

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

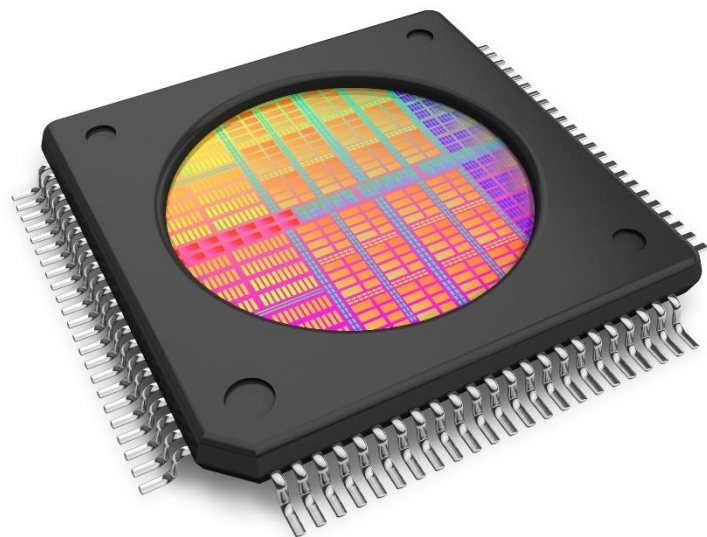
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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

MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

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



***Fyzikální jevy v
polovodičových materiálech***

Přednáška 3



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

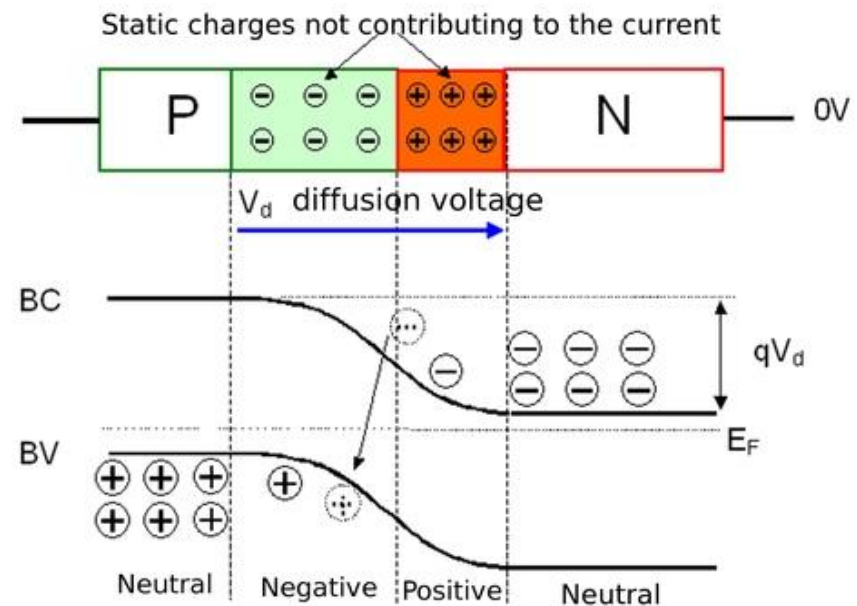
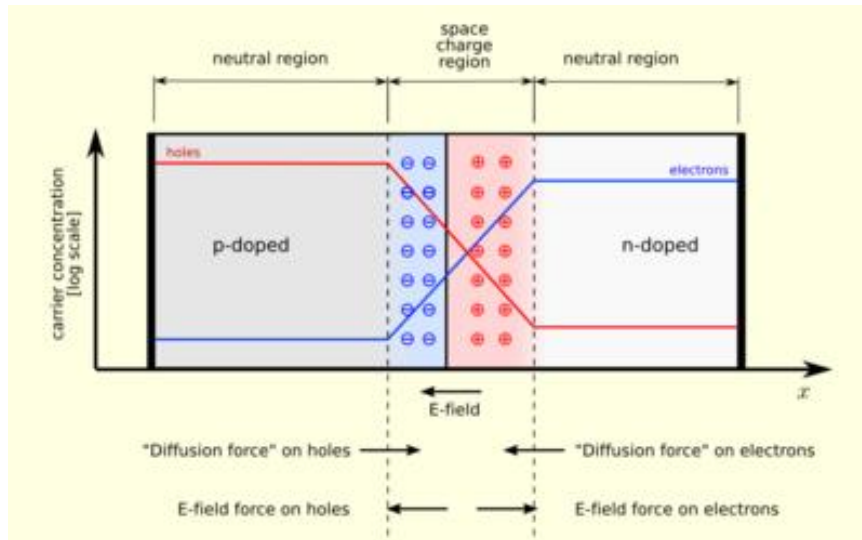
**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

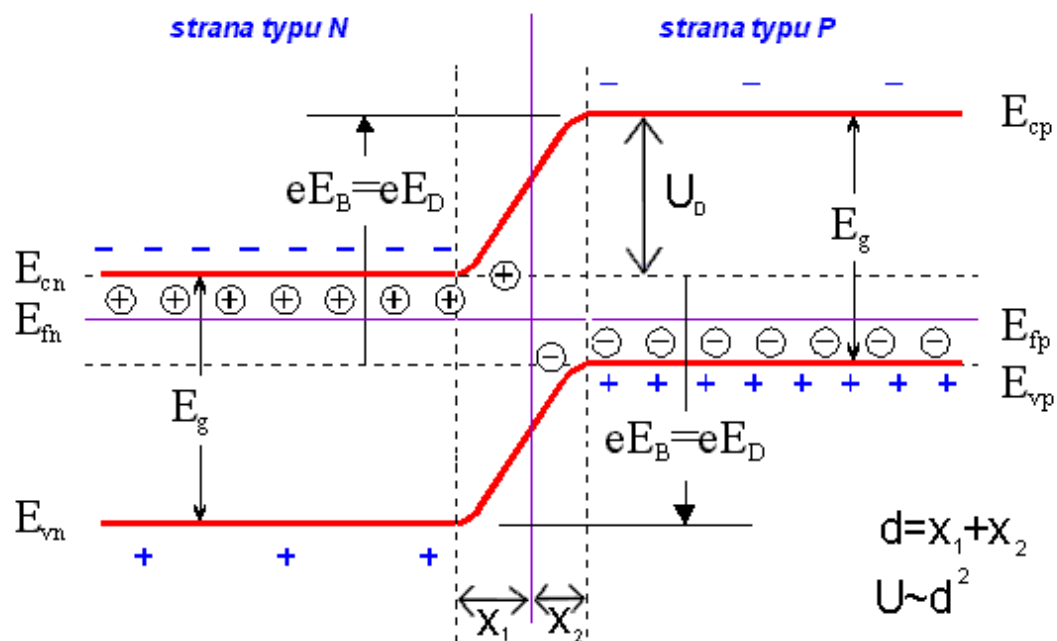
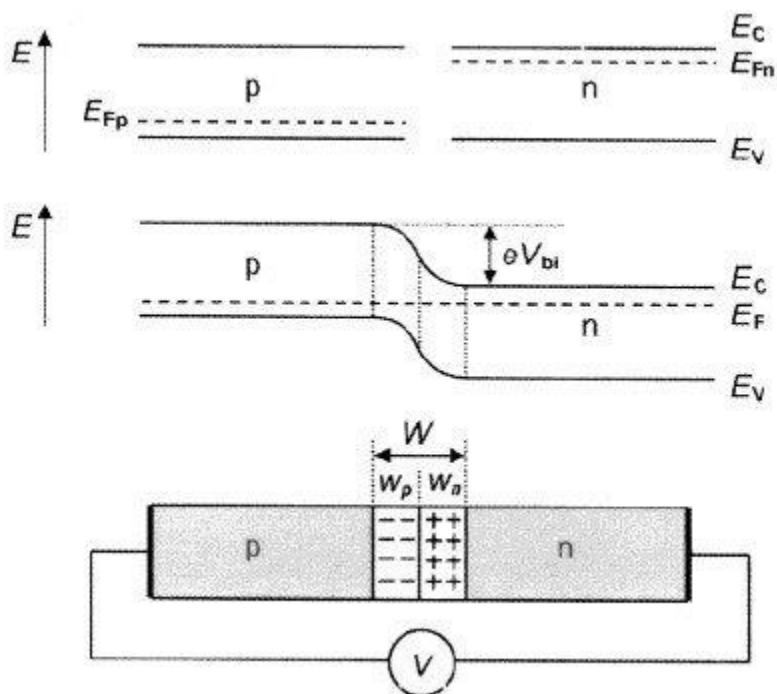
Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, CO VZNIKNE SPOJENÍM RŮZNÝCH TYPŮ POLOVODIČŮ.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU DŮLEŽITÉ PARAMETRY PN PŘECHODU.
- ZJISTÍTE, CO SE STANE, KDYŽ DOPADÁ NA POLOVODIČ SVĚTLO.
- DOZVÍTE SE, KDY POLOVODIČ SVÍTÍ.
- ZJISTÍTE, CO SE STANE, KDYŽ BUDE POLOVODIČ V MAGNETICKÉM POLI.
- DOZVÍTE SE, JAKÝ JE ROZDÍL MEZI SEEBECKOVÝM A PELTIEROVÝM JEVEM.
- ZJISTÍTE, KDY DOCHÁZÍ K LAVINOVÉMU A KDY K ZENEROVU JEVU.
- DOZVÍTE SE, K ČEMU SE VYUŽÍVÁ PIEZOELEKTRICKÝ EFEKT A PAMĚŤOVÝ JEV U POLOVODIČŮ.
- DOZVÍTE SE, CO JE GUNNŮV JEV.

PN přechod

Samotný **PN přechod** představuje **spojení polovodičů s opačným dotováním**. V oblasti přechodu **dochází k difundaci** elektronů z N oblasti do P oblasti, díry difundují naopak a dochází tak k vzájemné rekombinaci. V těsné blízkosti PN přechodu se tak nenacházejí téměř žádné volné nosiče náboje – **vznik vyčerpané oblasti**. Z původně neutrálních oblastí vzniknou místa s přebytkem záporného, resp. kladného náboje. To vede ke vzniku elektrického pole a **elektrického potenciálu** neboli **vnitřního (difuzního) napětí**.





Šířku oblasti bez volných nosičů náboje v blízkosti PN přechodu d , můžeme určit:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} U_D}$$

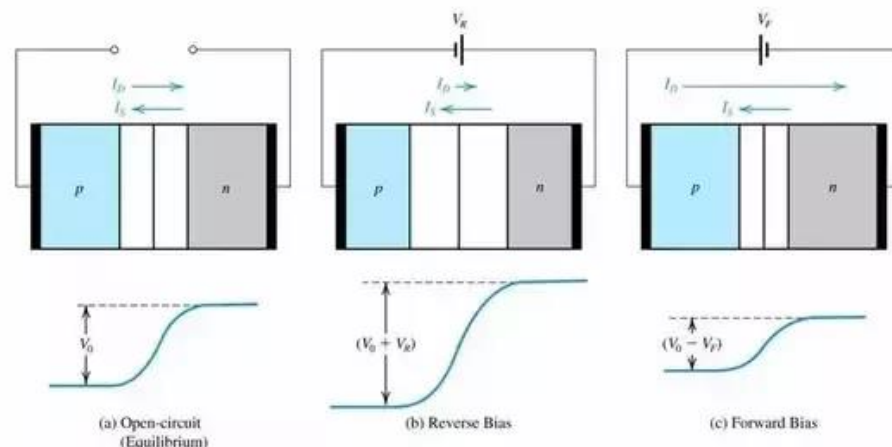
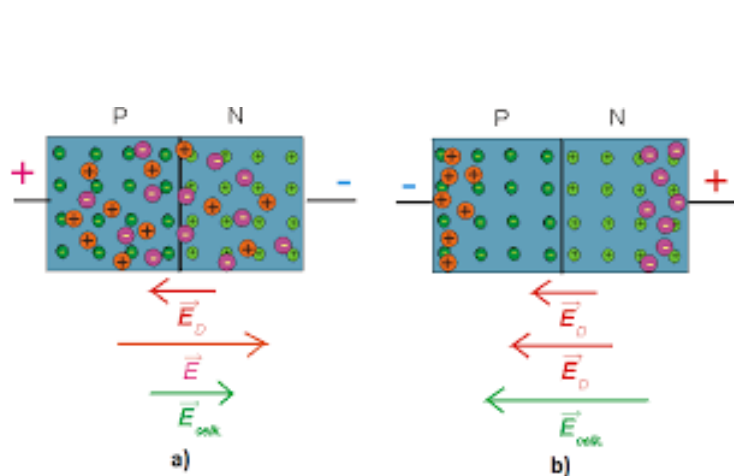
Difuzní napětí – výška potenciálové bariéry lze určit:

$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

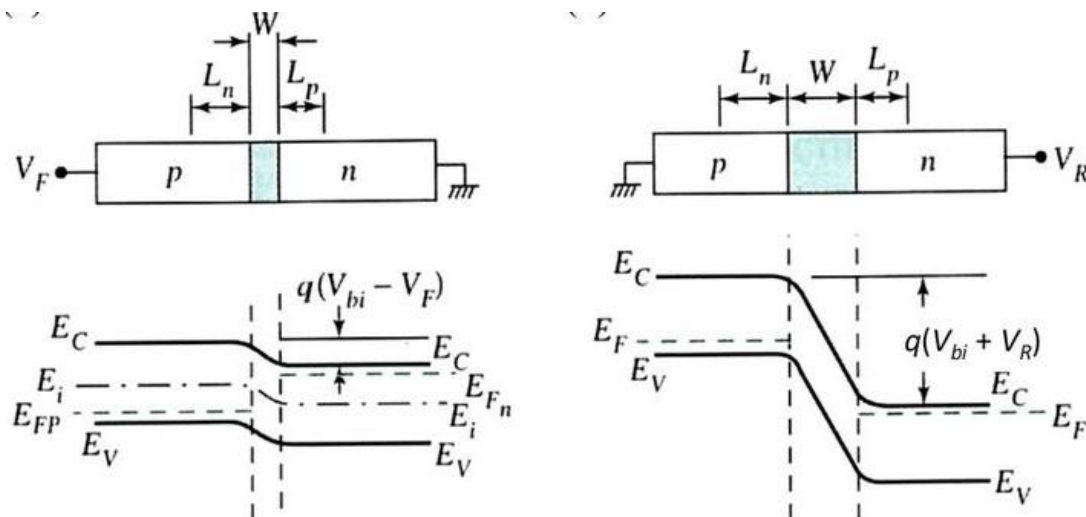
Napěťová závislost PN přechodu

Přiložení vnějšího el. napětí na PN přechod:

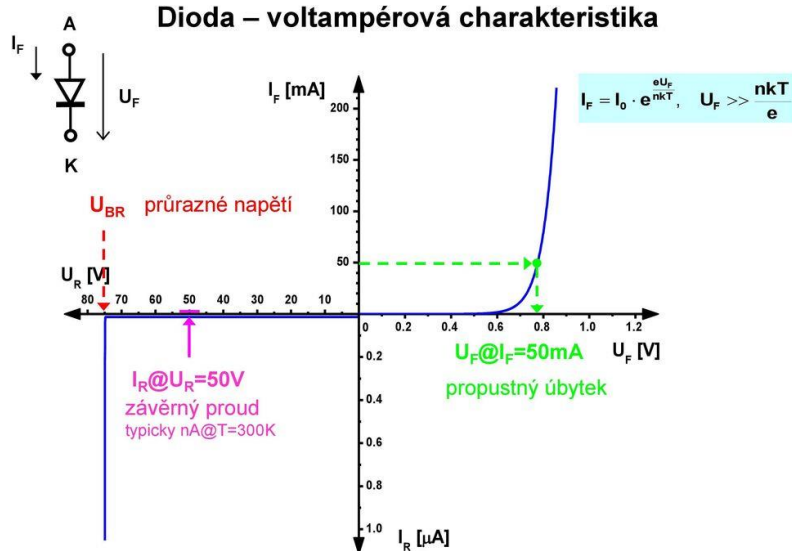
- snížení potenciálové bariéry – **propustný směr** - U_F
- zvýšení potenciálové bariéry – **závěrný (zpětný) směr** – U_R
- **potenciálový rozdíl** ve vyčerpané oblasti je dán rozdílem difuzního U_D a vnějšího napětí U
- **šířka vyčerpané oblasti** souvisí s **velikostí a polaritou** přiloženého napětí



Napěťová závislost PN přechodu

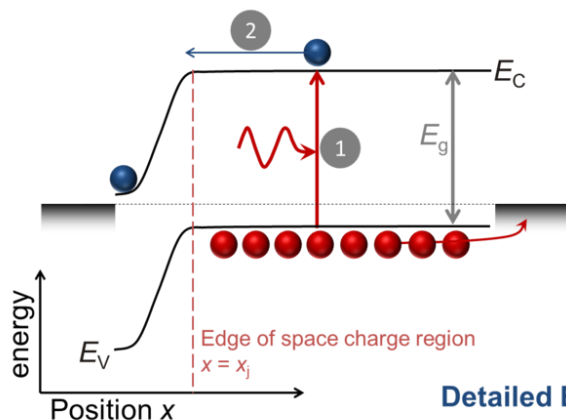
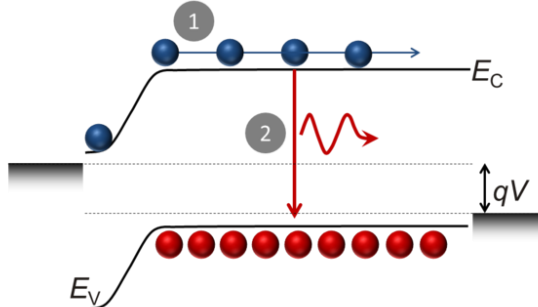


Dioda – voltampérová charakteristika

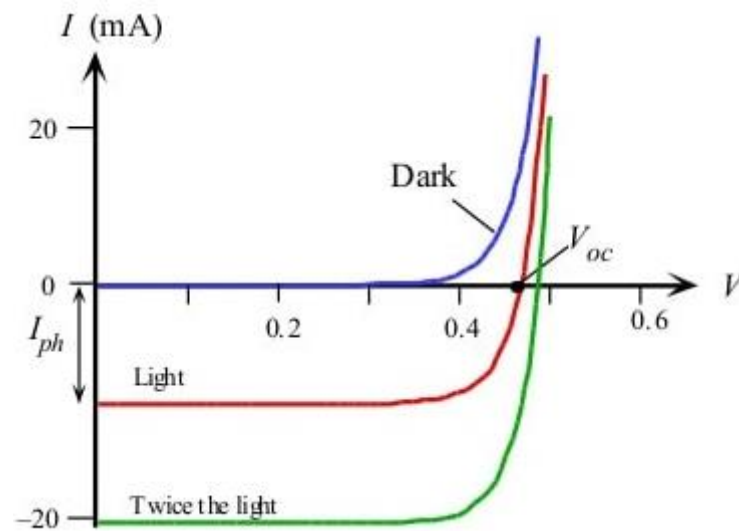
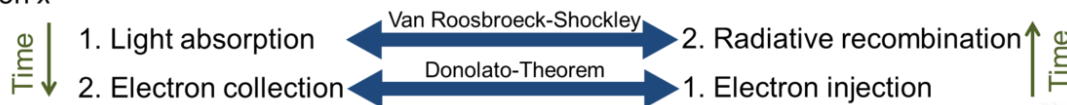


Závislost PN přechodu na světle

1) Solar cell under illumination

2) Light emitting diode under applied voltage V 

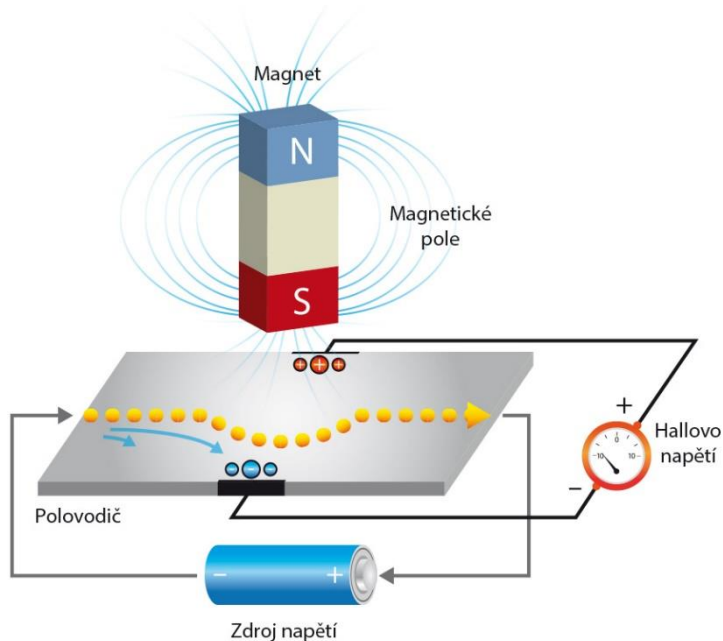
Detailed Balance Relations



Hallův jev

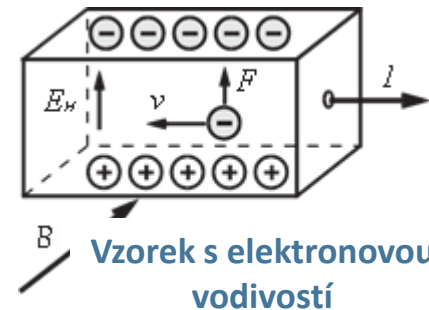
Hallův jev je **vznik elektrického napětí** příčně ve vodiči, jímž podélně protéká elektrický proud, který je odchylován magnetickým polem kolmým ke směru proudu. Hallův jev objevil v roce 1879 tehdy čtyřiašedesátiletý student Edwin Herbert Hall.

Tenkou obdélníkovou destičku z polovodiče nebo vodiče, kterou **protéká proud I** , vložíme do **magnetického pole o indukci B** . V tomto poli působí na **náboj q_e** pohybující se **rychlostí v** síla **F** . Tím je dán **vznik Hallova napětí U_H** .

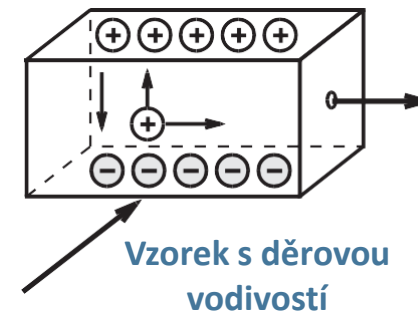


$$\vec{F} = q_e [\vec{v} \times \vec{B}]$$

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}; \quad R_H = \frac{1}{Nq_e}$$



Vzorek s elektronovou vodivostí



Vzorek s děrovou vodivostí

Aplikace Hallova jevu

Hallový sondy: polovodičové součástky pro **měření magnetických polí**

Použití Hallových sond má velmi široký rozsah. V řadě aplikací se měřicí proud udržuje konstantní a měří se magnetická indukce. Použije-li se k magnetizaci Hallový sondy obvod s budicí cívkou o velkém el. odporu, stává se ze sondy čidlo. Prochází-li Hallovou sondou střídavý proud, třeba i vysokofrekvenční, lze změnami magnetického pole tento proud modulovat; modulované napětí lze odebírat jako střídavé Hallovo napětí. V tomto případě mluvíme o **Hallově modulátoru**.

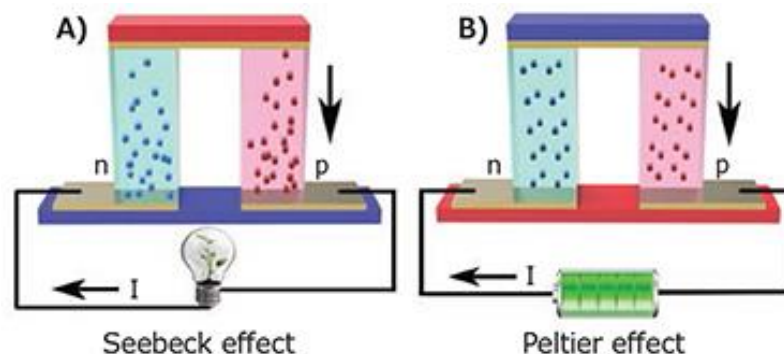
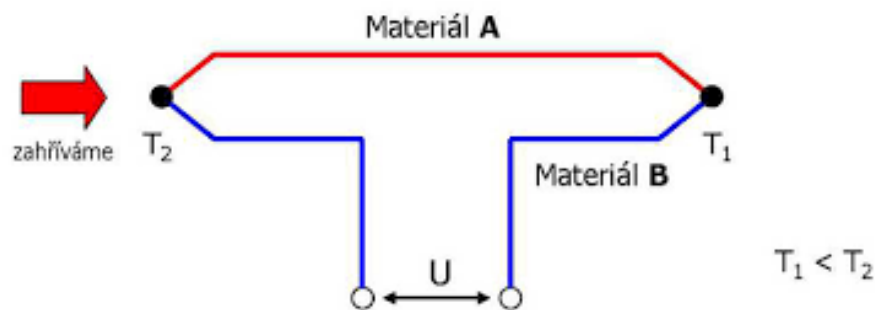
Hallový sondy se dále mohou použít pro **matematické operace**, kde Hallova sonda slouží k násobení apod.

Hallový sondy mohou též sloužit ke **generování nízkofrekvenčních průběhů proudu**. Vzniklé Hallovo napětí způsobuje změny magnetického pole. Tím se systém rozkmitá.

Bezkontaktní klávesnice pracují na mechanickém principu s využitím Hallových sond. Přestože tyto klávesnice mají dobré parametry, nejsou vhodné pro klávesnice osobních počítačů. Důvodem je, že v každé klávese je umístěn integrovaný obvod - Hallova sonda, která se musí napájet.

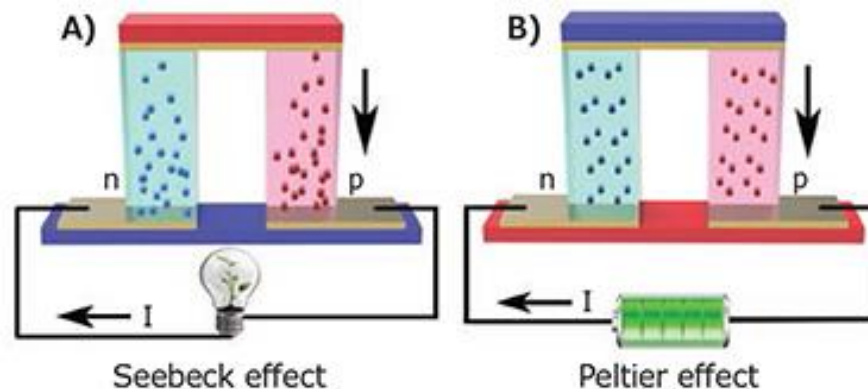
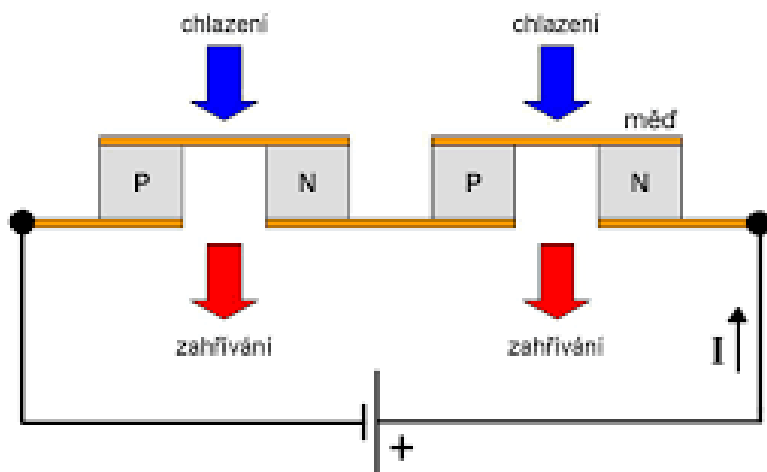
Seebeckův jev – termoelektrický jev

Seebeckův jev je vratná **přeměna teplotních rozdílů přímo na elektrické napětí**. Tento jev byl poprvé náhodně objeven v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci dvou spojených různých typů vodičů, pokud mezi těmito konci existuje teplotní gradient ΔT . Stejný jev se objeví v případě **spojení dvou různých polovodičů**.



Peltierův jev

Peltierův článek funguje na základě **Peltierova jevu**, který objevil v roce 1834 Jean C. Peltier. Když prochází proud obvodem se dvěma rozdílnými vodiči zapojenými v sérii, jedna z jejich styčných ploch se ochlazuje a druhá zahřívá. Tyto články se běžně používají např. v termoelektrických autochladničkách. Peltierův jev je opačným jevem k Seebeckovu jevu.



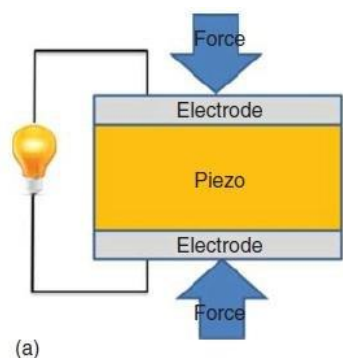
Piezoelektrický jev

Přímý piezoelektrický jev

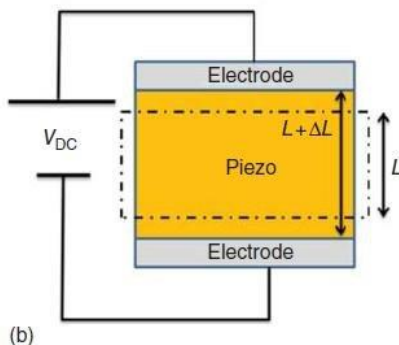
Při **deformaci křemíkového krystalu** dochází k **posunu kladných a záporných iontů** v krystalové mřížce a na povrchu krystalu se **vytvoří elektrický náboj**. **Velikost náboje je přímo úměrná deformaci krystalu**. Přímého jevu se využívá k detekci ultrazvukových vln nebo u tenzometrů k detekci deformace, síly, vibrací, posunutí, atd.

Nepřímý piezoelektrický jev

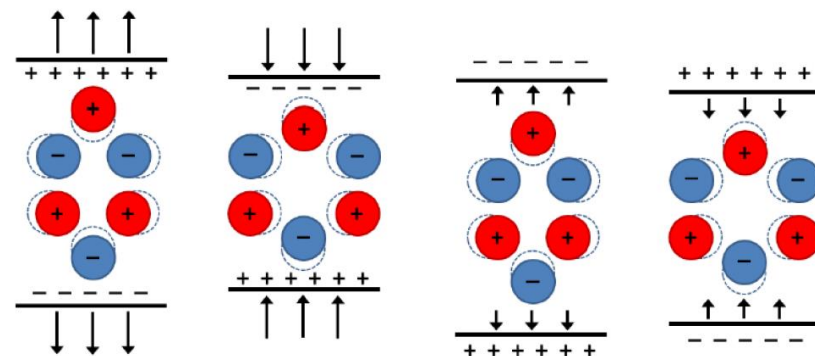
Přivedením elektrického napětí na povrch piezokrystalu dojde k **posunu iontů** v **krystalové mřížce** a krystal se **deformuje**. Velikost deformace je přímo úměrná přiloženému napětí. Nepřímého jevu se využívá ke generaci akustických vln.



(a)

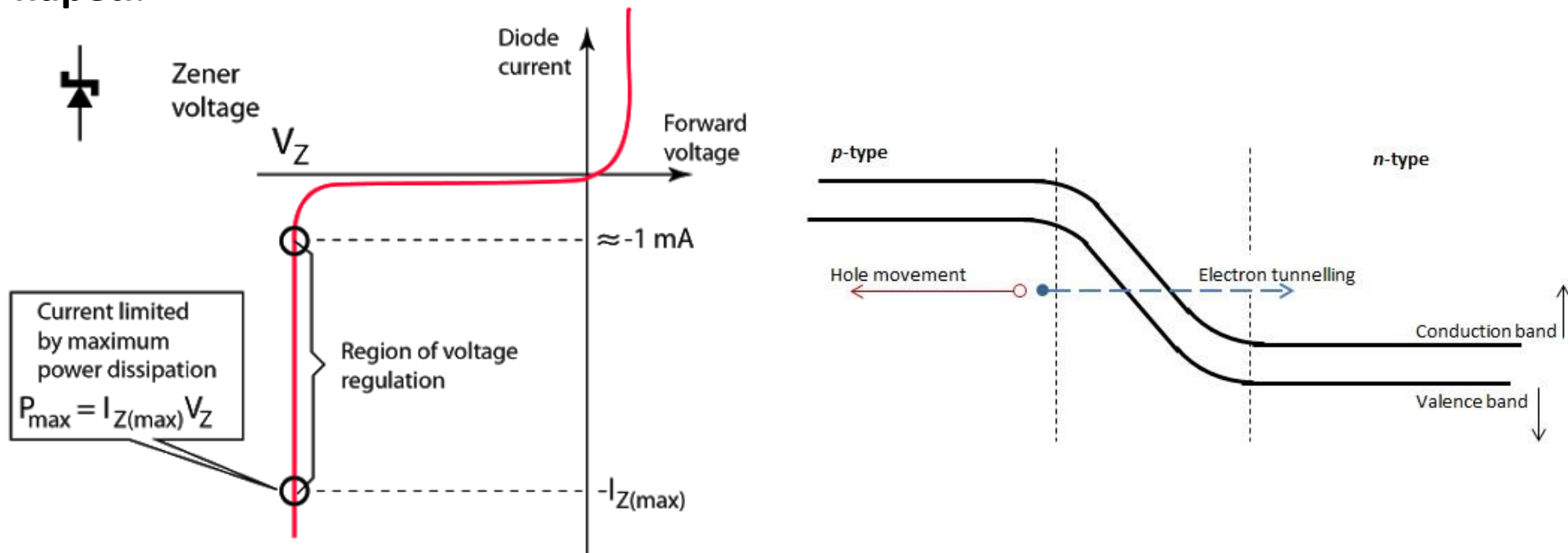


(b)



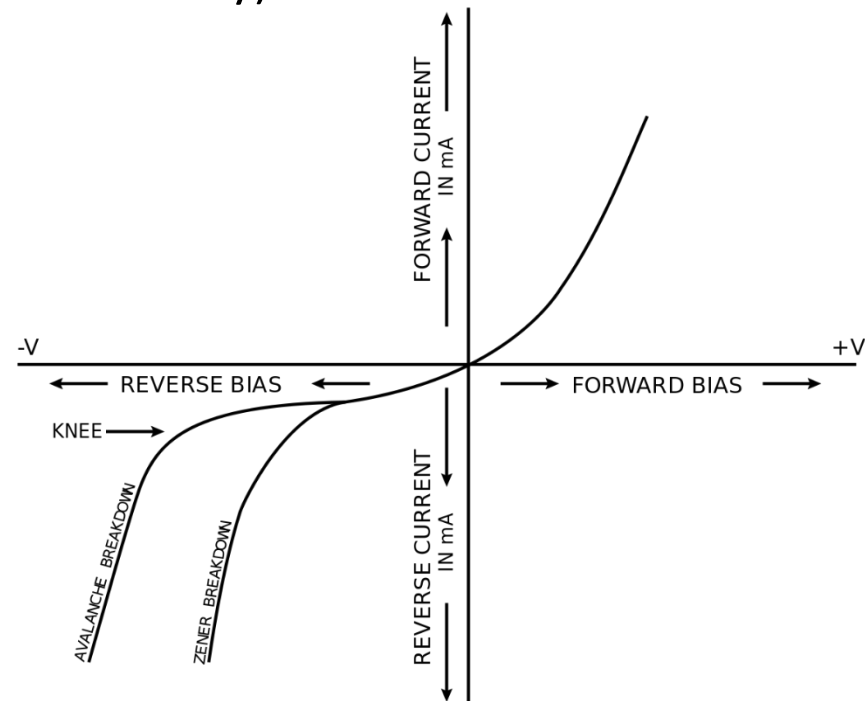
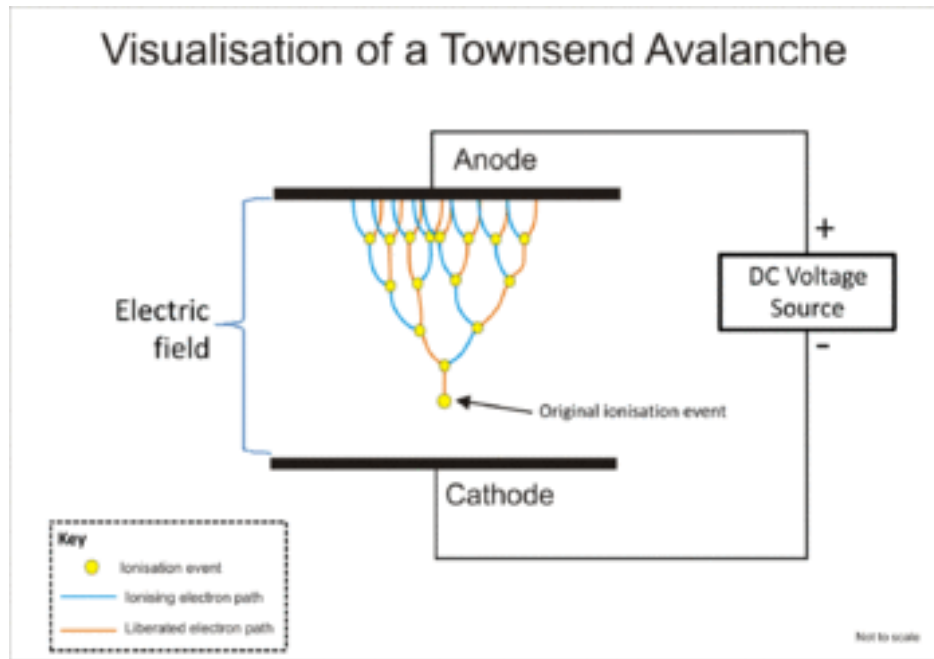
Zenerův (tunelový) jev

Zenerův jev souvisejí s **ionizací atomů** v polovodiči způsobenou dostatečně **silným elektrickým polem** při polarizaci přechodu **v závěrném směru**. PN přechod musí být dostatečně tenký a napětí v závěrném směru dosáhnout dostatečné velikosti. Pak dochází k **tunelování elektronů** z valenčního pásu polovodiče P přímo do vodivostního pásu polovodiče N. Tento jev způsobí, že od určitého napětí **v závěrném směru začne protékat proud** a přitom se napětí mění jen velmi málo. Tohoto jevu se využívá u stabilizačních (Zenerových) diod určených ke **stabilizaci napětí**.



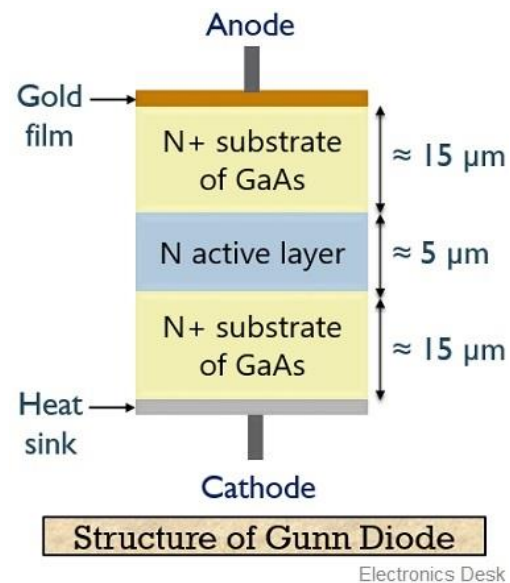
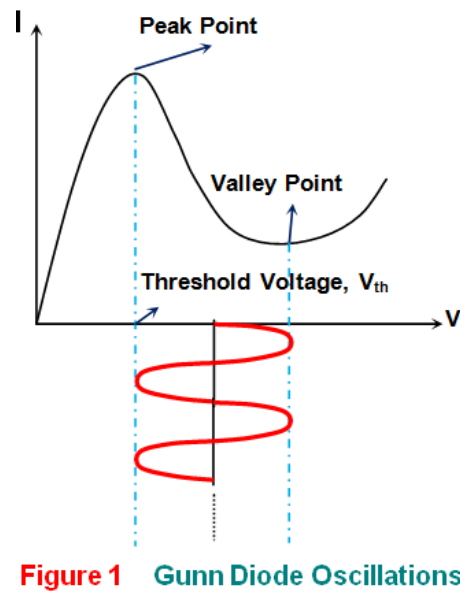
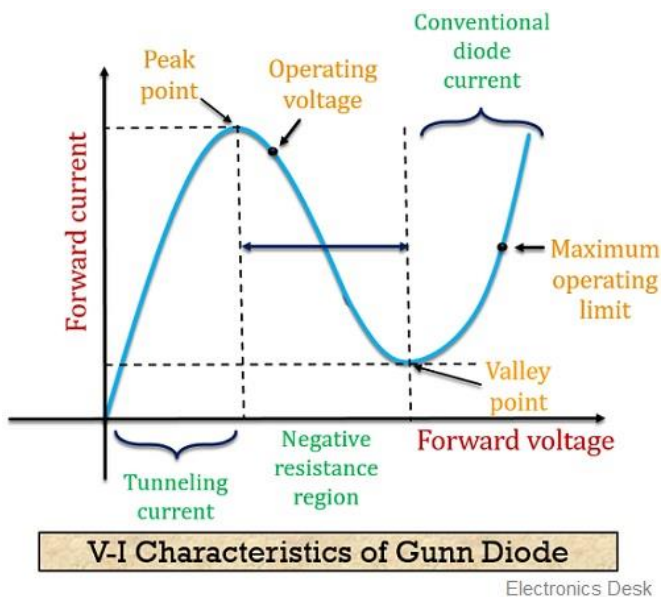
Lavinový jev

Lavinový jev na PN přechodu souvisí s **nárazovou ionizací atomů** polovodičů způsobené dostatečně **silným elektrickým polem** při polarizaci přechodu v **závěrném směru**. Pokud napětí v závěrném směru dosáhne dostatečné velikosti, **lavinovitě se zvětší počet nosičů** náboje způsobené jejich **narážením do neionizovaných atomů**. Tento jev opět způsobí, že od určitého napětí v **závěrném směru začne protékat PN přechodem proud** a přitom se napětí mění jen velmi málo. Využití je opět ve **stabilizaci napětí** (lavinové diody).



Gunnův jev

Gunnův jev má za následek **vznik záporného elektrického odporu** při působení **silného elektrického pole**. K tomuto jevu se využívá materiál GaAs. Praktické využití je u Gunnovy diody u generování signálů vlnových délek řádově cm a mm (mikrovlnné oscilátory). Tyto diody se vyznačují **zvláštní V-A charakteristikou**. Na úzkém PN přechodu (15 nm) dochází pro malé hodnoty napětí k tunelovému jevu, který způsobí nárůst proudu. Pro vyšší hodnoty napětí se již tunelový jev neuplatní a proud začne klesat. V tomto okamžiku **vzniká záporný diferenciální odpor** (s rostoucím napětím klesá proud).



Fotoelektrický jev

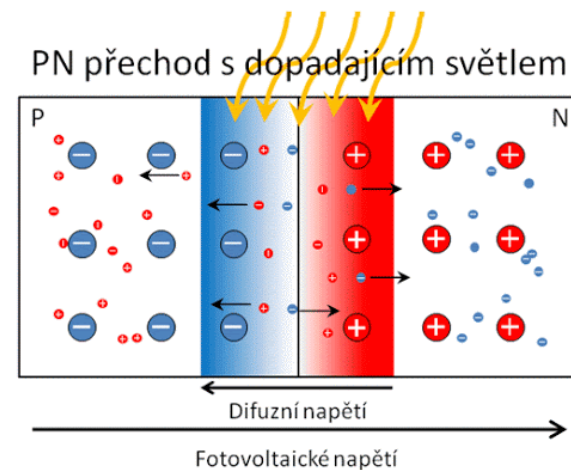
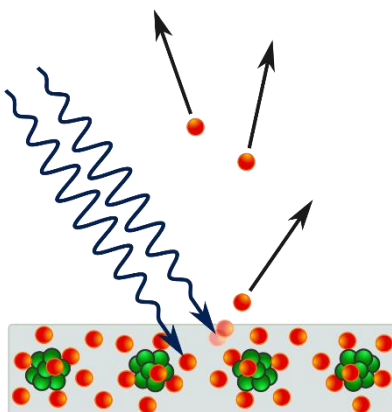
Fyzikální jev, při němž jsou **elektrony uvolňovány** (vyzařovány, emitovány) z látky v **důsledku absorpce elektromagnetického záření** (osvětlením) látkou.

- **vnější fotoelektrický jev** – jev probíhá na povrchu látky, elektrony se uvolňují do okolí v důsledku pohlcení dostatečně velké zářivé (světelné) energie
- **vnitřní fotoelektrický jev** – uvolněné elektrony zůstávají v ní jako vodivostní elektrony

Uplatnění těchto jevů je při radiačních vyšetřeních pacienta. Rentgenové snímky vznikají na principu obráceného fotoelektrického jevu, kdy se povrch ostřeluje elektrony a uvolňují se paprsky X. Různé tkáně mají jinou absorpci, proto můžeme na snímcích rozeznat struktury.

Využití v elektrotechnice:

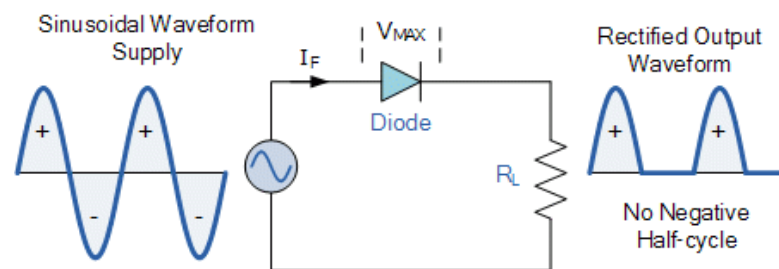
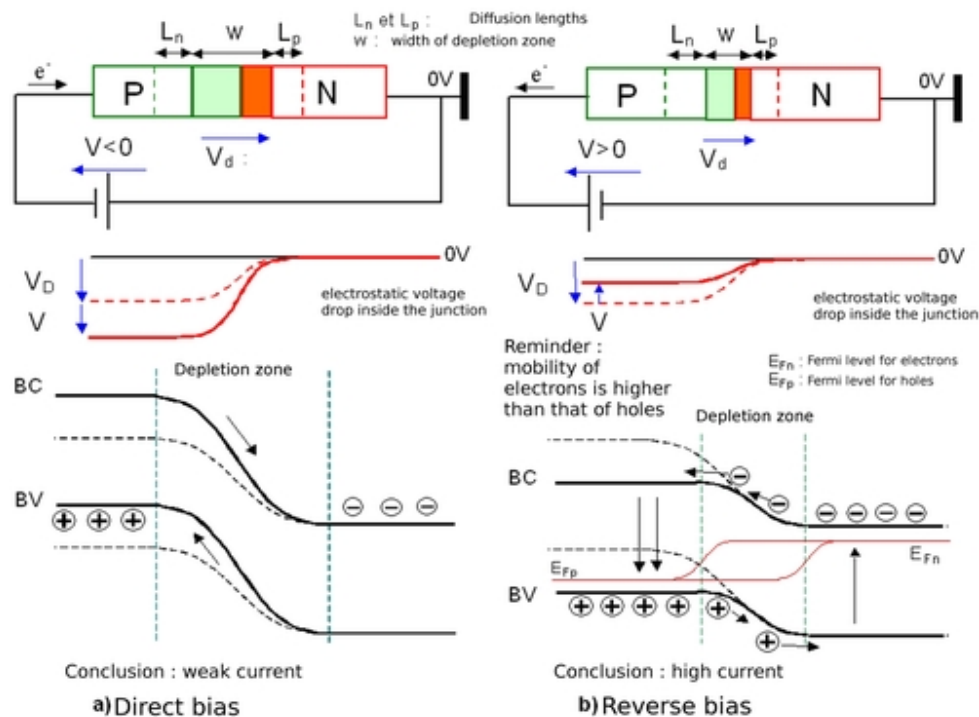
fotorezistory, fotodiody



Usměrňovací jev

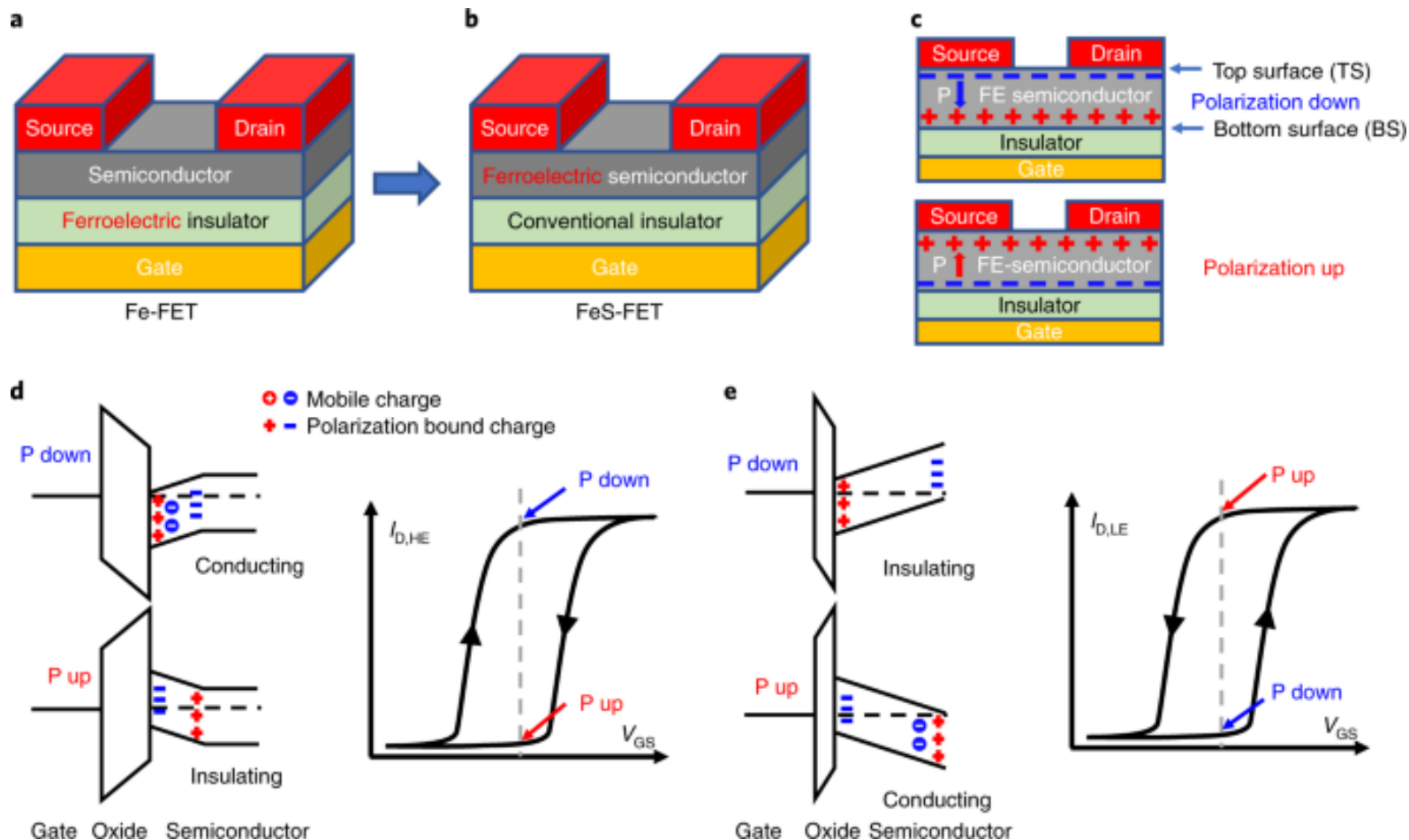
Princip usměrňovacího jevu spočívá v tom, že přes přechod PN přechází **proud pouze v jednom směru**. Je zřejmé, že **záleží na polaritě vnějšího připojeného napětí**.

- Projevuje se na PN přechodu
- Vzniká spojením polovodič P a N vhodnou technologií
- PN přechod propustí jen jednu polaritu střídavého signálu



Paměťový jev

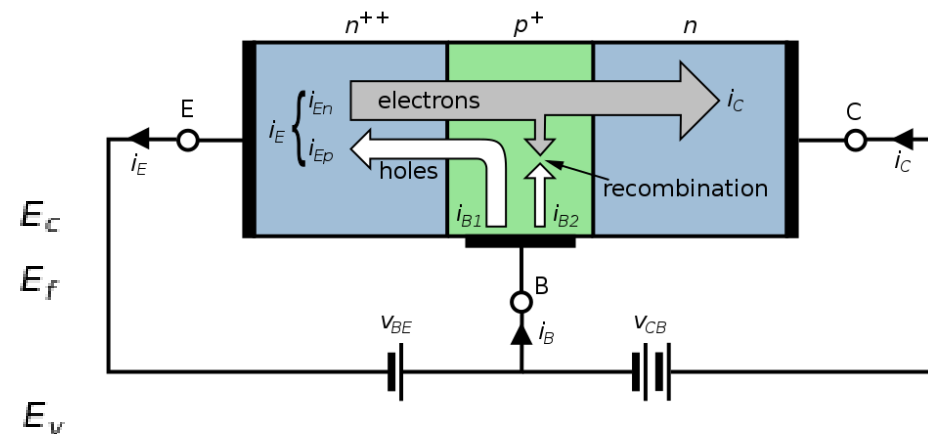
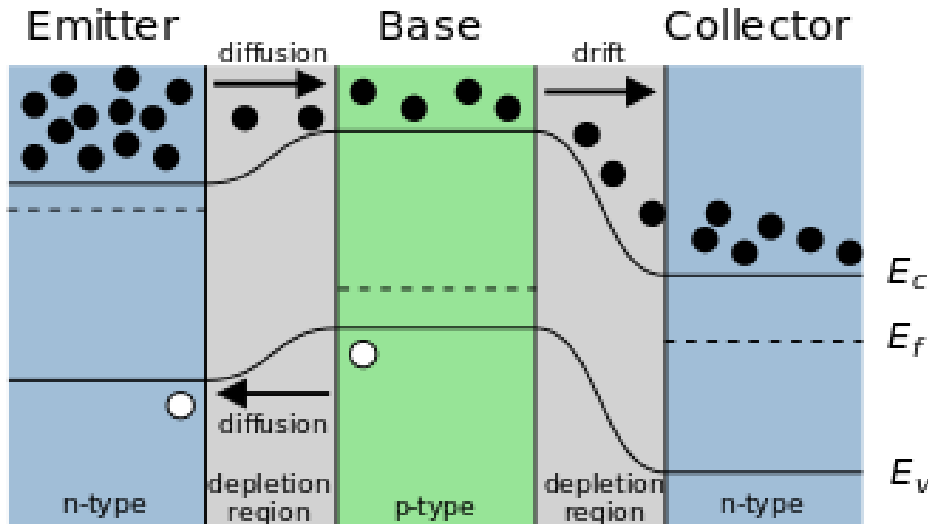
Paměťový jev je založen na změně odporu amorfního polovodiče (o 4 až 7 řádů) při překročení určitého napětí nebo při osvětlení.



Tranzistorový jev

Vzniká ve struktuře **dvou PN přechodů** se společnou vrstvou polovodiče (báze). Proudem do báze lze řídit výstupní proud tranzistoru. Musí být splněny podmínky:

- přechod emitor – báze musí být polarizovaný v propustném směru
- přechod báze – kolektor musí být polarizovaný v závěrném směru
- mezi kolektorem a emitorem musí být dostatečné napětí



Kontrolní otázky

- Nakreslete pásový model PN přechodu.
- Co je difuzní napětí a vyčerpaná oblast PN přechodu?
- Popište vlastnosti PN přechodu s připojením vnějším napětím.
- Vysvětlete Hallův jev.
- Jaký rozdíl je mezi Seebeckovým a Peltierovým jevem na polovodičích?
- Jak vzniká piezoelektrický jev v polovodičích?
- Vysvětlete rozdíl mezi tunelovým a lavinovým jevem.
- Jakým způsobem dosáhneme záporného diferenciální odporu u polovodičů?
- Vysvětlete rozdíl mezi vnitřním a vnějším fotoelektrickým jevem.
- Proč u PN přechodu dochází k usměrňovacímu jevu?
- Vysvětlete tranzistorový jev.
- Co je paměťový jev u polovodičů?

