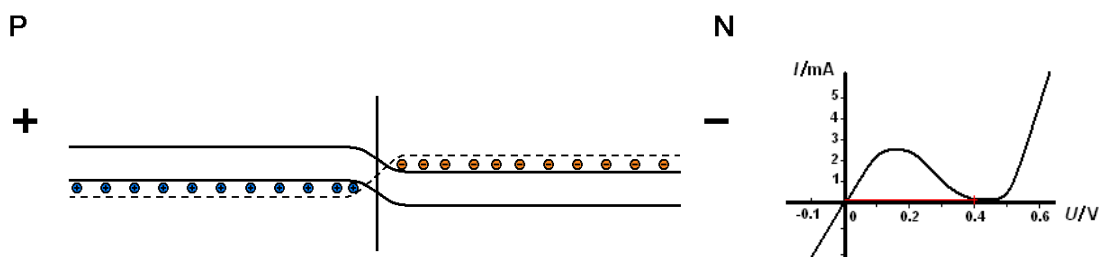
### Výklad:

Po spuštění se otevře okno s pásovým znázorněním energetických hladin. Na ovládacím panelu je nastaveno vnější napětí 0 V, obvodem neprochází proud. Přechod P-N je v rovnováze, Fermiho energetické hladiny jsou vyrovnány. Jde o silně dotované polovodiče, proto se Fermiho hladina v polovodiči N nachází až ve vodivostním pásu, v polovodiči P v pásu valenčním. Díky silné dotaci polovodiče je hradlová vrstva dostatečně tenká, aby mohlo docházet k tunelování elektronů přes energetickou bariéru, kterou představuje šířka zakázaného pásu  $d$  (obr. 6.5). K tomu také začne docházet ihned po připojení zdroje napětí v propustném směru (posuvník vpravo od nulové polohy). Protunelované elektrony v polovodiči P rekombinují s děrami. Z kladného pólu zdroje jsou dodávány nové díry a ze záporného elektrony. P-N přechodem nyní prochází proud, což je znázorněno i na obvodu v dolní části okna pomocí pohybujících se čárkovaných čárek. Zároveň jsou ve V-A charakteristice vyznačeny aktuální hodnoty proudu a napětí.



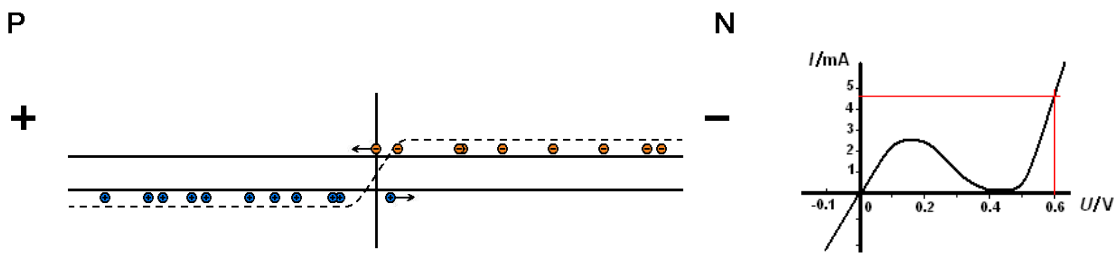
Obr. 6.5 Tunelování elektronů po připojení malého napětí v propustném směru

Při dalším zvýšení napětí dochází k vyrovnávání horní hranice valenčního pásu polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu polovodiče N. Pohyb nositelů náboje klesá na minimum (obr. 6.6).



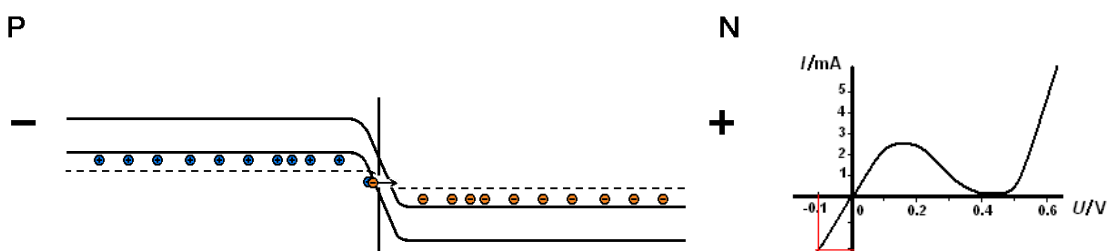
Obr. 6.6 Zvýšení napětí v propustném směru

Při dalším zvýšení napětí dochází k vyrovnání energetických hladin. Elektrony mohou volně procházet do polovodiče P, kde rekombinují s děrami. Díry volně procházejí do polovodiče N kde rekombinují s elektrony (obr. 6.7). Nyní se již tunelová dioda chová jako běžná usměrňovací dioda u níž bylo překročeno difúzní napětí a dochází k rychlému nárůstu proudu.



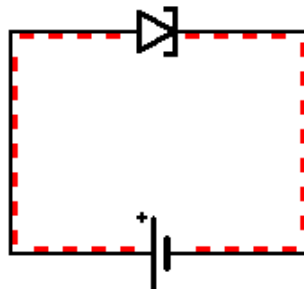
Obr. 6.7 Při dalším zvýšení napětí se struktura chová jako standardní P-N přechod

Protože jsou podmínky pro tunelování splněny již při nulovém napětí, při připojení napětí v závěrném směru (posuvník vlevo od nulové polohy) začne přechodem okamžitě protékat proud (obr. 6.8). Nyní elektrony tunelují v opačném směru, v souladu se směrem elektrického pole a putují ke kladnému pólu zdroje. Po protunelovaném elektronu zůstane ve valenčním pásu díra, která putuje k pólu zápornému.



Obr. 6.8 Po připojení napětí v závěrném směru dochází k tunelování elektronů

Tohoto druhu P-N přechodu se využívá v tunelových diodách. V okně je znázorněna její schématická značka připojená ke zdroji napětí. Proud procházející diodou je znázorněn červenými čárkovanými čarami, které se v souladu s ním pohybují (obr. 6.9).



Obr. 6.9 Tunelová dioda připojená ke zdroji napětí