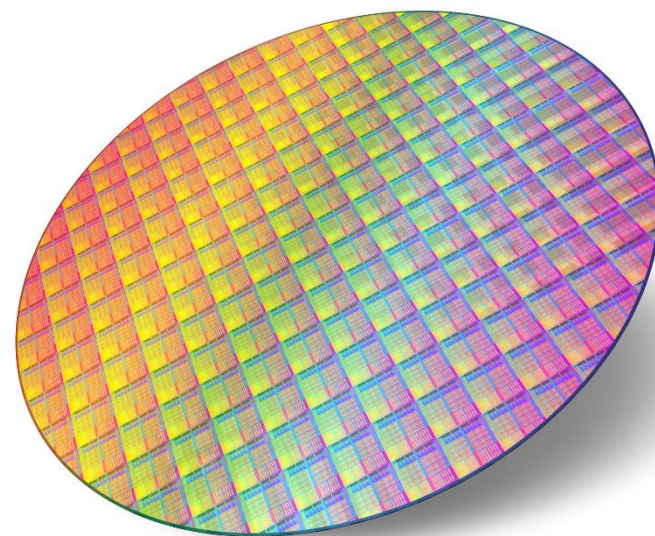


6

Polovodičové materiály pro elektrotechniku



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



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, CO JE POLOVODIČOVÝ MATERIÁL A JAKÉ MUSÍ SPLŇOVAT POŽADAVKY.
- DOZVÍTE SE, CO JE TO PÁSOVÝ MODEL.
- ZJISTÍTE, JAK SE ROZDĚLUJÍ POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ VLASTNOSTI MAJÍ JEDNOTLIVÉ POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ POLOVODIČE JSOU VHODNÉ PRO KONSTRUKCI ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK A KDE SE VEZMOU.
- ZJISTÍTE, JAKÉ JEVY NA POLOVODIČÍCH EXISTUJÍ.
- DOZVÍTE SE, CO SE STANE, KDYŽ BUDE POLOVODIČ VYSTAVEN VYSOKÝM TEPLITÁM.
- ZJISTÍTE, CO SE STANE, KDYŽ BUDE POLOVODIČ VYSTAVEN ELEKTROMAGNETICKÉMU ZÁŘENÍ.
- DOZVÍTE SE, JAKÝM ZPŮSOBEM LZE REALIZOVAT ZÁPORNÝ ELEKTRICKÝ ODPOR.



6.1 Polovodičové materiály

6.1.1 Co je polovodič

V roce **1821** odhalil **Thomas Seebeck** polovodičové vlastnosti síranu olovnatého. V roce **1833** objevil **Michael Faraday** teplotní závislosti polovodičů a v roce **1873** objevil **citlivost selenu na světlo**. Elektrické zařízení využívající polovodič bylo známo již na počátku 20. století - hrotová elektroda (cat's-whisker) tvořící základ krystalky (jednoduché rádio). **Výroba polovodičových diod** započala až po velkém úsilí v roce **1940**. Výrazným mezníkem v historii elektroniky byl v roce **1947 vynález tranzistoru** v Bellových laboratořích. **První integrovaný obvod**, který vyrobil v roce **1958** Jack Kilby, obsahoval v jednom pouzdře **čtyři tranzistory**.

Polovodič je pevná látka, jejíž **elektrická vodivost závisí na vnějších nebo vnitřních podmínkách**.

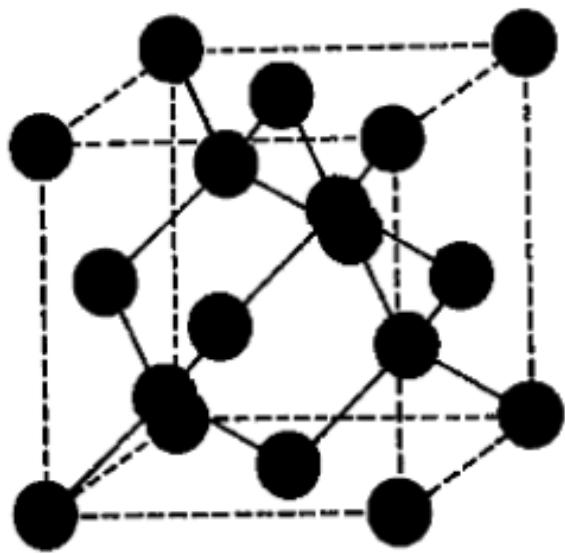
Vnější podmínky: tepelná, elektrická nebo světelná energie.

Vnitřní podmínky: příměsi jiného prvku v polovodiči.

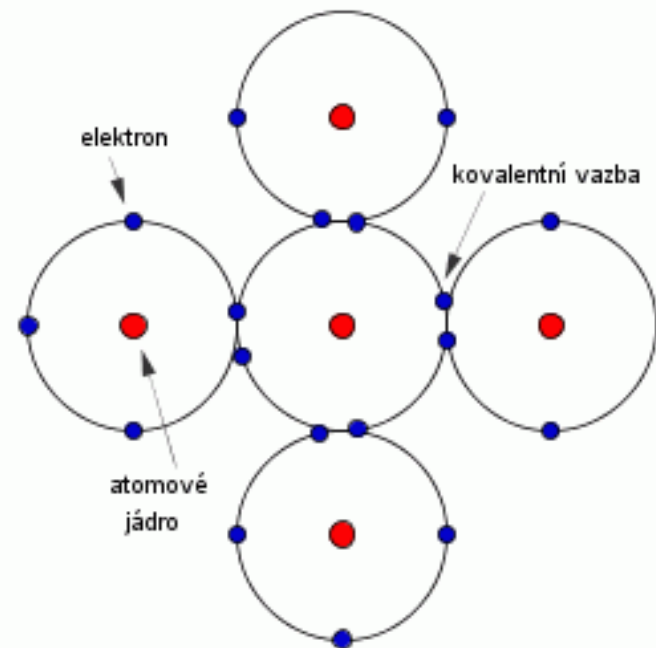


Polovodiče většinou krystalizují v **kubické, plošné centrované mřížce diamantového typu**. Každý atom polovodičového prvku v mřížce je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedními atomy.

Polovodiče jsou materiály vyznačující se **kovalentní vazbou mezi atomy – sdílené elektrony mezi sousedními atomy**. U materiálů s kovalentní vazbou se projevuje silná závislost elektrického odporu na teplotě, mají vysoký index lomu, velkou relativní permitivitu, bývají neprůhledné pro dlouhovlnné elektromagnetické záření.



Mřížka kubická, plošně
centrovaná diamantového typu



Princip kovalentní vazby

6.1.2 Pásový model polovodiče

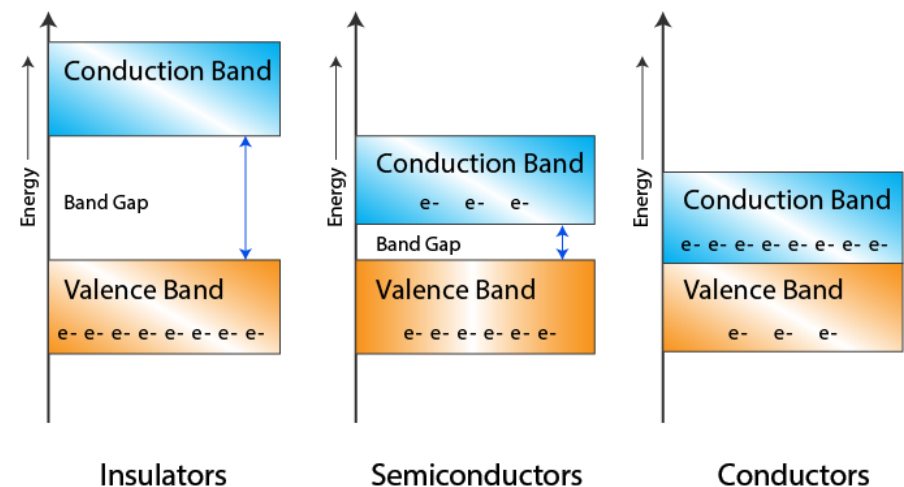
Pásový (energetický) model atomu souvisí s **rozložením energií elektronů** v atomu a zobrazuje tedy energie elektronů příslušného atomu. Energie se vynáší ve směru osy y , každá vodorovná čára představuje určitou energetickou hladinu (pás). Používá se **jednotka eV** ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Dovolené pásy představují energie, které elektrony mohou mít, a **zakázané pásy** určují velikosti energií, které elektrony mít nemohou.

Valenční pás zobrazuje energie valenčních elektronů.

Vodivostní pás tvoří energie těch elektronů, které se již uvolnily z vazby a podílejí se na vedení elektrického proudu.

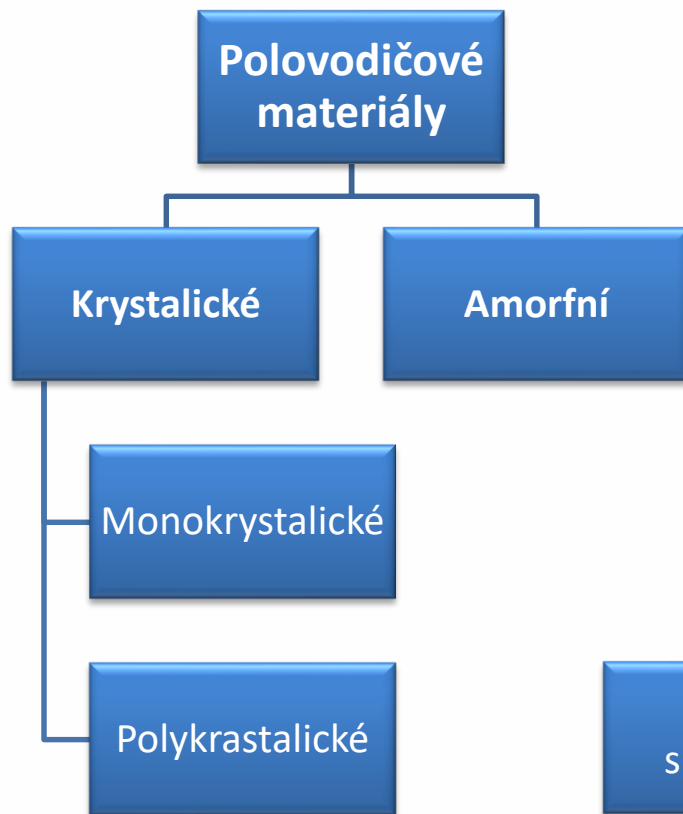
Zakázaný pás je u polovodičů v rozmezí **0,1 až 3 eV**.



Pásové modely pevných látek

6.1.3 Základní rozdělení polovodičových materiálů

Polovodičové materiály je možné **rozdělit na základě jejich složení nebo struktury**.



Rozdělení podle struktury



Rozdělení podle složení

Elementární - Si, Ge, Se, Te, P, S, As, Sn, Sb, I, B

Sloučeninové - $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, A^IB^{VII} , $A^{IV}B^{VI}$, $A_2^{III}B_3^{VI}$, $A_2^VB_3^{VI}$, SiC

Oxidické - Cu_2O , ZnO, ferity, granáty, feroelektrika

Ternární a kvaternární - ternární a kvaternární tuhé roztoky polovodičových sloučenin $A^{III}B^V$ nebo $A^{II}B^{VI}$. Jsou základem moderních optoelektronických struktur.

Dále se používá celá řada elementárních prvků i chemických sloučenin jako komponenty polovodičových sloučenin, při mikrolegování, při epitaxi, difuzi, nanášení vodivých kontaktů, vytváření pasivních prvků (rezistory, kondenzátory,...), v integrovaných obvodech.



6.1.4 Požadavky na polovodičové materiály

Chemická čistota – minimálně 8N, tj. 99,999999 % (1 cizí atom na 100 miliónů atomů polovodiče)

Fyzikální čistota – elektrické, magnetické, optické a další vlastnosti

Strukturní dokonalost – monokrystaly s definovanou orientací osy krystalu a s minimálním obsahem strukturních poruch (vakance, bezdislokační krystaly, dendrity)

Přes 90 % polovodičových součástek, vyrobených v současnosti, vychází ze tří nejpoužívanějších materiálů, kterými jsou v **křemík, arzenid galia a germanium**.

V praxi se používají polovodičové materiály, jak s **uspořádanou strukturou** (krystalické, polykrystalické), tak materiály s **méně uspořádanou až amorfni strukturou**. Například křemík se používá nejčastěji ve formě monokrystalické, známé jsou však i aplikace využívající polykrystalický, resp. amorfni křemík (solární články). **Struktura** je v tomto případě **určena technologií výroby** polovodičového materiálu.



6.2 Elementární polovodičové materiály

6.2.1 Křemík (Si)

- elektronová konfigurace - $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
- protonové číslo $z = 14$
- relativní atomová hmotnost $A_r = 28,08$
- chemická vazba mezi atomy - kovalentní
- krystalová struktura kubická, diamantového typu
- šířka zakázaného pásu $\Delta W = 1,12 \text{ eV}$
- mřížková konstanta $a = 0,357 \text{ nm}$
- počet atomů v 1 cm^3 $N = 5 \cdot 10^{22}$
- hustota $\rho = 2,329 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$
- teplota tání $t_M = 1420 \text{ }^\circ\text{C}$
- relativní permitivita $\epsilon_r = 12,5$
- pohyblivost elektronů $\mu_D = 1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- pohyblivost děr $\mu_A = 480 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- donory - V. skupina (N, P, As, Sb) pro polovodiče typu N
- akceptory - III.skupina (B, Al, Ga, In) pro polovodiče typu P



Křemík



Oxid
křemičitý

Křemík se používá výhradně v **monokrystalické formě** pro výrobu polovodičových prvků jako např. tranzistorů, diod, tyristorů, integrovaných obvodů, mikroprocesorů, paměťových prvků.

Křemík má **vyšší rozsah pracovních teplot, vyšší spolehlivost a životnost** součástek než germanium. Křemík **není rozpustný v kyselinách, ale v zásadách**.

Sloučeniny křemíku: SiC , Si_3N_4 , SiO_2 – izolační a dielektrické vrstvy

Z hlediska optických vlastností je **transparentní pro elektromagnetické záření pro vlnovou délku nad $1,1\ \mu\text{m}$** . **Fotodetektory** na bázi Si vykazují maximum fotovodivosti na vlnové délce přibližně **$0,85\ \mu\text{m}$** .

Křemík je **v zemské kůře velmi rozšířen**. Jako elementární prvek se však v zemské kůře nevyskytuje. Vyskytuje se oxid křemičitý, různé druhy křemičitanů a další krystalické modifikace (křemen, křišťál, ametyst, opál, citrín, záhněda). Hutní křemík se využívá při výrobě oceli – výchozí surovina je křemen SiO_2 . **Hutní křemík není vhodný pro polovodiče – obsahuje mnoho příměsí.**



6.2.2 Germanium (Ge)

Aplikace je pro **vysokofrekvenční polovodičové součástky** – větší pohyblivost nosičů náboje oproti křemíku. Použití především v **monokrystalické formě**.

Germaniové součástky vykazují značné **zbytkové proudy a rozptyl parametrů** – útlum v použití.

Výchozí materiál **pro speciální součástky**.

Při výrobě germania se vychází z vedlejších produktů během výroby zinku. Využívá se popílek z uhlí s obsahem germania nebo z rud s vyšším obsahem germania. Práškovité germanium se přetavuje při 1000 °C – vznik polykrystalických ingotů germania.

Za **normální teploty** je germanium **na vzduchu stálé**, při teplotě nad 500 °C se slučuje s kyslíkem, vodíkem a dusíkem.



Porovnání parametrů křemíku a germania

Parametr	Si	Ge
Mřížková konstanta (nm)	0,543	0,566
Hustota (kg/m ³)	2 330	5 320
Šířka zakázaného pásu (eV)	1,11	0,67
Intrinzická koncentrace nosičů (m ⁻³)	$1,45 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$
Pohyblivost elektronů (m ² V ⁻¹ s ⁻¹)	0,135	0,39
Pohyblivost děr (m ² V ⁻¹ s ⁻¹)	0,048	0,19
Výstupní práce elektronů (eV)	4,3	4,8
Relativní permitivita (-)	11,7	16,3
Teplota tavení (°C)	1415	937



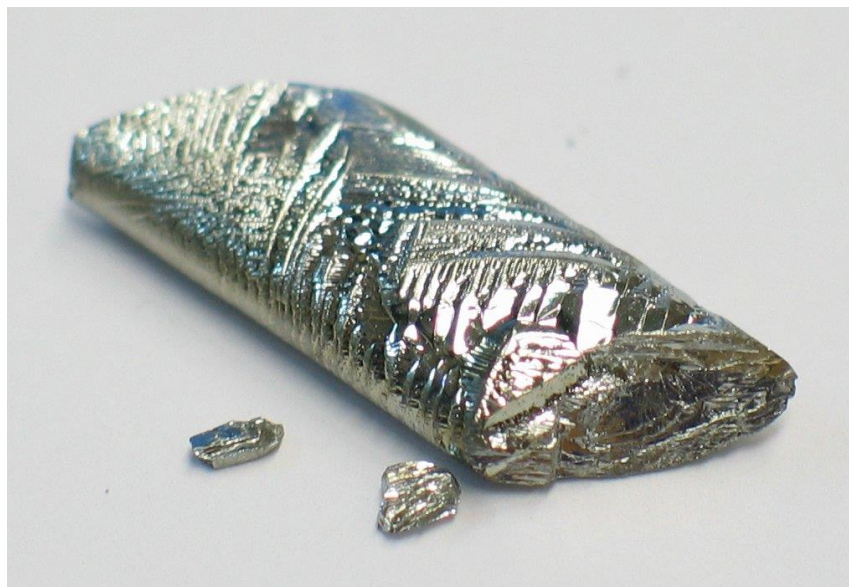
6.2.3 Selen (Se)

- relativní atomová hmotnost: 78,96
- hustota: 4,8 kg.dm⁻³
- teplota tání: 220 °C
- teplota varu: 680 °C,
- amorfní Se: izolant $\rho = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$,
- v polovodičové technice jako hexagonální Se
- Se jako vlastní polovodič: měrná vodivost $10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$
- šířka zakázaného pásu: 1,8 eV
- molekulární mřížka: kovalentní vazba + vazby van der Waalsovy mezi řetězci



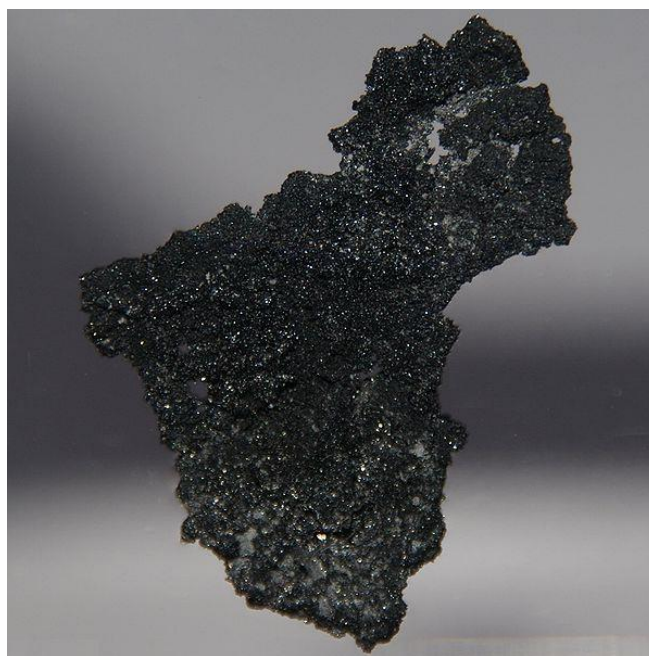
6.2.4 Telur (Te)

- protonové číslo: 52
- relativní atomová hmotnost: 121,61
- hustota: 6,2 kg.dm⁻³
- teplota tání: 452 °C
- s kovy vytváří teluridy
- hexagonální struktura: vlastní polovodič o měrné vodivosti 2 – 4 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$
- šířka zakázaného pásu – 0,35 eV
- aplikace: složka polovodičových sloučenin, dobré fotoelektrické a termoelektrické vlastnosti



6.2.5 Bor (B)

- protonové číslo: 5
- relativní atomová hmotnost: 10,82
- hustota: $2,34 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$
- teplota tání: $2300 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- šířka zakázaného pásu: 1,63 eV
- měrný elektrický odpor výrazně závisí na teplotě: $10^6 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ při $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,1 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ při $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- aplikace: příměsový prvek, složka polovodičových sloučenin



6.3 Sloučeninové polovodičové materiály

6.3.1 Typ $A^{III}B^V$

Polovodičové sloučeniny typu $A^{III}B^V$ jsou chemickými produkty prvků III. skupiny (nejčastěji B, Al, Ga, a In) a V. skupiny (typicky N, P, As, a Sb) periodické soustavy prvků. Podle prvku V. skupiny je nazýváme **nitridy, popř. antimony**.

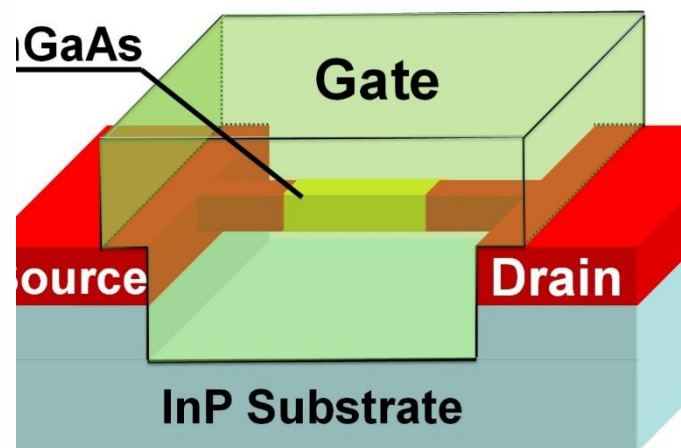
S výjimkou nitridů krystalizují ve sfaleritové mřížce. Mezi atomy těchto sloučenin vzniká **kovalentní, ale částečně i iontová vazba**.

Pro dosažení **P typu vodivosti** jsou používány nejčastěji **prvky II. skupiny** periodické tabulky (Be, Mg, Zn, Gd), které nahrazují prvek III. skupiny a v důsledku nižší valence se chovají jako akceptory. Stejně tak **prvky IV. skupiny** (S, Se, Te) nahrazují prvky v podmřížce obsazené atomy V. skupiny a působí jako donory. **Atomy IV. skupiny** mohou obsadit obě podmřížky a působit tak **vodivost děrovou nebo elektronovou**. Aktivační energie těchto příměsí leží v rozmezí 0,01 eV až 0,1 eV.



Z pohledu **technických aplikací** polovodičových sloučenin má **největší význam** sloučenina **GaAs** (galium arsenid). Má poměrně velkou šířku zakázaného pásu, která umožňuje **provoz součástek při teplotách do 400° C**. GaAs se používá zejména v **optoelektronice**, kde vykazuje větší kvantovou účinnost, jak při konverzi optického záření na elektrickou energii, tak i při generaci optického záření.

GaAs je využíván pro přípravu **diod, plem řízených tranzistorů a mikrovlnných integrovaných obvodů** dosahujících **vyšších pracovních frekvencí** než u křemíku. Polovodiče s **malou šířkou zakázaného pásu** např. InAs a InSb dosahují **vysoké pohyblivosti nosičů** a používají se **při výrobě magnetorezistorů a součástek využívajících Hallova jevu**.



Polem řízený tranzistor
využívající GaAs

Vybrané fyzikální parametry sloučeninových polovodičů $A^{III}B^V$. Parametry závisující na teplotě jsou uvedeny pro 300 K.

Parametr	AlP	GaP	InP	AlAs	GaAs	InAs	AlSb	GaSb	InSb
Mřížková konstanta (nm)	0,546	0,545	0,586	0,566	0,565	0,605	0,613	0,609	0,647
Hustota (kg/m ³)	2 370	4 070	4 780	3 600	5 320	5 670	4 280	5 650	5 780
Šířka zakázaného pásu (eV)	2,45	2,26	1,35	2,16	1,43	0,36	1,58	0,72	0,18
Pohyblivost elektronů (m ² V ⁻¹ s ⁻¹)	0,008	0,019	0,46	0,028	0,95	3,3	0,02	0,4	7,8
Pohyblivost děr (m ² V ⁻¹ s ⁻¹)	0,003	0,012	0,015		0,045	0,046	0,055	0,14	0,075
Relativní permitivita (-)	9,8	11,1	12,4	10,1	13,1	14,6	14,4	15,7	17,7
Teplota tavení (°C)	2 000	1 467	1 070	1 770	1 238	942	1 060	710	525



6.3.2 Typ $A^{II}B^{VI}$ – chalkogenidy

Vznikají **kombinací** zejména tří **prvků II. skupiny** (Zn, Cd, Hg) a tří prvků **VI. skupiny** (S, Se, Te) periodické tabulky.

K těmto sloučeninám lze zařadit i **ternární (třísložkové) tuhé roztoky polovodičových sloučenin** $Cd_xHg_{1-x}Te$ nebo $Cd_xZn_{1-x}Te$ vhodné pro konstrukci **fotodetektorů záření v širokém spektru vlnových délek** (záření RTG, jaderné, γ -záření, ultrafialové, infračervené záření).

Atomy vytváří **vyšší podíl iontové vazby** na úkor kovalentní vazby s **částečným podílem vazby kovové**.

- **CdS** (sulfid kadmia, sirník kademnatý) - fotorezistory, fotodiody
- **CdSe** (selenid kademnatý, selenid kadmia) - fotorezistory, fotodiody
- **ZnS** (sulfid zinečnatý) - elektroluminiscenční displeje
- **ZnSe** (selenid zinečnatý) - elektroluminiscenční displeje
- **CdTe** (telurid kademnatý) - lasery, detekční záření



Vybrané fyzikální parametry sloučeninových polovodičů $A^{II}B^{VI}$

Parametr	ZnS	HgS	ZnSe	ZnTe	CdTe
Mřížková konstanta (nm)	0,541	0,584	0,566	0,61	0,648
Hustota (kg/m ³)	4 090	7 730	5 420	6 340	5 860
Šířka zakázaného pásu (eV)	3,67	3,74	2,73	2,23	1,51
Teplota tavení (°C)	1 020	1 480	1 520	1 239	1 041



6.3.3 Typ $A^{IV}B^{VI}$

Nezanedbatelný význam, a to především v **oblasti optoelektronických aplikací**, mají polovodičové sloučeniny typu $A^{IV}B^{VI}$, a to **PbS** (sulfid olovnatý), **PbSe** (selenid olovnatý) a **PbTe** (telurid olovnatý).

Vazby mezi atomy mají převážně iontový charakter.

Tuhé roztoky sloučenin $A^{IV}B^{VI}$ a jejich ploykrystalické vrstvy vykazují **velkou fotovodivost v blízké infračervené oblasti** spektra, proto se používají pro výrobu **fotoodporů**.

Vybrané fyzikální parametry sloučeninových polovodičů $A^{IV}B^{VI}$

Parametr	PbS	PbSe	PbTe
Mřížková konstanta (nm)	0,594	0,612	0,646
Šířka zakázaného pásu (eV)	0,39	0,27	0,32
Pohyblivost elektronů ($m^2V^{-1}s^{-1}$)	0,06	0,12	0,18
Pohyblivost děr ($m^2V^{-1}s^{-1}$)	0,07	0,1	0,09



6.3.4 Typ $A^{IV}B^{IV}$

Zvláštní pozornost si zasluhuje polovodičová sloučenina typu $A^{IV}B^{IV}$ – **SiC** (karbid křemíku), která je známá také jako **karborundum**. V přírodě se vyskytuje jako extrémně vzácný **minerál moissanit**. Syntetický prášek SiC se sériově vyrábí od roku 1893 pro použití jako brusivo. Materiál je mimořádně **tepelně odolný** a vlastní vodivost se u něj uplatňuje při teplotách nad 1400 °C.

Sloučenina má **šířku zakázaného pásu $\Delta W_g = 2,9$ eV**. Podobně jako u elementárních polovodičů příměsi z prvků III. skupiny (B, Al, Ga, In) způsobí vodivost typu P a prvky V. skupiny (N, P, Sb, Bi) vodivost typu N.

SiC se používá pro výrobu **napětově závislých odporů – varistorů, výkonových tranzistorů, LED, detektorů**.



Ormation of a thermal oxide film

6.3.5 Typ A^VB^VI

Ze skupiny polovodičových sloučenin typu A^VB^VI je třeba zmínit **telurid bizmutý Bi_2Te_3** a **selenitý Bi_2Se_3** nebo jejich tuhé roztoky.

Jde o polovodiče s **malou šířkou zakázaného pásu** ($Bi_2Te_3 - W_g = 0,16$ eV, $Bi_2Se_3 - W_g = 0,27$ eV), s **vysokou vodivostí, vysokým termoelektrickým součinitelem a malou tepelnou vodivostí**.

Používají se zejména při **konstrukci polovodičových termoelektrických článků**, chladičů polovodičových součástek.



6.3.6 Oxidické polovodiče

Do skupiny oxidických polovodičů patří **oxidy přechodových prvků** jako je **Ti, Cr, Fe, Co, Ni a Cu**. Typickými představiteli jsou **sloučeniny Cu_2O , NiO , TiO_2 , Fe_2O_3** .

Vodivost v těchto materiálech se uskutečňuje přechodovými mechanismy mezi ionty kovů s rozdílným mocenstvím. **Žíháním** ve vhodné atmosféře dochází k **poruše stechiometrie a tím vzniku P, resp. N typu vodivosti**. **Šířka zakázaného pásu činí 1,56 eV**. Cu_2O má vysoký **termoelektrický součinitel $\alpha = 1,1 \text{ m V.K}^{-1}$** .

Mnohem větší uplatnění nalézají v dnešní době **tuhé roztoky oxidů**, jako např. **Fe_2O_3 , TiO_2 , NiO , Li_2O , HgO , Al_2O_3** , jako sintrované keramické materiály pro výrobu termistorů s negativním teplotním součinitelem (NTC).



- **Cu_2O** (oxid mědný) - vysoký termoelektrický součinitel (malá změna teploty => výrazná změna napětí), používá se u termočlánků a usměrňovačů
- **Fe_2O_3 , TiO** (oxid železitý) a (oxid titanatý) - sintrované (prášková technologie) materiály => používají se pro termistory se záporným teplotním součinitelem
- **BaTiO_3** (titaničitan barnatý) – při kritické (Currieho) teplotě ($120\text{ }^\circ\text{C}$) přejde z feroelektrické do paraelektrické oblasti => používá se k výrobě rezistorů a termistorů s pozitivním teplotním součinitelem a k výrobě kondenzátorů.



6.3.7 Amorfní polovodiče

Amorfní materiály mají nejvyšší stupeň **neuspořádanosti vnitřní struktury**. Pouze **v nejbližším sousedství atomů** je možno sledovat **pravidelné uspořádání mřížky**, což může vést ke **vzniku polovodičových vlastností** látky.

Technologie přípravy těchto materiálu je podobně, jako u kovových skel, založena na velmi **rychlém chlazení** (10^5 až 10^6 K.s⁻¹) **elementárních polovodičů**, případně jejich směsí, aby byl omezen růst krystalů.

Mezi nejznámější sklovité polovodiče patří **kombinace As-Te-Si-Ge; As-Te-Ga-Ge; As-Te-Ti**.

Sklovité polovodiče jsou používány pro přípravu **skelných vláken** pro CO a CO₂ lasery, v **ultrazvukové technice** a výrobu **spínacích součástek** založených na působení elektrického impulsu.

Technicky významné jsou rovněž tenké (cca 1 μm) **amorfní vrstvy Si dotované vodíkem**. Tyto vrstvy jsou výchozím materiálem pro výrobu levnějších solárních článků.



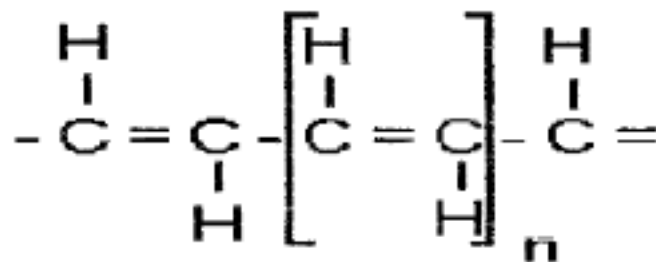
6.3.8 Organické polovodiče

Význam této skupiny polovodičových materiálů v posledním období stoupá. Je známo, že **řada organických materiálů vykazuje dobré polovodičové vlastnosti**.

Jedná se **makromolekulární látky**, u kterých se ve vazbách spojujících uhlíkové atomy **střídají jednoduché a dvojné vazby**.

V současné době se organické polovodiče využívají ve **výrobě luminiscenčních diod a barevných displejů**. Ve fázi vývoje je výroba tranzistorů, avšak problémy jsou spojeny s **malou pohyblivostí elektronů v organických polovodičích**.

Výhodou organických polovodičů je možnost **využití jednodušších technologií při výrobě polovodičových součástek** a tím jejich výrazné snížení cen. Látky organického původu s vlastnostmi polovodičů jsou obvykle **polymery**.



Polyacetylén – organický polovodič

6.4 Polovodiče vlastní a příměsové

6.4.1 Vlastní polovodiče (intrinsické)

V dnešní době se pro výrobu polovodičových součástek používá velmi **čistý monokrystalický křemík**. Atom křemíku má **14 elektronů**, z nichž 10 je pevně vázáno k jádru a zbylé **čtyři vytvářejí elektronové vazební dvojice** se čtyřmi sousedními atomy v krystalové mřížce. K **uvolnění elektronu** z kovalentní vazby v krystalu křemíku je zapotřebí **energie 1,1 eV**.

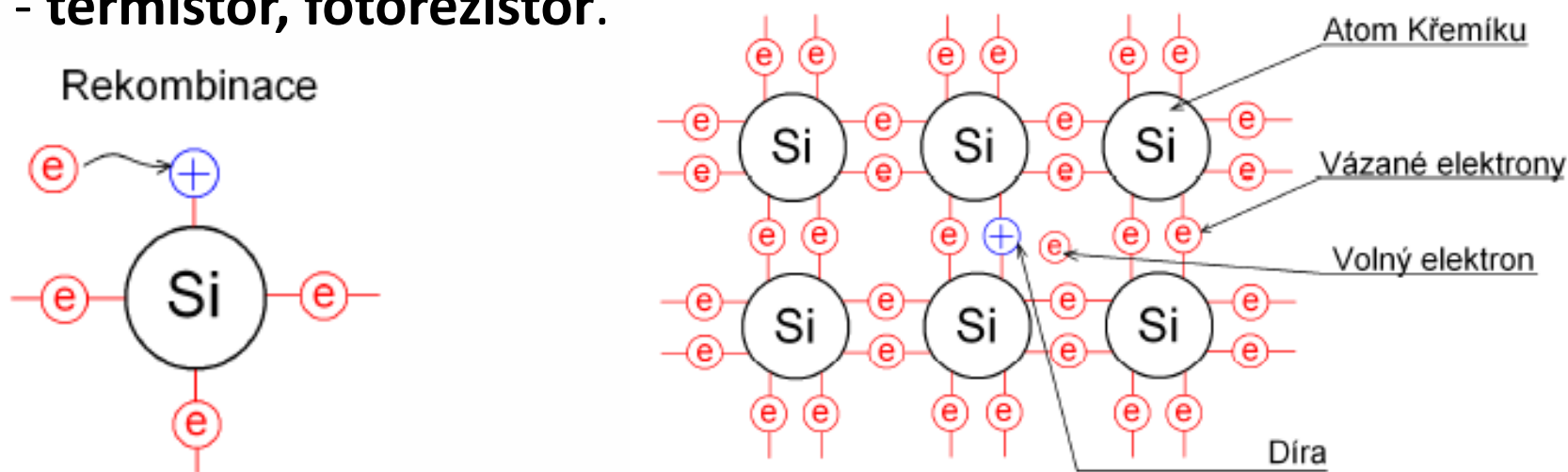
Při **teplotách blízkých nule** termodynamické teplotní stupnice ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) se všechny valenční elektrony zapojí do vazeb a křemík se chová jako **izolant**. Při teplotách **okolo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$** dochází k „**vytržení**“ **některých elektronů z vazeb**. Na místě uvolněného elektronu vznikne **prázdné místo, tzv. díra**, v němž převládá **kladný náboj** atomového jádra nad nábojem zbývajících elektronů. Díra má tedy vlastnost kladné částice. **Volné elektrony a díry se pohybují v krystalu chaoticky**. Setká-li se volný elektron náhodně s dírou, ztratí část energie, zaplní díru a zapojí se opět do vazebné dvojice. V polovodičích se tímto způsobem udržuje **při stálé teplotě dynamická rovnováha** mezi **generací páru elektron-díra a jejich zánikem – tzv. rekombinací**.



Když zapojíme **polovodič do elektrického obvodu**, vznikne v něm elektrické pole, které **způsobí uspořádaný pohyb děr** ve směru intenzity elektrického pole, **volných elektronů** ve směru opačném.

Hustota volných elektronů je v čistém polovodiči **stejná jako hustota děr**, ale s rostoucí teplotou se rychle zvětšuje a proto **rezistivita čistého polovodiče s rostoucí teplotou rychle klesá**.

Výše popsáný typ elektrické vodivosti polovodiče způsobený vznikem páru elektron-díra se nazývá **vlastní vodivost**. Vlastní vodivost může vyvolat kromě **tepelného pohybu krystalové mřížky** také **dopad záření na povrch polovodiče**. Vlastní vodivost se využívá jen u některých polovodičových součástek - **termistor, fotorezistor**.

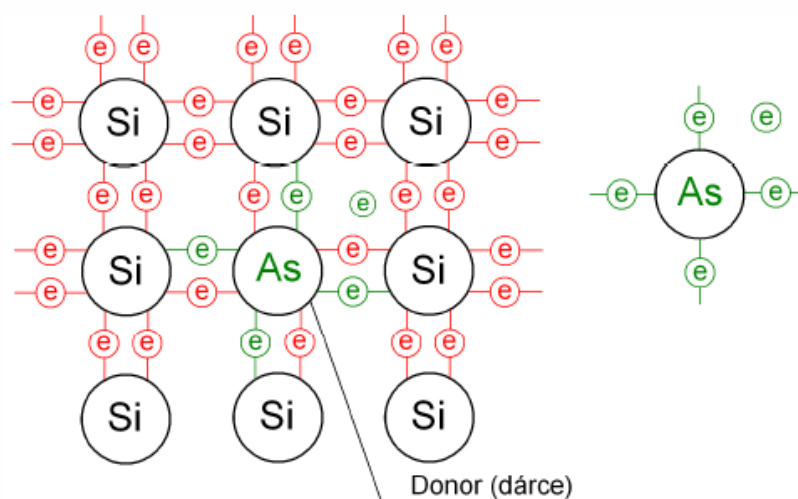


6.4.2 Příměsové polovodiče (extrinsické)

Příměsový polovodič můžeme získat tak, že v krystalu nahradíme část atomů křemíku prvkem, který má **3 nebo 5 valenčních** elektronů. Mohou tak tedy vzniknout dva typy příměsových polovodičů, a to **polovodič typu N** a **polovodič typu P**.

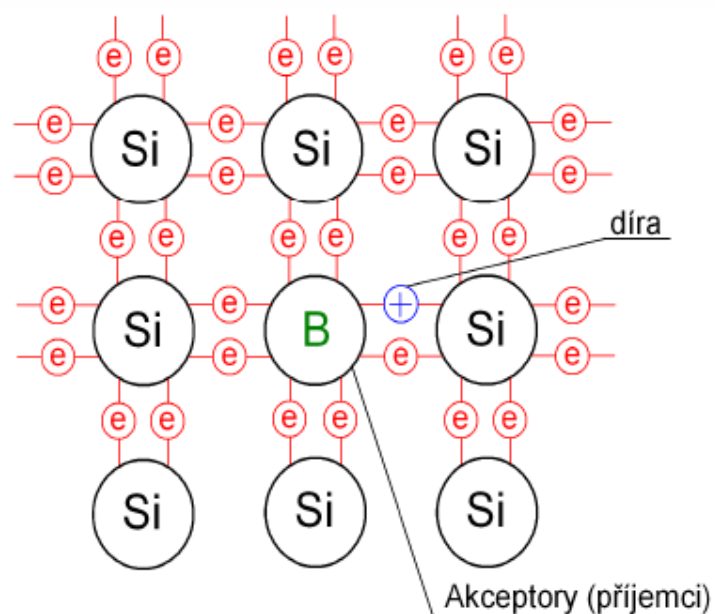
Polovodič typu N

Příměsový polovodič typu N získáme tehdy, **dodáme-li do krystalu křemíku** (čtyřmocný prvek) nějaký **pětimocný prvek** (fosfor, arsen). Prvku příměsi, jež má o jeden elektron více, říkáme donor (dárce). Volné elektrony donory zprostředkovávají svým pohybem záporných (negativních) nábojů **elektronovou vodivost**.



Polovodič typu P

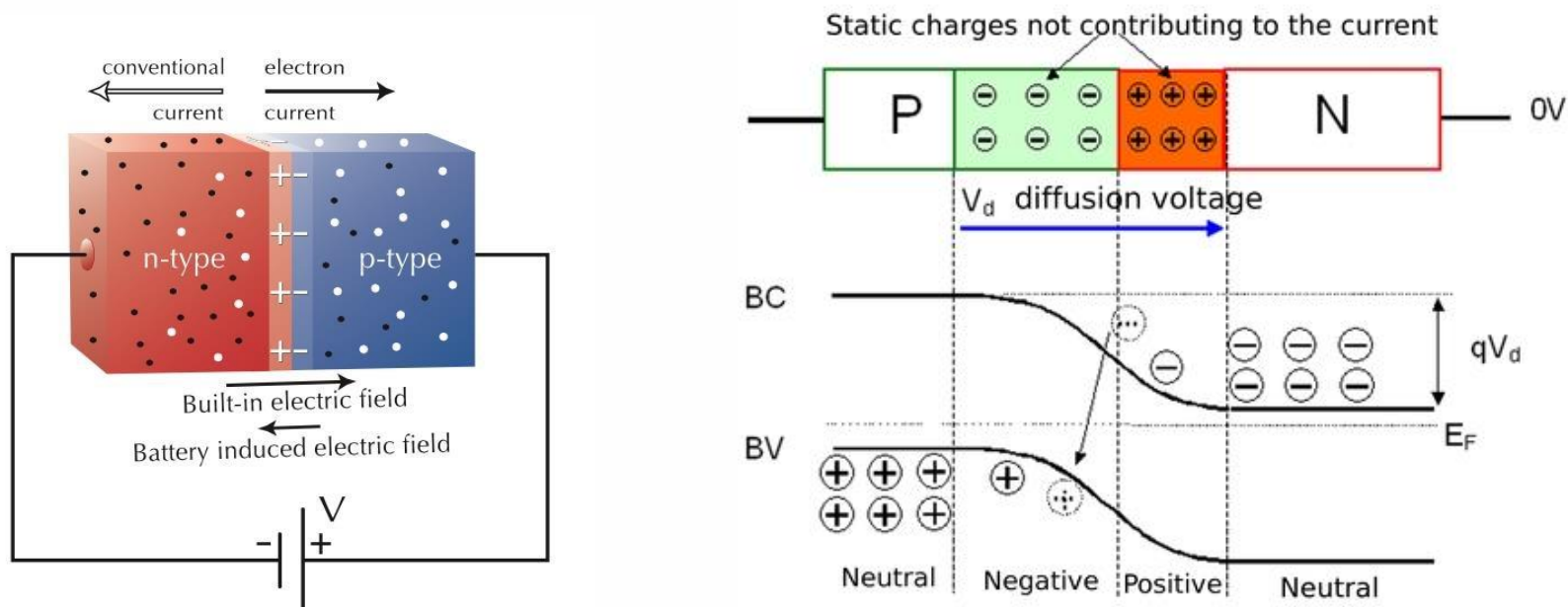
Je-li vlastní **polovodič dotován** prvkem obsahujícím pouze **tři valenční elektrony** (bor, hliník, galium), vznikne nevlastní polovodič, kterému u některých atomů **chybí valenční elektron**. Příměsi se třemi valenčními elektrony způsobí **vznik míst s chybějícími elektrony - díry**. Díra je nositelem kladného náboje. Prvkům, které dotují polovodiče typu P, říkáme **akceptory**. V polovodiči typu P je nevlastní **vodivost děrová**. Děry, které jsou do polovodiče typu P dodány, je mnohem více než vlastních nosičů náboje, a proto jsou díry většinovými nosiči náboje.



6.5 Jevy na polovodičích

6.5.1 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:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} U_D}$$

Difuzní napětí – výška potenciálové bariéry lze určit:

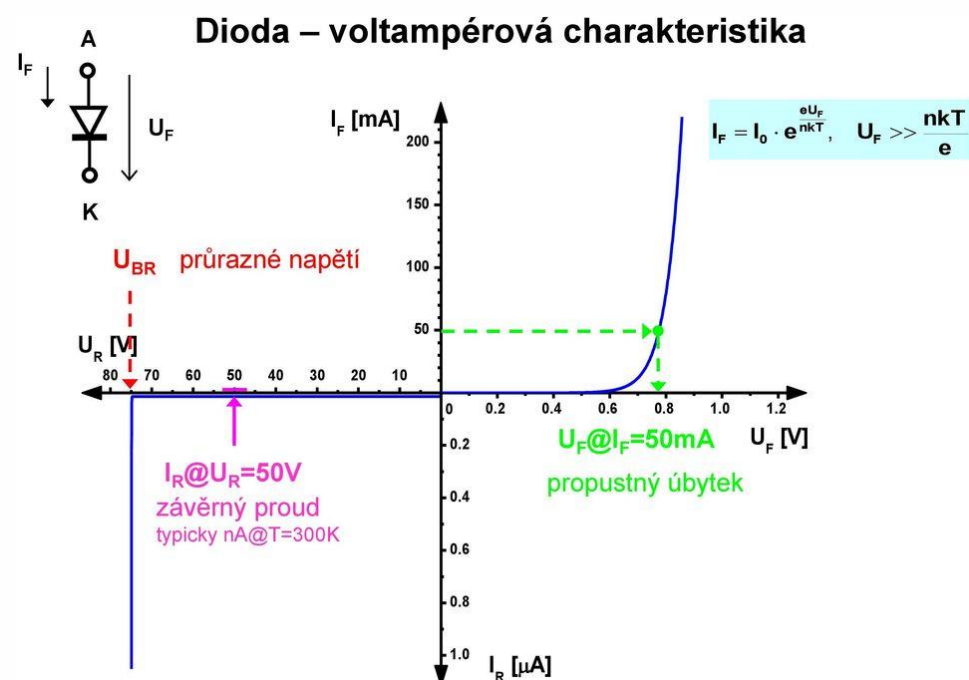
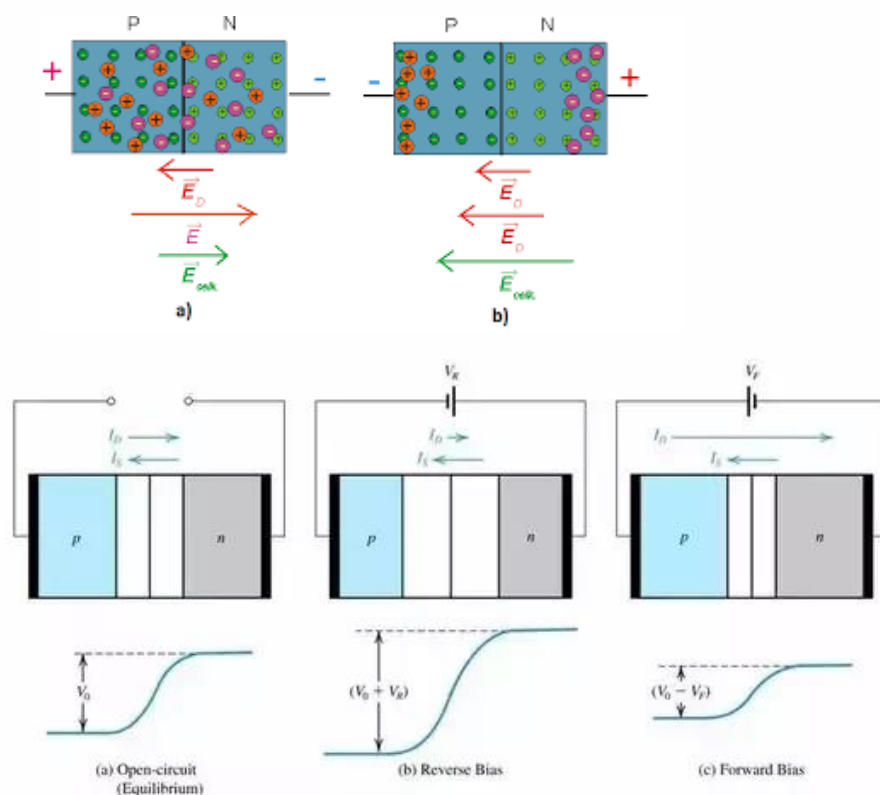
$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$



6.5.2 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



6.5.3 Pohyblivost nosičů

Pohyblivost nosičů vyjadřuje **míru schopnosti pohybu nosičů** v polovodiči. Pohyblivost nosičů je úměrná elektrickému poli a skutečné rychlosti nosičů a závisí na koncentraci příměsí (větší koncentrace → menší pohyblivost).

Střední rychlost elektronů je v řádu 10^5 m/s a k jejich rozptylu dochází převážně v oblasti poruch mřížky. Obvyklá střední volná dráha je přibližně 10^{-7} m a střední doba mezi srážkami odpovídá $t_c \approx 10^{-12}$ s. Když se polovodič nenachází ve vnějším elektrickém poli, je střední přemístění částice nulové, připojíme-li však **zdroj elektrického napětí**, dojde k **usměrněnému pohybu elektronů a děr** a urychlí se jejich pohyb (drift) na rychlost.

Pokud známe **pohyblivost částic** (tzv. drift), můžeme s její pomocí **určit vodivost** daného materiálu a následně proudovou hustotu.

$$\vec{v} = \mu \vec{E}$$

$$\mu_n > \mu_p$$

$$\sigma = e\mu_n n + e\mu_p p$$

$$\vec{j}_{dr} = e\mu_n n \vec{E} + e\mu_p p \vec{E} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

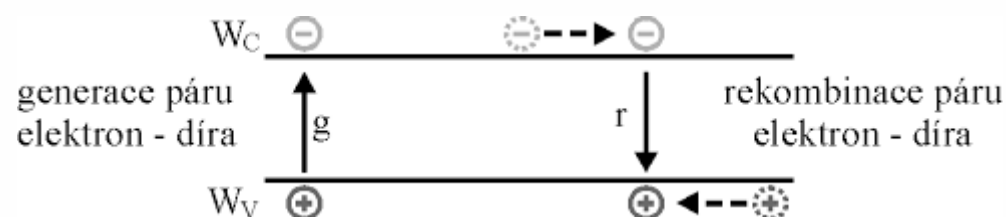
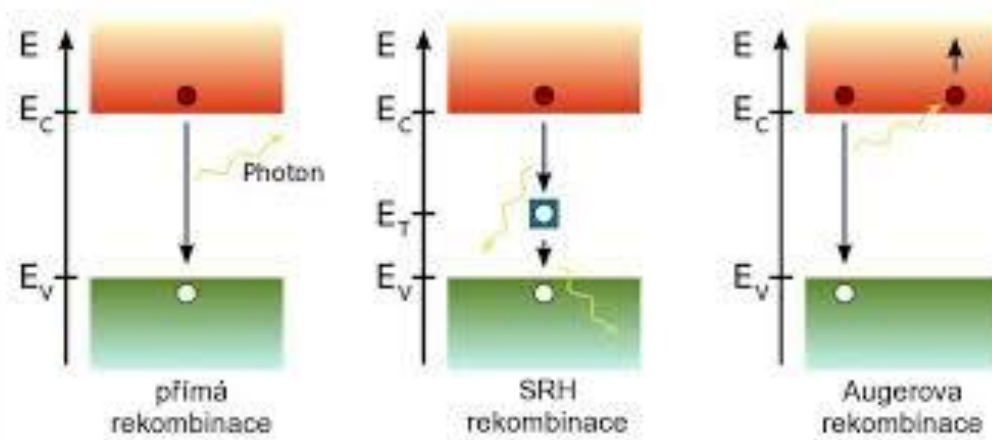
6.5.4 Rekombinace a generace nosičů

Generace

- **vytvoření páru elektron-díra**
- při narušení rovnováhy nosičů působením excitačního mechanismu
- **nutné dodání energie** – tepelná, světelná

Rekombinace

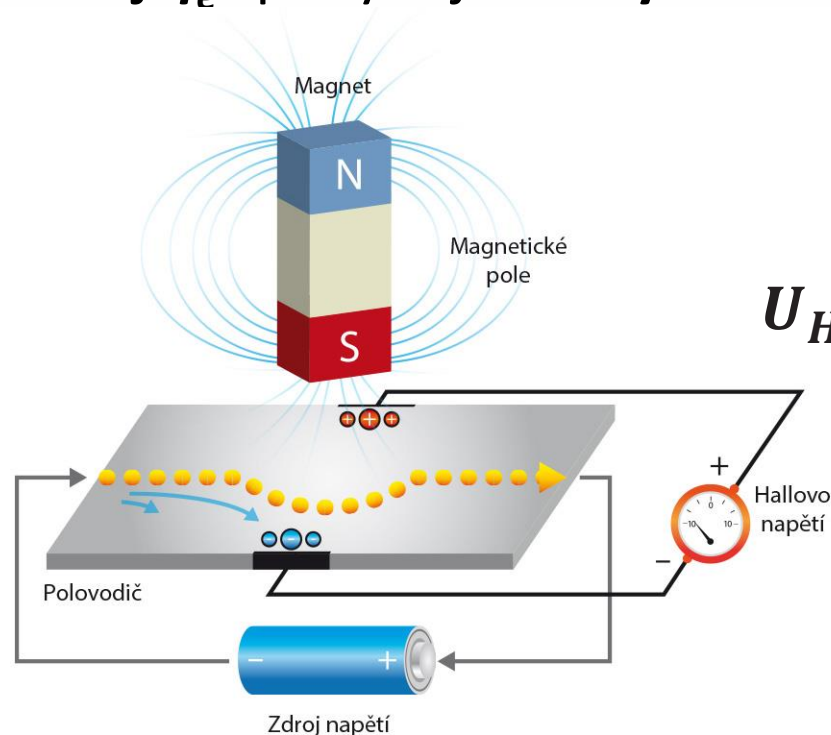
- uvedení zpět do rovnovážného stavu po excitaci nerovnovážných nosičů
- **zánik páru elektron-díra**
- přechod elektronu na nižší energetickou hladinu – **ztráta energie** (teplo, světlo)
- pravděpodobnost rekombinace roste s koncentrací nosičů
- **přímá rekombinace** – přechod elektronu přímo do valenčního pásu
- **nepřímá rekombinace** – přes rekombinační centrum



6.5.5 Hallův jev

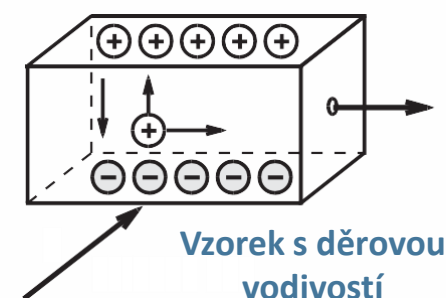
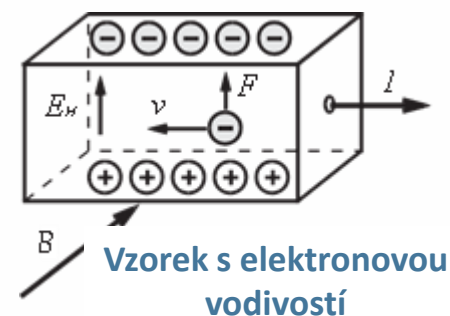
Hallův jev je **vznik elektrického napětí** příčně ve vodiči, jímž podélně protéká elektrický proud, který je odchylován magnetickým polem kolmým ke směru proudu. Hallův jev objevil v roce 1879 tehdy čtyřiašedesátiletý student Edwin Herbert Hall.

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** .



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

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



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.

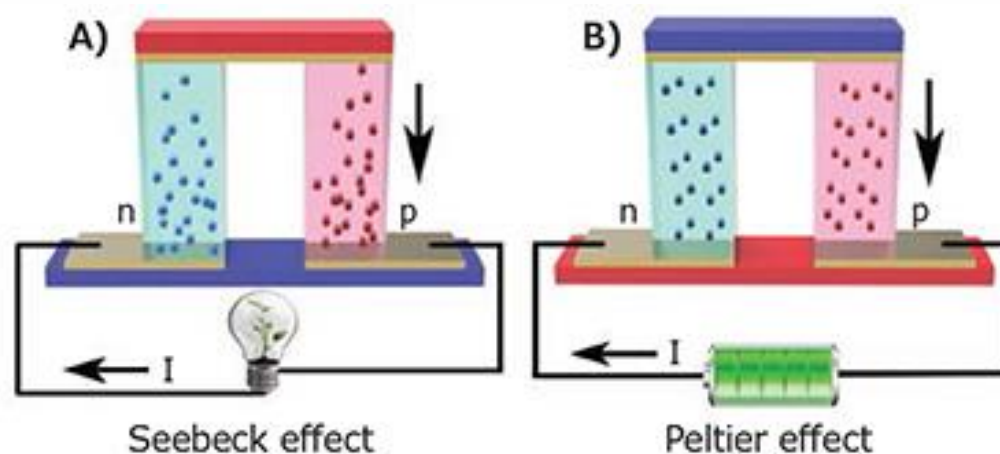
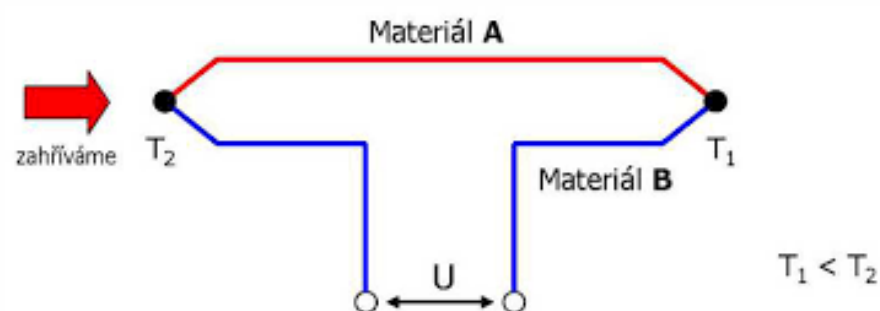
Hallový sondy mohou též sloužit ke **generování nízkofrekvenčních průběhů proudu**. Vzniklé Hallovo napětí způsobuje změny magnetického pole. Tím se systém rozkmitá.

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.



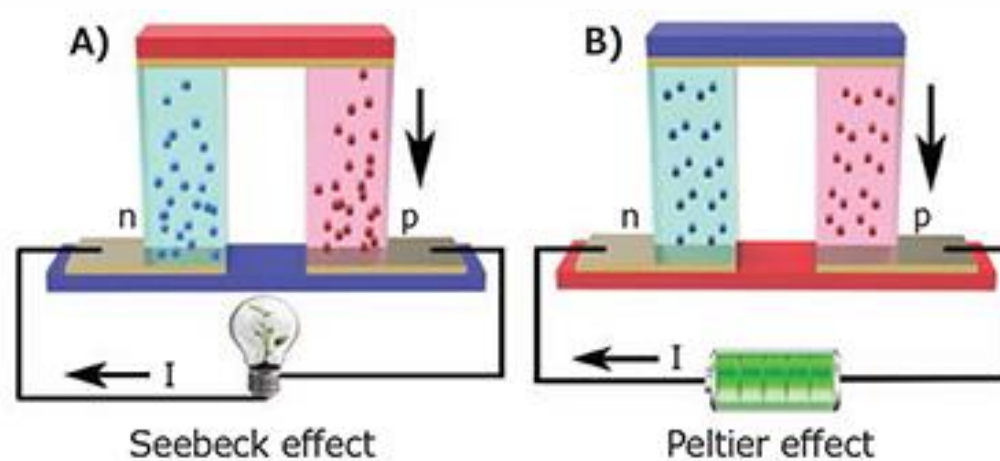
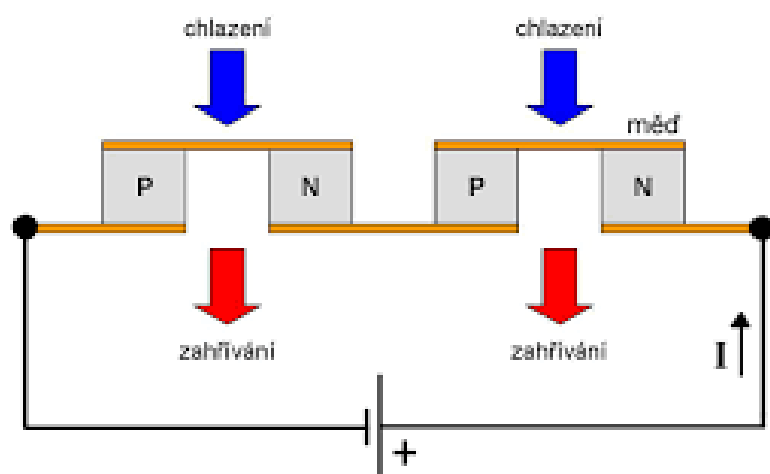
6.5.6 Seebeckův jev – termoelektrický jev

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**.



6.5.7 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.



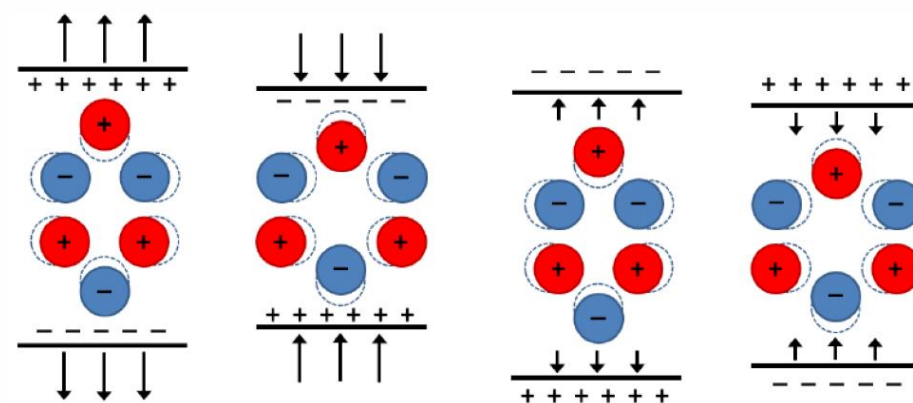
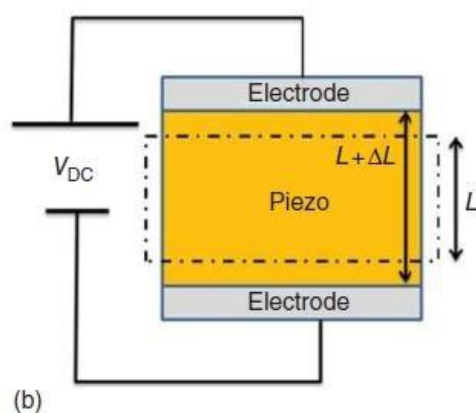
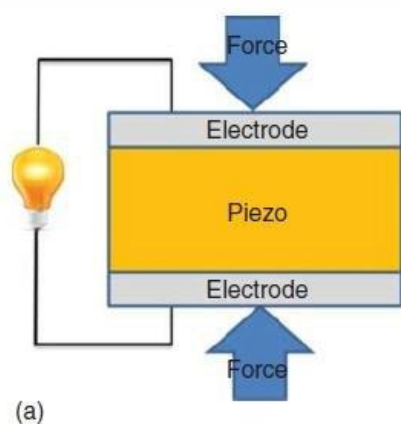
6.5.8 Piezoelektrický jev

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.

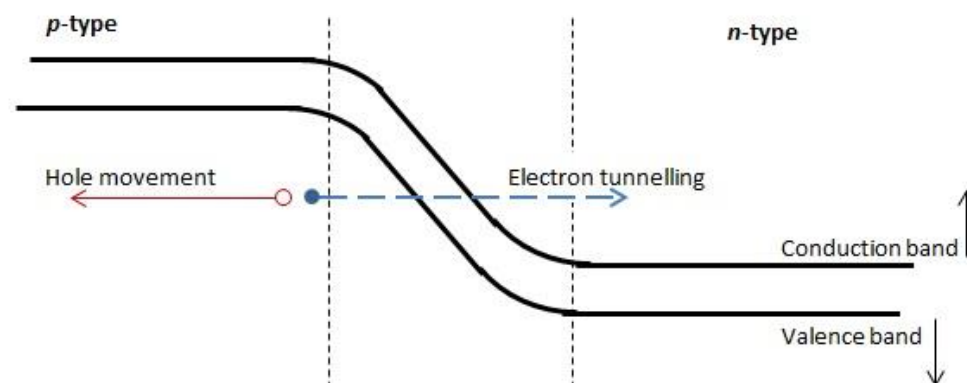
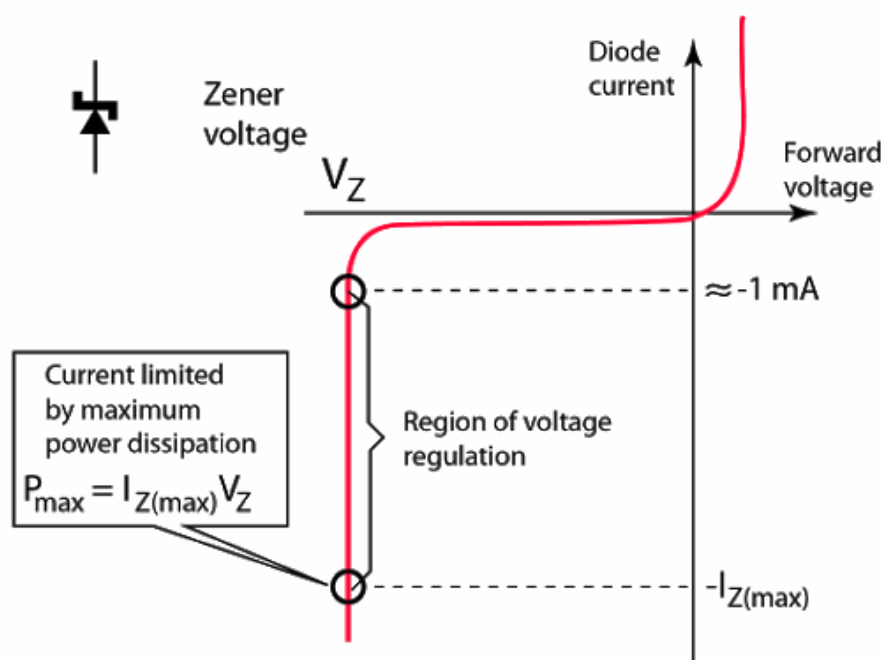
Nepřímý piezoelektrický jev

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.



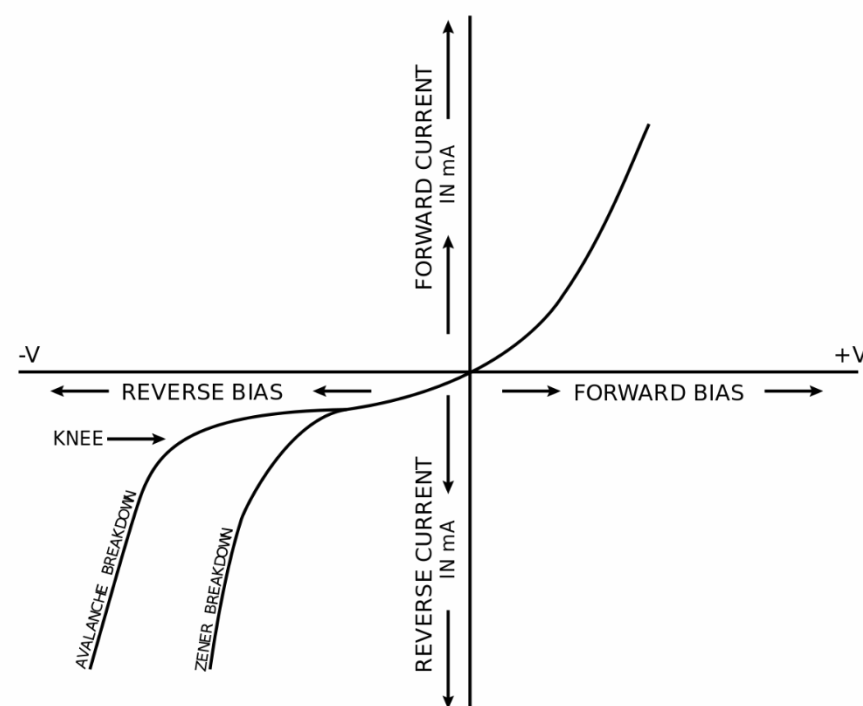
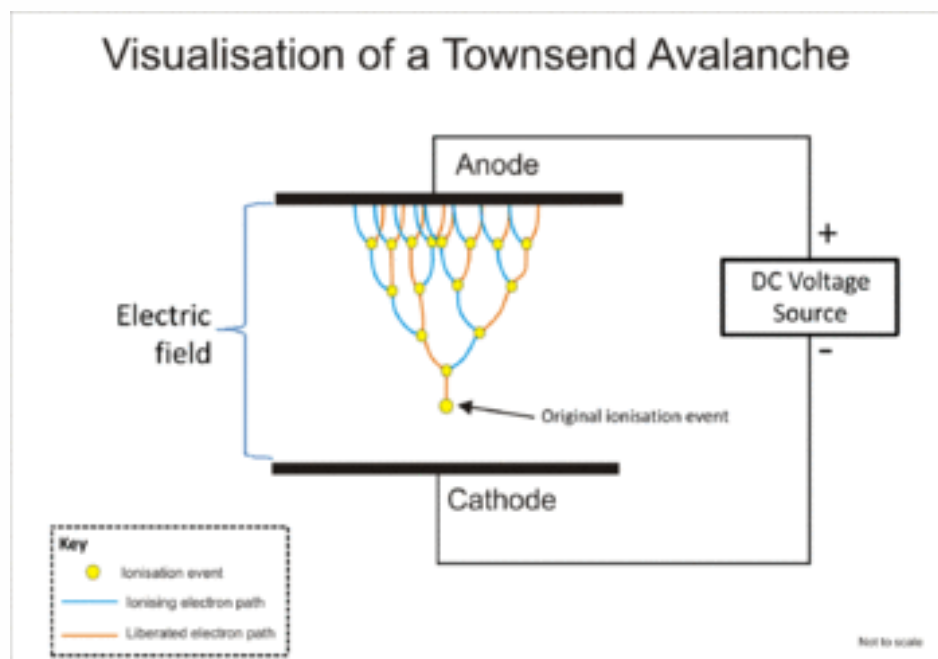
6.5.9 Zenerův (tunelový) jev

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**.



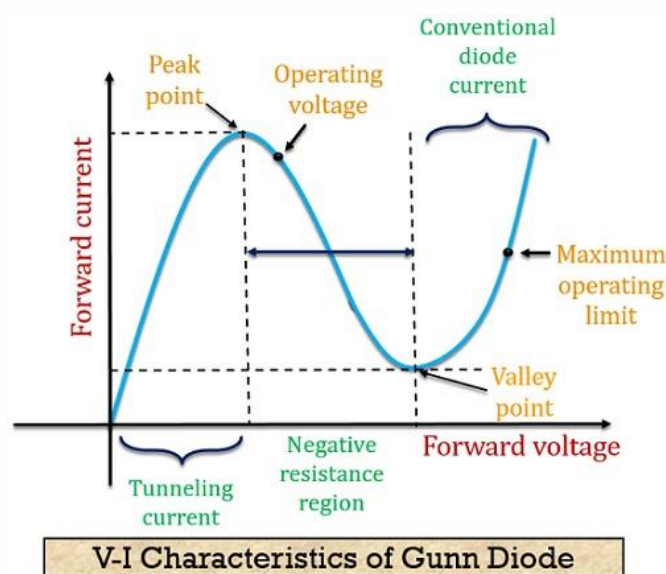
6.5.10 Lavinový jev

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).



6.5.11 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).



Electronics Desk

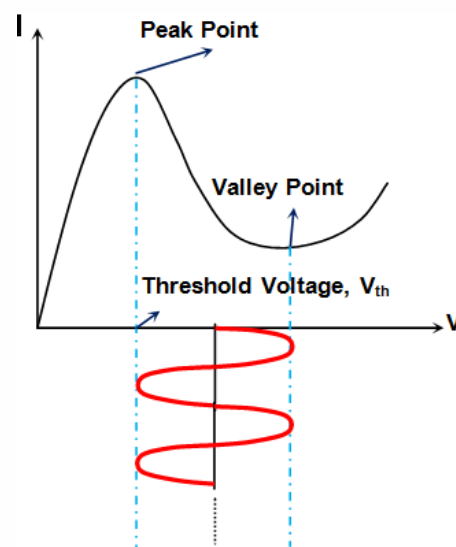
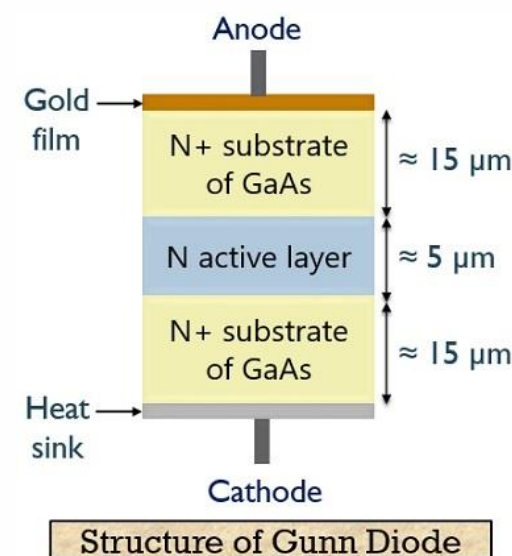


Figure 1 Gunn Diode Oscillations



Electronics Desk

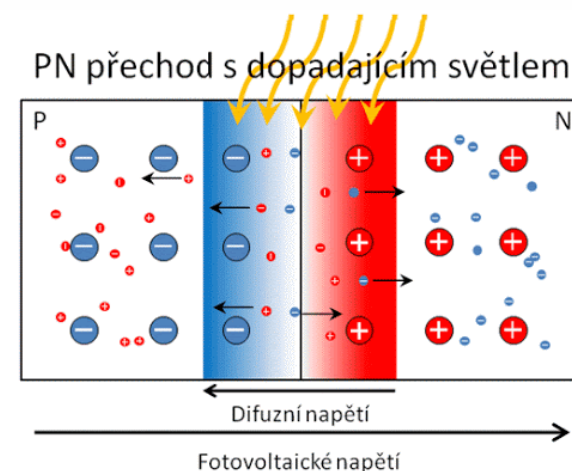
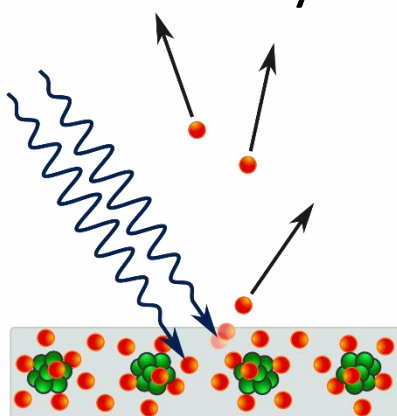
6.5.12 Fotoelektrický jev

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.

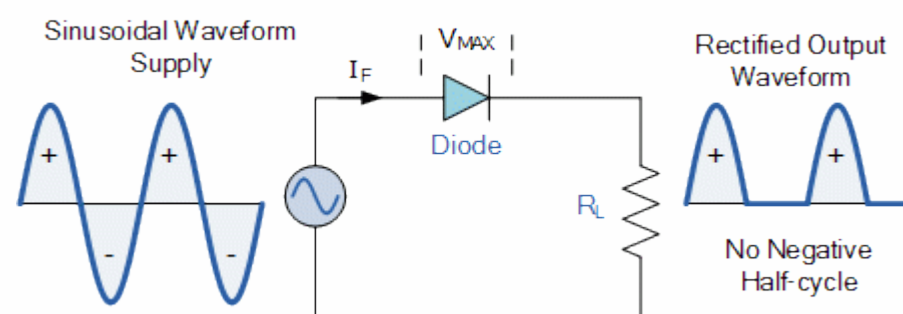
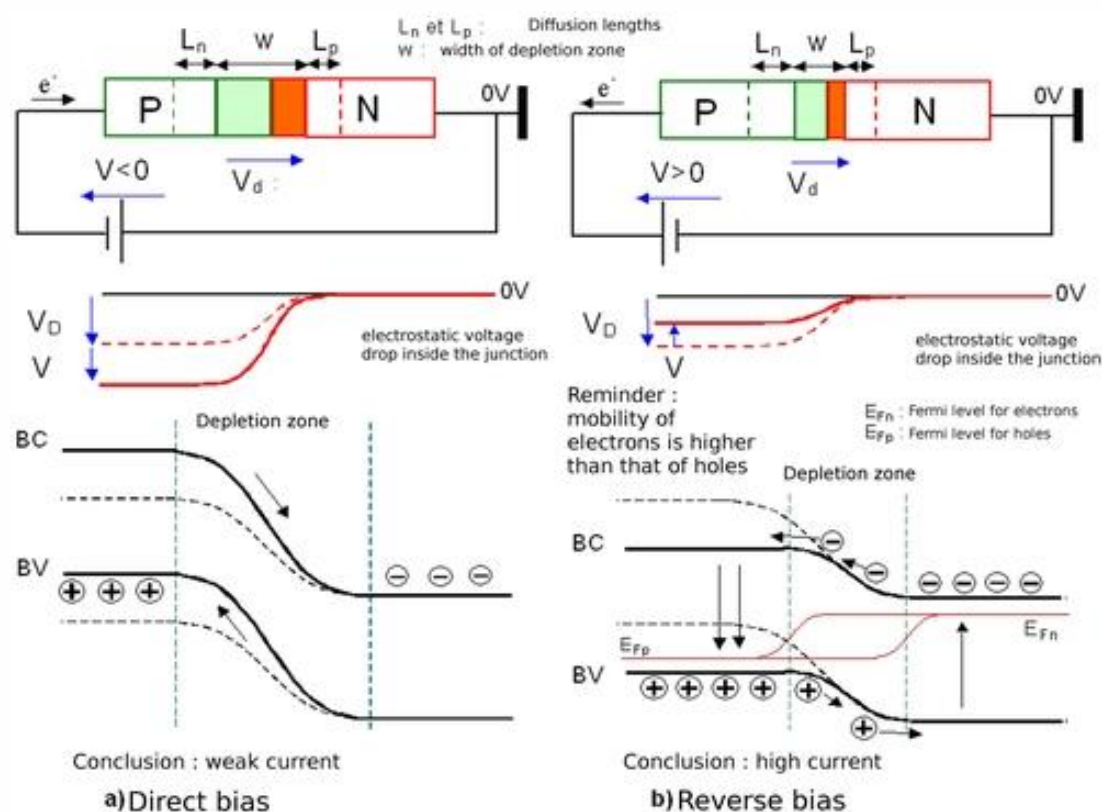
Využití v elektrotechnice:
fotorezistory, fotodiody



6.5.13 Usměrňovací jev

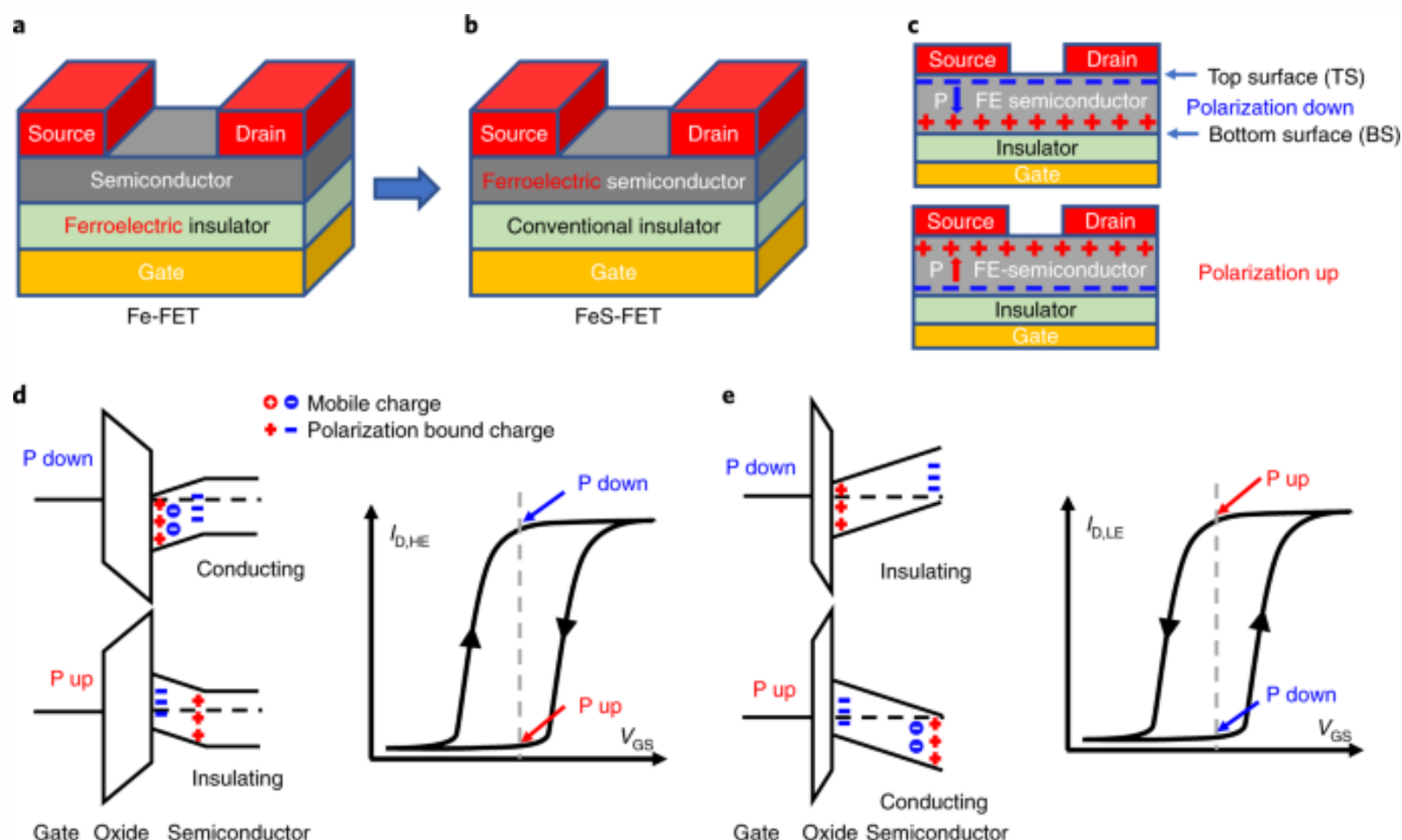
Princip usměrňovacího jevu spočívá v tom, že přes přechod PN přechází proud pouze v jednom směru. Je zřejmé, že záleží na polaritě vnějšího připojeného napětí.

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



6.5.14 Paměťový jev

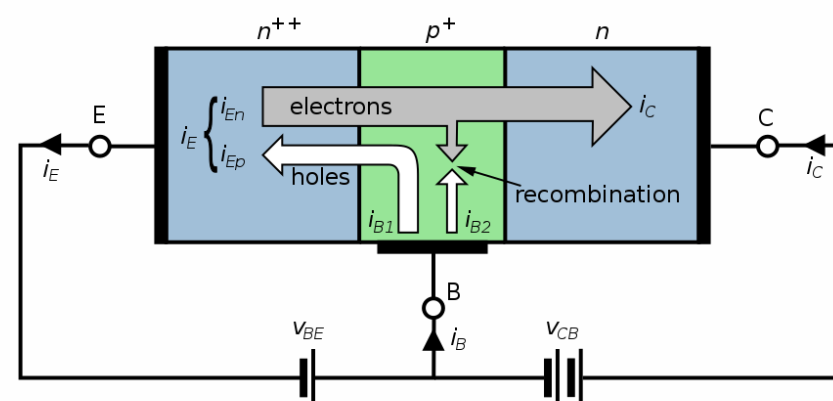
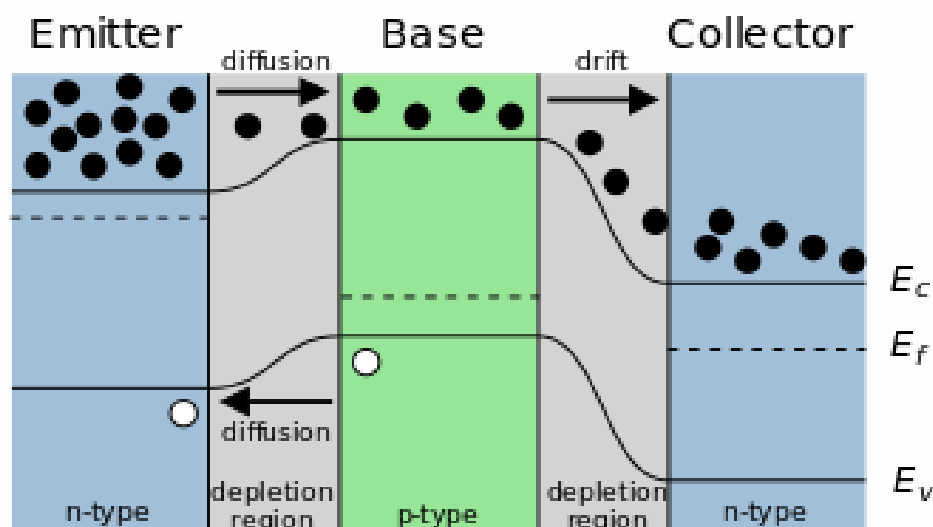
Paměťový jev je založen na změně odporu amorfního polovodiče (o 4 až 7 řádů) při překročení určitého napětí nebo při osvětlení.



6.5.15 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

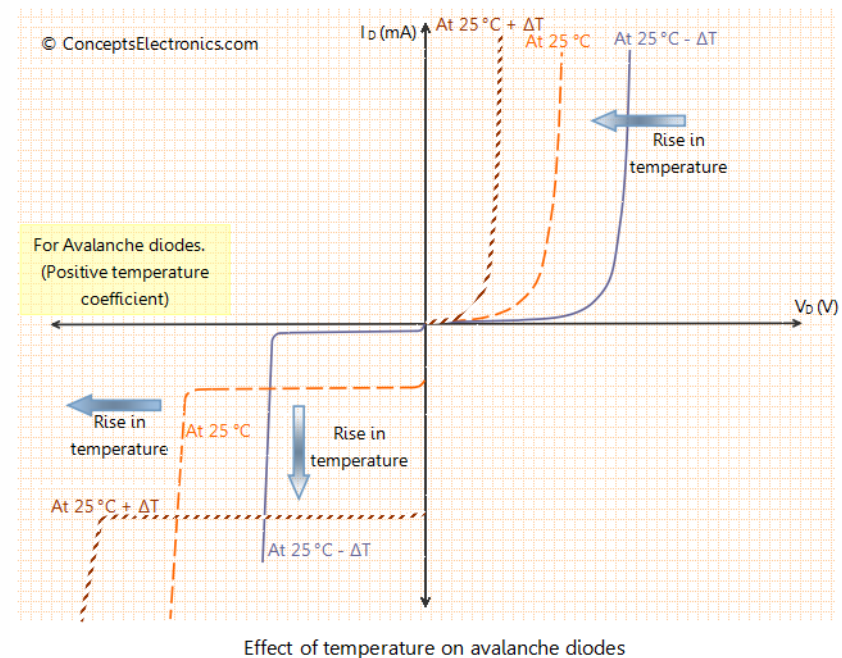
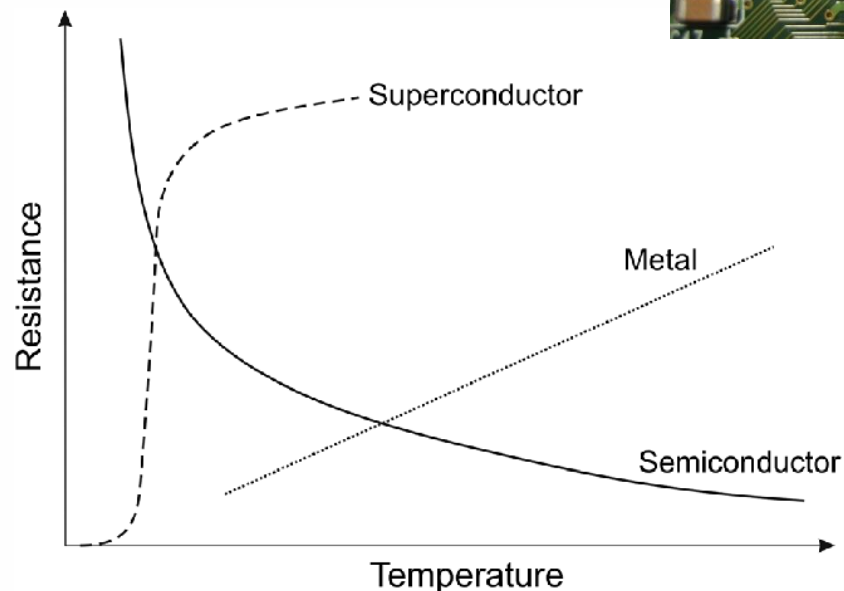


6.6 Vliv vnějších činitelů na polovodiče

6.6.1 Vliv teploty

Vodivost polovodičů závisí na **koncentraci**, na **pohyblivosti nositelů náboje** a na **teplotě**. Maximální teploty použitelné pro elektronické součástky na bázi:

- Ge – 85 °C
- Si – 150 °C
- GaAs – 400 °C
- GaP – 650 °C



6.6.2 Vliv elektrického pole

V **silných elektrických polích** 10^4 až 10^5 V/cm dochází k **nárůstu vodivosti** polovodičů v důsledku procesu nárazové ionizace – vznik páru elektron-díra.

6.6.3 Vliv magnetického pole

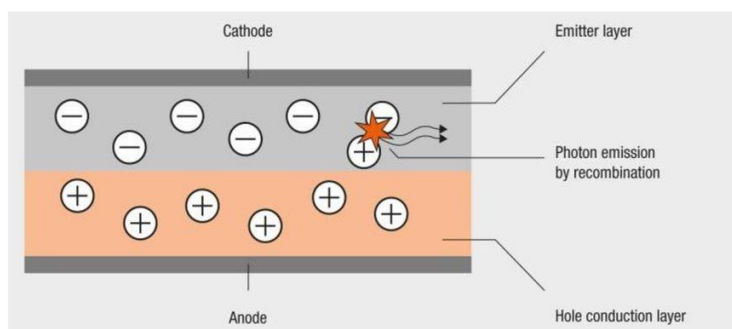
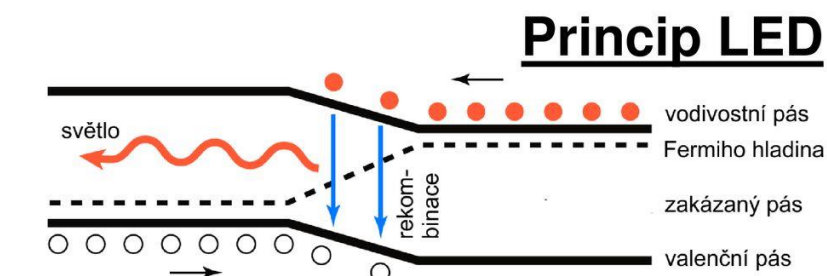
Vlivem magnetického pole dochází ke vzniku **galvano-magnetického jevu** nebo **termo-magnetického jevu**. Důsledkem těchto jevů je **Hallův jev**.



6.6.4 Vliv elektromagnetického záření

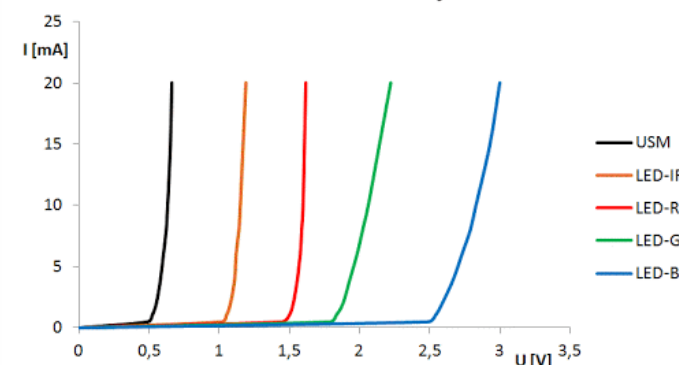
Jedná se hlavně o **fotoelektrickou vodivost** (fotovodivost), tj. **pohlcování a uvolňování záření** (luminiscenční jevy).

- **Fotovodivost** – změna elektrické vodivosti materiálu působením elektromagnetického záření. Závisí na vlnové délce elektromagnetického záření. Aplikace: fotorezistor, fotodiody
- **Luminiscence** – světlo netepelného původu, vyvolané generací elektro-
děrových dvojic v příslušném materiálu a jejich následnou rekombinací.
Aplikace: LED, laserové diody



Barva	Vlnová délka	Polovodičový materiál	Úbytek napětí
Infračervená	$> 760 \text{ nm}$	GaAs; $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$	1,6 V
Červená	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs; $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$; (GaP)	1,8 - 2,1 V
Oranžová	$590 < \lambda < 610$	$\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{P}$; $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{P}$; GaP	2,2 V
Žlutá	$570 < \lambda < 590$	GaAsP; AlGaInP; GaP	2,4 V
Zelená	$500 < \lambda < 570$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; GaN; GaP; $(\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{P}$	2,6 V
Modrá	$450 < \lambda < 500$	ZnSe; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; SiC	3,0 - 3,5 V
Fialová	$400 < \lambda < 450$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	3,0 - 3,5 V
Ultrafialová	$\lambda < 400 \text{ nm}$	diamant (235 nm); BN (215 nm); $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; AlN (210 nm)	3,5 V

A-V charakteristiky diod



$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Kontrolní otázky

- Co je to polovodič?
- Co znamená kovalentní vazba?
- Co je a jak vypadá pásový model polovodiče?
- Jak se rozdělují polovodičové materiály?
- Vyjmenujte elementární polovodičové prvky?
- Jaké znáte sloučeninové polovodiče?
- Co znamená vlastní a nevlastní polovodič?
- Jaký je rozdíl mezi polovodičem typu N a P?
- Co jsou oxidické polovodiče?
- Co jsou amorfní polovodiče?
- Jaká je podmínka pro vznik organických polovodičových materiálů?
- Vysvětlete vznik PN přechodu.
- Jak se chová PN přechod po přiložení vnějšího napětí?
- Vysvětlete Hallův jev.



Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi Seebeckovým jevem a Peltierovým jevem?
- Jaký je rozdíl mezi tunelovým a lavinovým jevem v polovodičích?
- Vysvětlete piezoelektrický jev.
- Vysvětlete Gunnův jev.
- Vysvětlete fotoelektrický jev.
- Co je pohyblivost nosičů a na čem závisí?
- Co je to generace a rekombinace nosičů?
- Co je to vyčerpaná oblast a na čem závisí její šířka?
- Co je to difuzní napětí?
- Jaké jsou výhody a nevýhody germaniových a křemíkových polovodičových součástek?
- Jaký vliv má na polovodiče teplota?
- Jaký vliv má na polovodiče elektromagnetické záření?
- Definujte požadavky na polovodičové materiály.

