

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

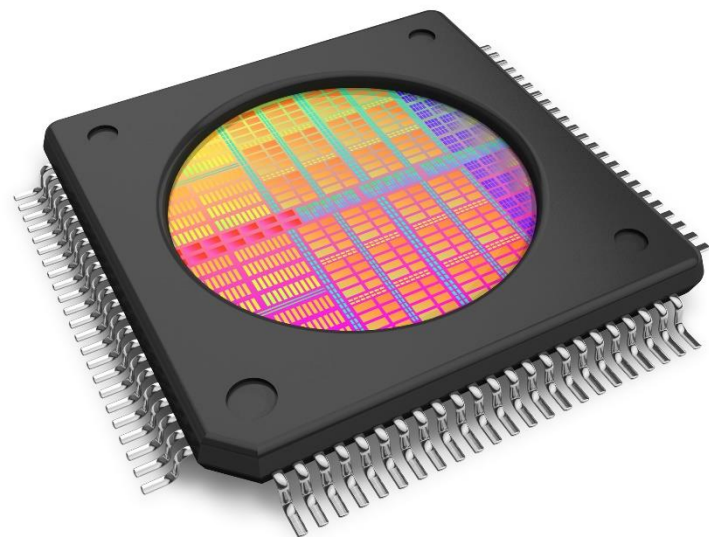
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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***



***Parametry a vlastnosti
polovodičových materiálů***

Přednáška 2



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?

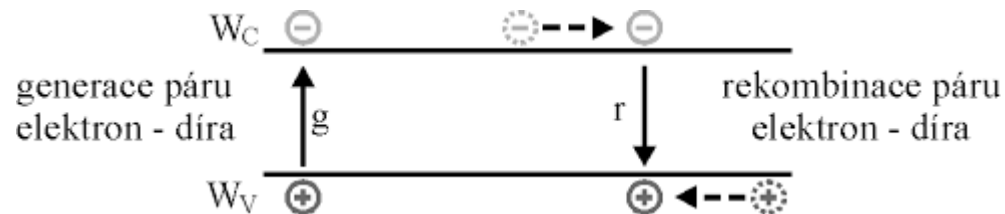
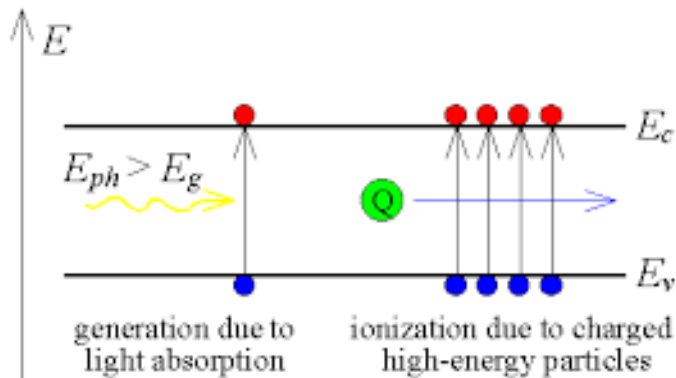
- DOZVÍTE SE, CO JE FERMIHO HLADINA A NA ČEM ZÁVISÍ.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU TEPLOTNÍ VLASTNOSTI POLOVODIČŮ.
- ZJISTÍTE, ČÍM JE ZPŮSOBEN A NA ČEM ZÁVISÍ PROUD V POLOVODIČÍCH.
- DOZVÍTE SE, CO OVLIVŇUJE POHYBLIVOST NOSIČŮ V POLOVODIČÍCH.
- ZJISTÍTE, JAKÉ JSOU MECHANIZMY PRO GENERACI A REKOMBINACI NOSIČŮ.
- DOZVÍTE SE, JAKÝM ZPŮSOBEM OVLIVŇUJE VLASTNOSTI POLOVODIČE ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ.
- ZJISTÍTE, JAK DOBRÝMI TEPELNÝMI VODIČI JSOU POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY.

Generace a rekombinace nosičů

Generace

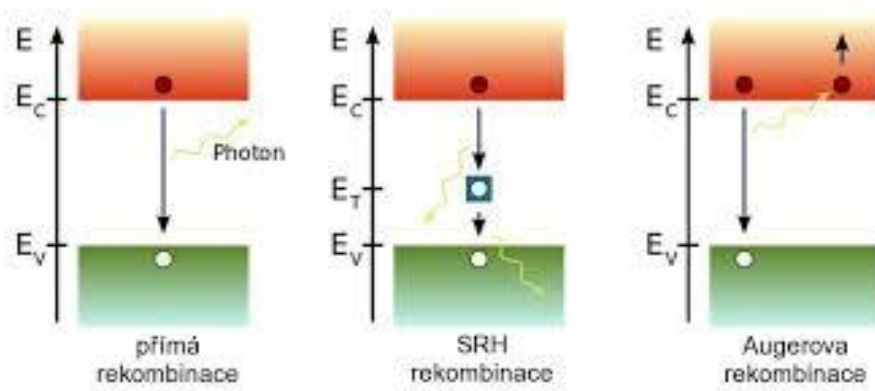
- **Vytvoření páru elektron-díra**
- Při narušení rovnováhy nosičů působením excitačního mechanismu
- **Nutné dodání energie**
- **Mechanismy generace nosičů**
 - Tepelná generace
 - Nárazová ionizace (lavinový jev)
 - Vnitřní fotoefekt (dodání světelné energie)
 - Ionizace elektrickým polem (Zenerův jev)

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$



Rekombinace

- Uvedení zpět do rovnovážného stavu po excitaci nerovnovážných nosičů
- **Zánik páru elektron-díra**
- Přejchod elektronu na nižší energetickou hladinu – **ztráta energie**
- **Mechanismy rekombinace nosičů**
 - Tepelná – emise fononů
 - Světelná – emise fotonů
- Pravděpodobnost rekombinace roste s koncentrací nosičů
- **Přímá rekombinace** – přechod elektronu přímo do valenčního pásu
- **Nepřímá rekombinace (Shockley-Read-Hall (SRH))** – přes rekombinační centrum
- **Augerova rekombinace** – předání energie třetímu elektronu



$$\lambda = \frac{hc}{E_g}$$

Doba života nosičů

Čas, za který dochází k uvedení nosičů zpět do rovnovážného stavu po excitaci nerovnovážných nosičů, tzn. časový interval mezi generací a rekombinací nosičů.

Složena z:

- času pro generaci
- času rekombinace

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_t N_t}$$

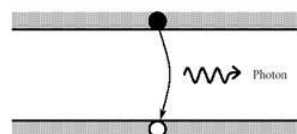
$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_t N_t}$$

τ_n – doba života elektronů v typu P
 τ_p – doba života elektronů v typu n
 v_t – tepelná rychlost
 N_t – koncentrace rekombinačního centra

**Rekombinace
nerovnovážných nosičů**

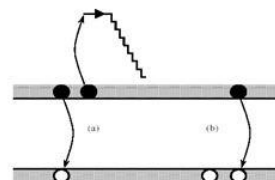
$$\left(\frac{d\Delta n}{dt} \right)_{rec} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$

τ je doba života
nerovnovážných nosičů



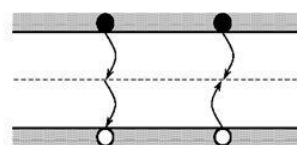
zářivá rekombinace

$$\tau_r = \frac{1}{C_r N}$$



Augerova rekombinace

$$\tau_A = \frac{1}{C_{An} N_D^2}$$



rekombinace pomocí lokálních center

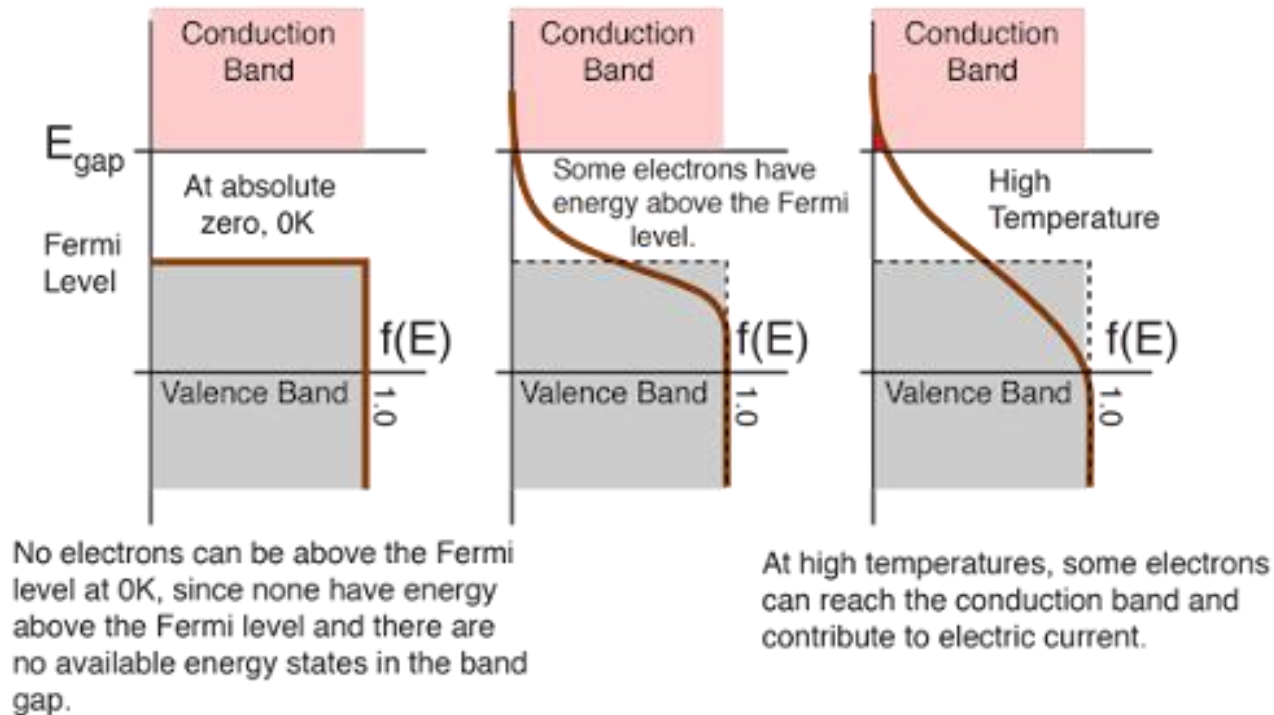
$$\tau_t = \frac{1}{C_t N_t}$$

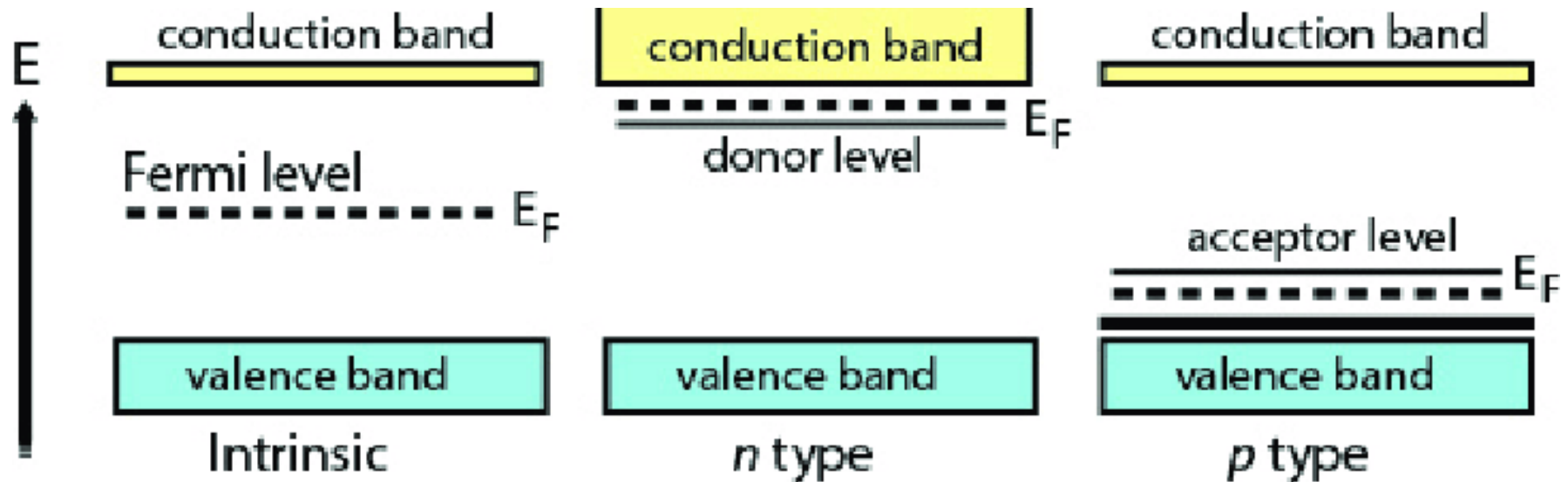
Výsledná doba života nosičů

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_t}$$

Fermiho hladina

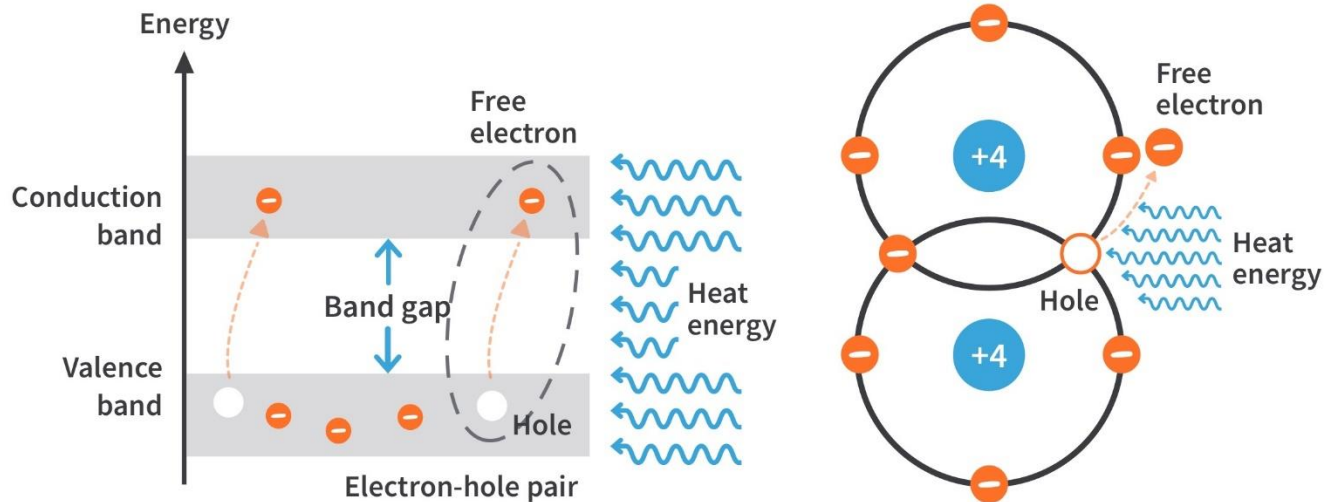
Fermiho energetická hladina je jednou z charakteristik pevných látek. Pro nulovou teplotu $T=0$ K je Fermiho energie nejvyšší obsazenou hladinou a všechny pod ní jsou zaplněny s jistotou. Pro vyšší teploty je Fermiho energie interpretovatelná jako hladina s pravděpodobností obsazení 50 %.





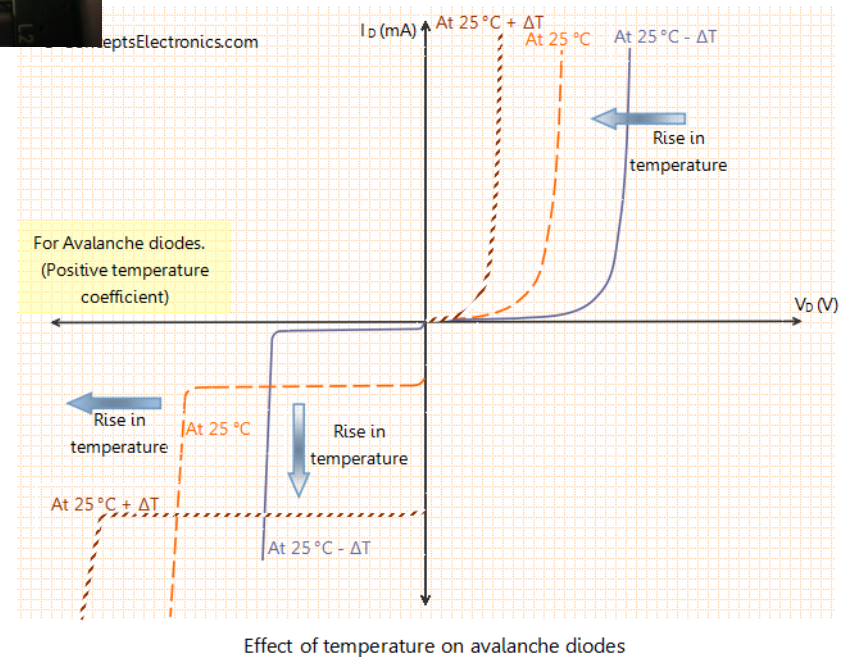
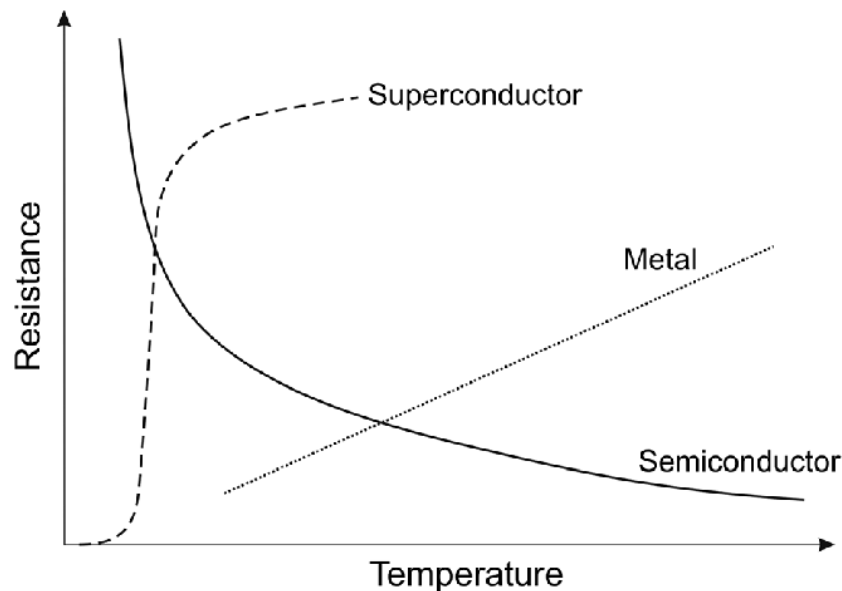
Teplotní vlastnosti polovodičů

U polovodičových materiálů se podobně jako u kovových využívá **teplotní závislosti odporu na teplotě**. Na rozdíl od kovů je ale princip vodivosti polovodičů odlišný. **Při teplotě absolutní nuly jsou všechny elektrony pevně vázány ke svým jádrům a materiál nemůže vést proud.** Elektronům je třeba **dodat určitou energii** k tomu, aby „přeskočily“ přes zakázaný pás do pásu vodivostního a mohly se účastnit **vedení proudu**. S rostoucí teplotou koncentrace nosičů náboje roste a elektrický odpor materiálu se snižuje.



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

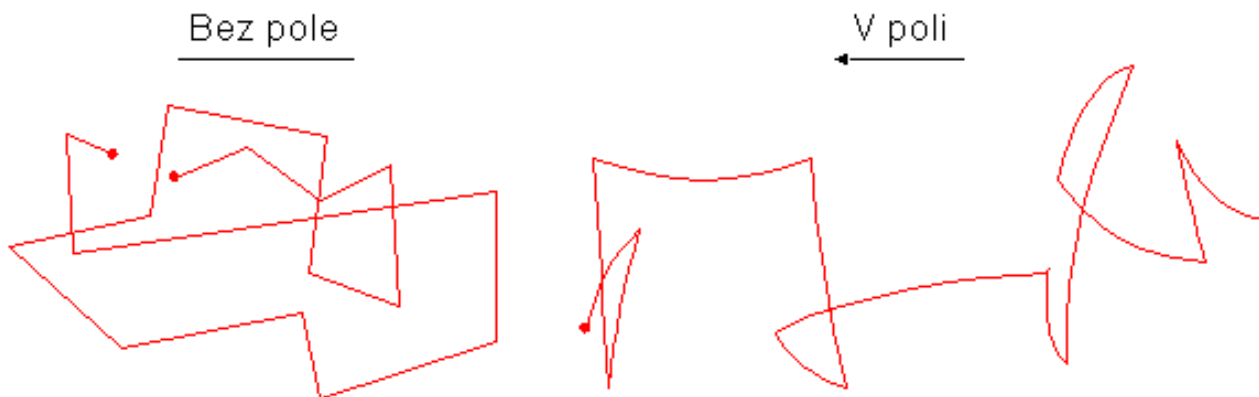
- Ge – 85 °C
- Si – 150 °C
- GaAs – 400 °C
- GaP – 650 °C



Elektrická vodivost polovodičů

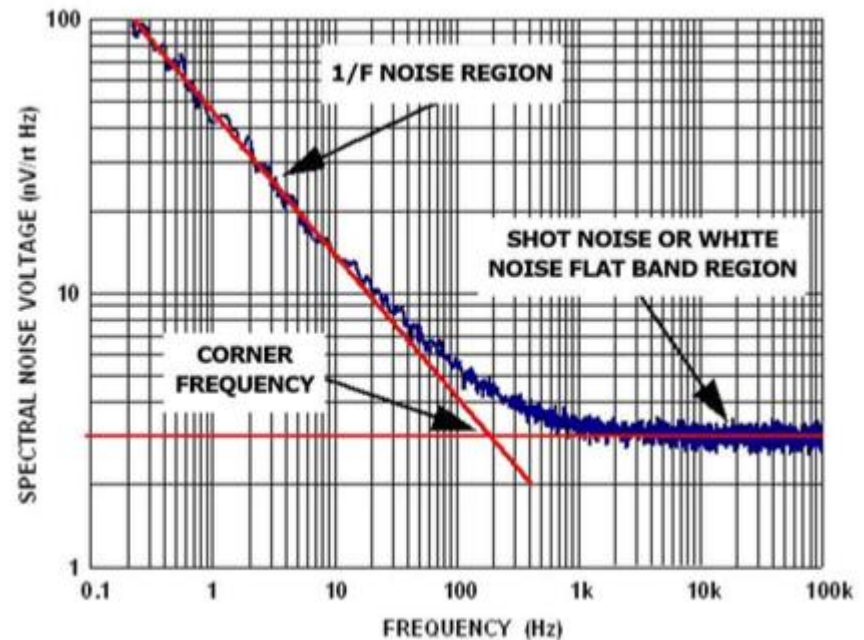
Předpokladem vodivosti polovodičů je, že ve vodivostním pásu je dostatečná koncentrace volných elektronů. V polovodiči bez přiloženého vnějšího el. pole mají elektrony podle vztahu $v_p = (8 kT/\pi m)^{1/2}$ hodnotu rychlosti v řádu 10^5 m/s.

Polovodičem ovšem neteče elektrický proud, přestože je rychlost elektronů vysoká. Uvedenou rychlostí se elektron nepohybuje dlouhou dobu, neboť za střední volnou dráhu cca 10^{-8} m interaguje s "různými objekty" v krystalické mřížce, jako jsou atomy, fotony, fonony a ostatní elektrony. To má za následek, že směr jeho dráhy se změní. Elektron se tedy pohybuje zcela náhodnými směry.



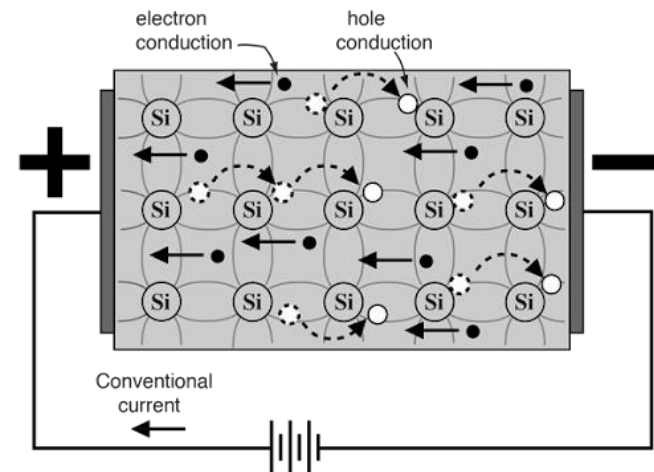
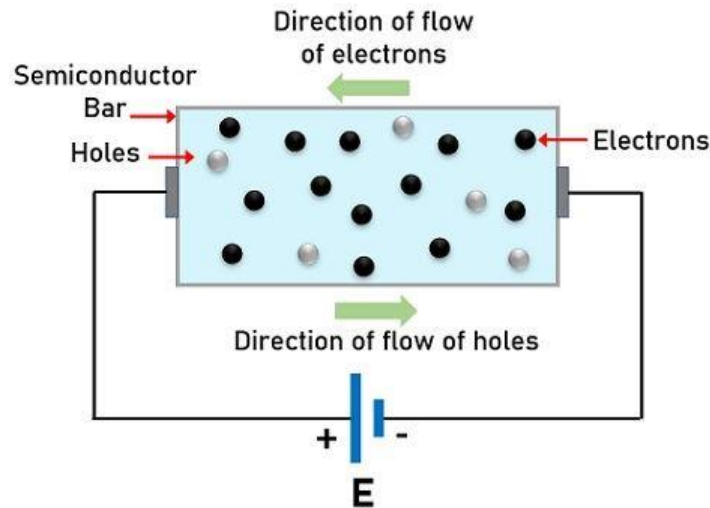
Celkový střední elektrický proud proteklý určitým makroskopickým průřezem polovodiče za určitou dobu **je roven nule**. Po připojení polovodiče k citlivému osciloskopu, na kterém máme možnost sledovat i rychlé změny napětí, lze změřit malé střídavé napětí, jehož efektivní hodnota roste úměrně s teplotou, odporem vodiče a šířkou frekvenčního pásma přístroje Δf , kterým toto napětí sledujeme. Toto napětí, způsobené právě tepelným pohybem elektronů, nazýváme **teplotní** nebo **Nyquistův šum**.

$$u_{ef} = 4kTR\Delta f$$



Driftový proud

Umístíme-li **polovodič do elektrického pole**, elektron zachovává svůj tepelný pohyb, ale jeho **střední rychlost již není rovna nule**, ale **směřuje ve směru přiloženého elektrického pole**. Této střední rychlosti se říká **driftová rychlost** a fyzikálnímu efektu drift elektronů v elektrickém poli. Díky **různé krystalové struktuře materiálů se liší pohyblivost elektronů** a tím se liší i **vodivost**.



$$v_d = \mu E$$

Driftová rychlost nosičů

$$j = \sigma E$$

Ohmův zákon v
diferenciálním tvaru

$$j = en v_d$$

Proudová hustota

$$\sigma = en \mu$$

Vodivost polovodiče

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

Pohyblivost nosičů

Pohyblivost μ je důležitá kvantita, která dává **do souvislosti driftovou rychlost nosičů v a elektrické pole E** , kterému jsou tyto nosiče vystaveny.

Pohyb nosičů v polovodiči je narušen kolizemi s krystalovou mřížkou, příměsemi a defekty a pohyb nosiče mezi dvěma body není přímočarý. Pro snadnější představitelnost byla zavedena pohyblivost, která zahrnuje mechanismy kolizí nosičů, které mohou být způsobeny:

- atomovou mřížkou materiálu
- ionizovanými nečistotami
- kolizí nosič-nosič
- neutrálními nečistotami
- intenzitou elektrického pole

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

$$\mu_n > \mu_p \quad \mu \dots [m^2 / Vs]$$

Často si vystačíme pouze s tabulkovou hodnotou $\mu_{n,p300}$, udávanou pro daný materiál při teplotě 300K, avšak **při tvorbě věrného modelu polovodičové struktury je formulace pohyblivosti nosičů klíčová**, protože podchycuje fyzikální jevy, které mají zásadní vliv na vlastnosti polovodičových prvků.

Driftová pohyblivost μ_{drift} je číselně rovna driftové rychlosti v jednotkovém elektrickém poli. **Pohyblivost nosičů nábojů je určena charakterem rozptylu elektronů (na kmitech, nečistotách, defektech mříže apod.) U polovodičů se uplatňuje především rozptyl na kmitech mříže (μ) a rozptyl na iontových nečistotách (μ_i).** Výsledná pohyblivost může být přibližně vyjádřena vztahem:

$$\frac{1}{\mu_{\text{drift}}} = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_i}$$

Pohyblivost μ odpovídá rozptylu nosičů na tepelných kmitech mříže, závisí na teplotě podle vztahu:

$$\mu \approx T^{\frac{3}{2}}$$

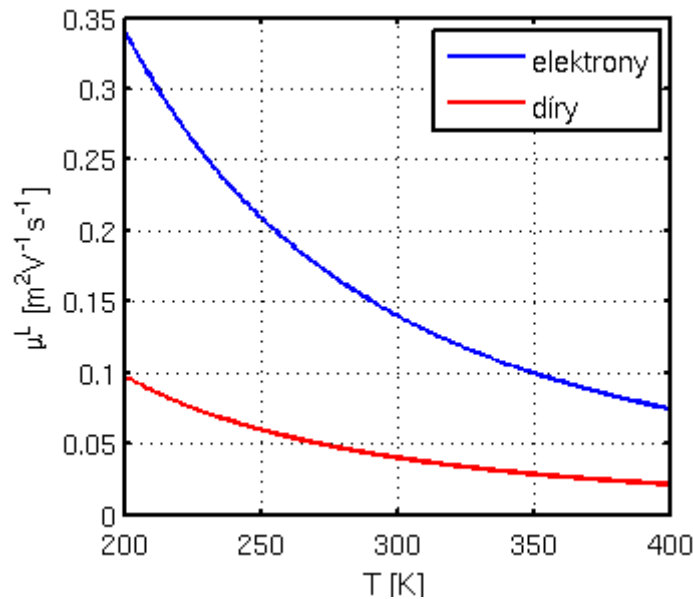
Výhody vysoké pohyblivosti:

- **Vyšší proud polovodičových součástek**
- **Vyšší mezní frekvence polovodičových součástek**

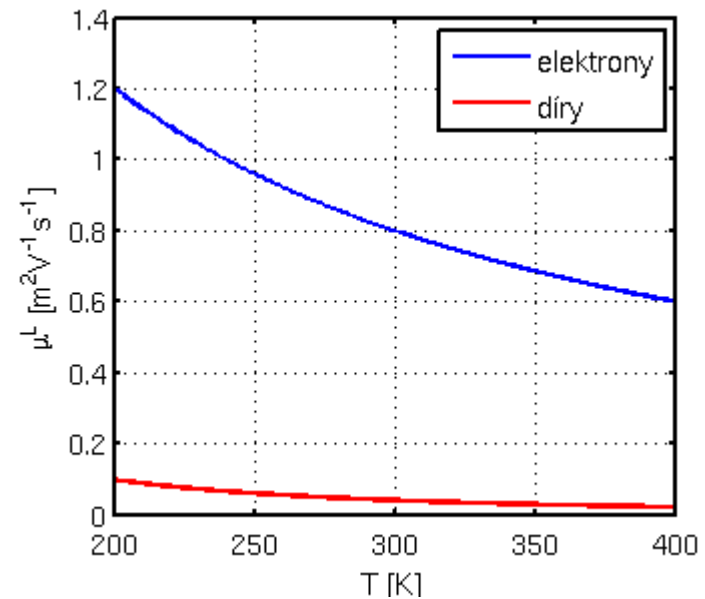
Závislost pohyblivosti nosičů na teplotě

Jedním ze základních mechanismů ovlivňující kolize jsou vibrace atomů v mřížce čistého krystalu polovodiče. Intenzita těchto vibrací je úměrná teplotě mřížky.

Krystal Si



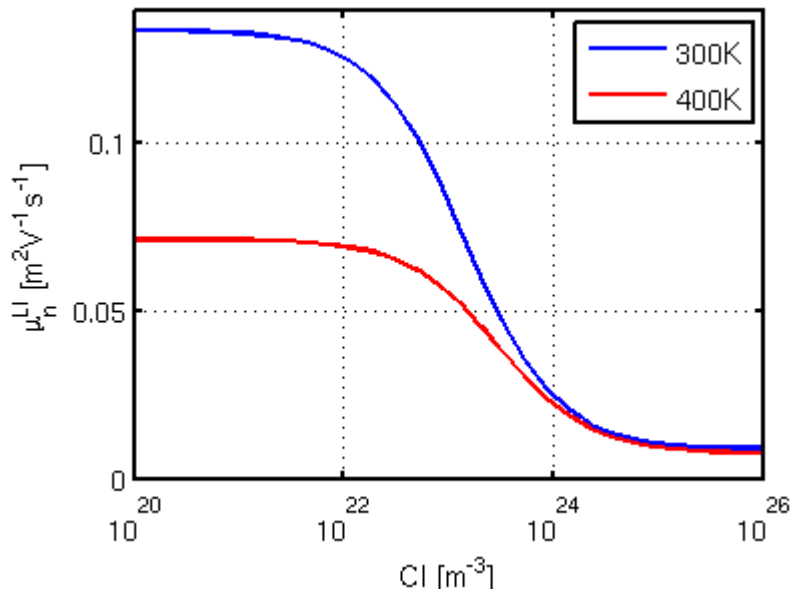
Krystal GaAs



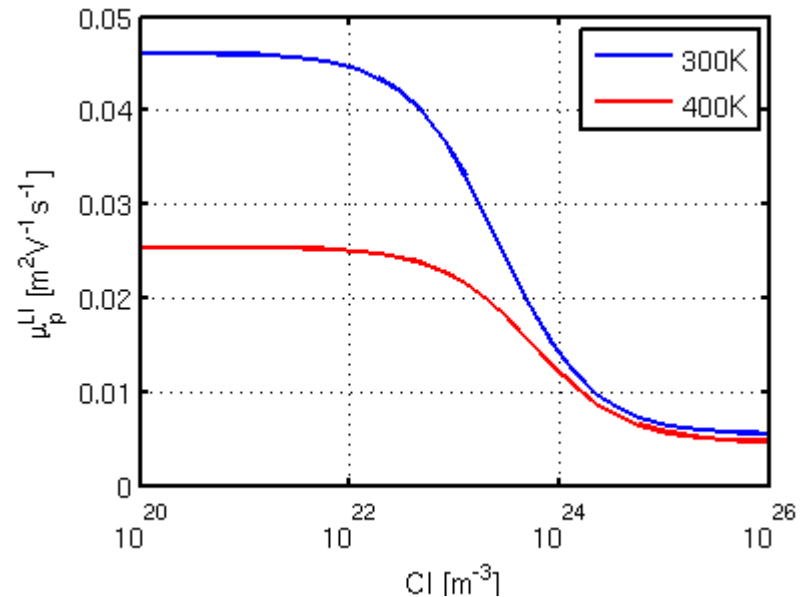
Závislost pohyblivosti nosičů na koncentraci ionizovaných příměsí

Ionizované příměši představují především příměši donorů a akceptorů. Vztahy popisující vliv jejich koncentrace na pohyblivost nosičů jsou definovány pomocí tzv. celkové koncentrace ionizovaných příměsí C_I .

Pohyblivost nosičů náboje v Si v závislosti na koncentraci příměsí při teplotách 300 K a 400 K



Pohyblivost elektronů



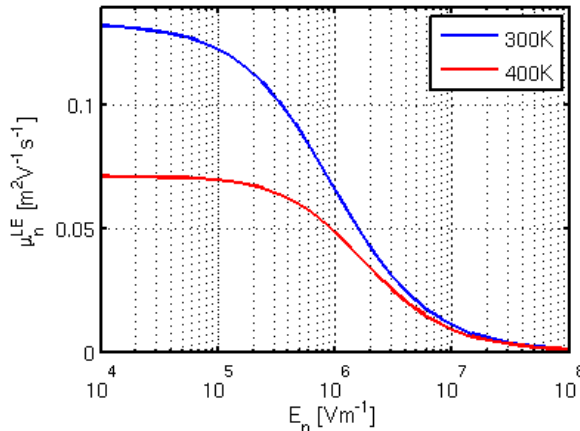
Pohyblivost děr

Závislost pohyblivosti nosičů na intenzitě elektrického pole

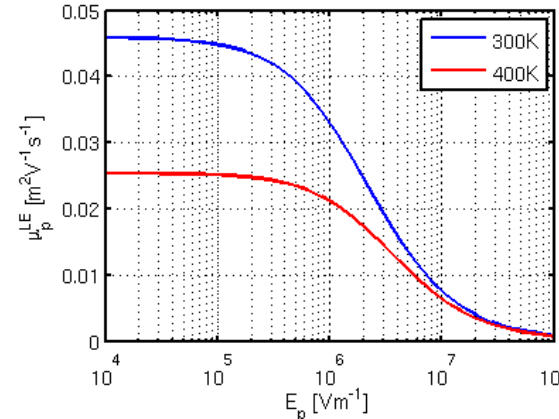
Dalším významný jev jehož důsledkem je změna pohyblivostí nosičů je saturace jejich driftové rychlosti při vysokých intenzitách elektrického pole.

Pohyblivost nosičů náboje v Si v závislosti na velikosti intenzity elektrického pole při teplotách 300 K a 400 K

Pohyblivost elektronů

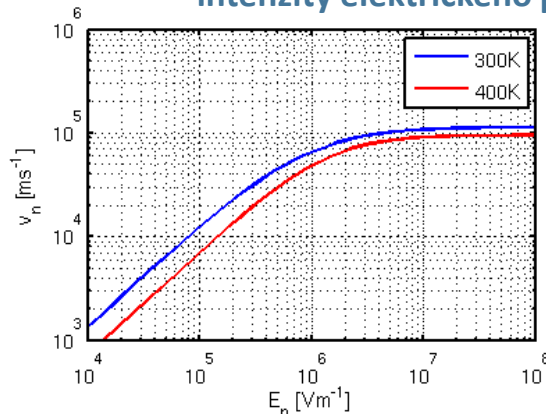


Pohyblivost děr

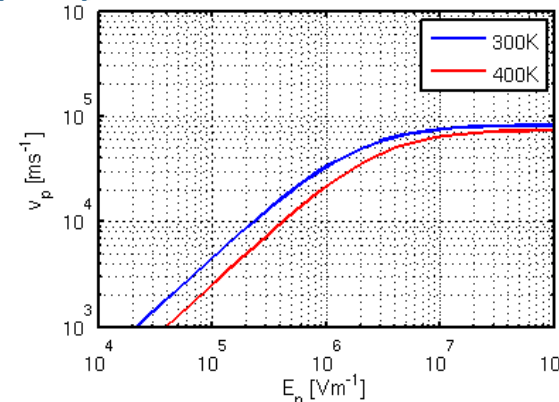


Driftová rychlost nosičů náboje v Si v závislosti na velikosti intenzity elektrického pole při teplotách 300 K a 400 K

Driftová rychlost elektronů

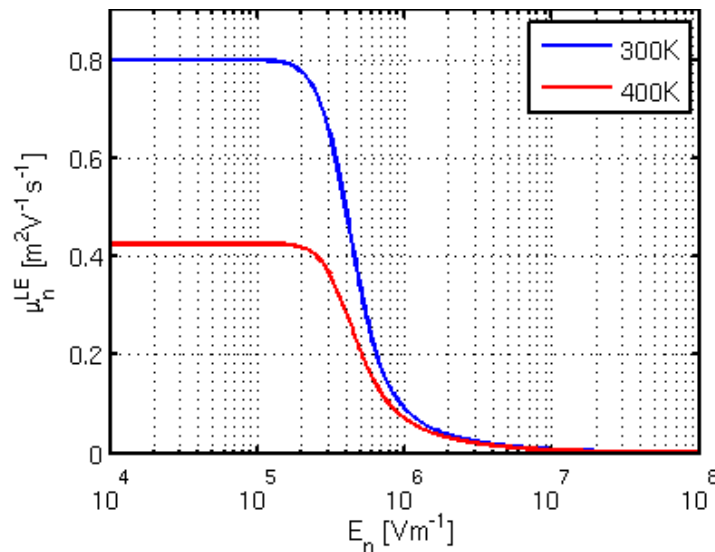


Driftová rychlost děr

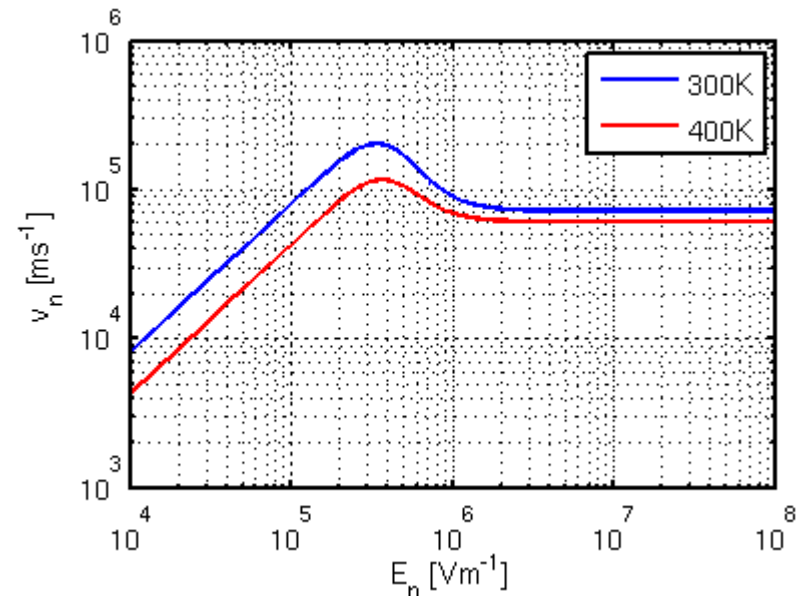


Závislost pohyblivosti nosičů na intenzitě elektrického pole

Pohyblivost a driftová rychlost elektronů v GaAs v závislosti na velikosti intenzity elektrického pole při teplotách 300K a 400K



Pohyblivost elektronů



Driftová rychlost elektronů

Difuzní proud

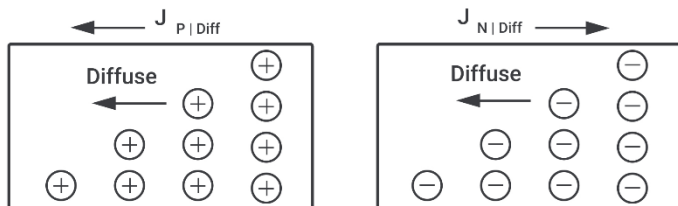
Difúze – částice migrují z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nízkou koncentrací dokud není koncentrace v celém objemu konstantní.

Koncentrační gradient je pro elektrony i díry shodný $\rightarrow$ elektrony i díry difundují ve směru $-x \rightarrow$ **difúzní tok**

Výsledný difúzní proud dán „rozdílem“ difuzního proudu elektronu a děr.

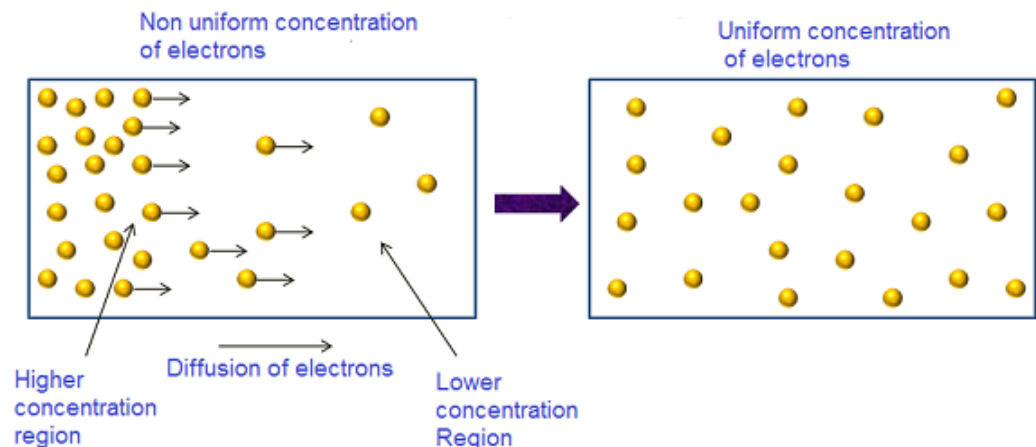
D_n a D_p [m^2/s] – difuzní konstanty

$$j_{dif} = e(D_n \nabla n - D_p \nabla p)$$



$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p$$

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n$$



Difúzní délka

Difúzní délka **udává střední vzdálenost, do níž se částice přemístí difúzí za dobu odpovídající jejich době života**. Doba života udává časový interval od vzniku nosiče ionizací po jeho zánik rekombinací.

Difúzní délka elektronů a děr:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

L_n je difúzní délka elektronu

L_p je difúzní délka díry

τ_n je doba života elektronů

τ_p je doba života děr

D je difúzní konstanta – charakterizuje rychlost difúze
(samovolného přemísťování částic)

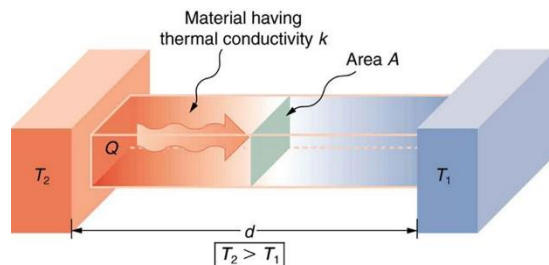
Tepelná vodivost polovodičů

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí.

Tepelná vodivost daného materiálu je **charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ** . Součinitel tepelné vodivosti bývá často chybně označován přímo jako tepelná vodivost, **součinitel je však měrná tepelná vodivost**.

Převrácená hodnota součinitele tepelné vodivosti určuje **měrný tepelný odpor R_{th}** .

$$\lambda = \frac{Qd}{tS\Delta T} \quad \left(\frac{W}{mK} \right)$$



Q je množství tepla, které za čas **t** projde mezi dvěma shodnými plochami obsahu **S** kolmými ke směru toku a vzájemně posunutými v tomto směru o vzdálenost **d** , je-li mezi nimi rozdíl teplot **ΔT** .

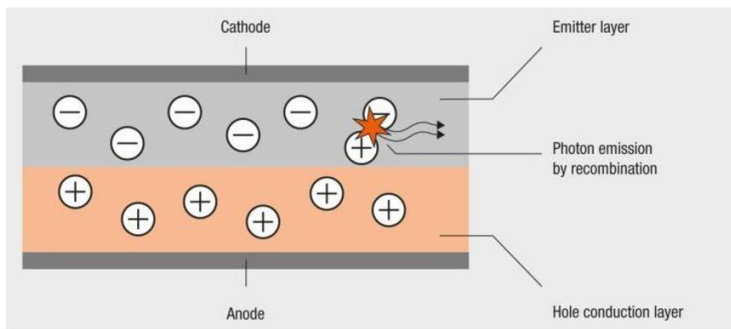
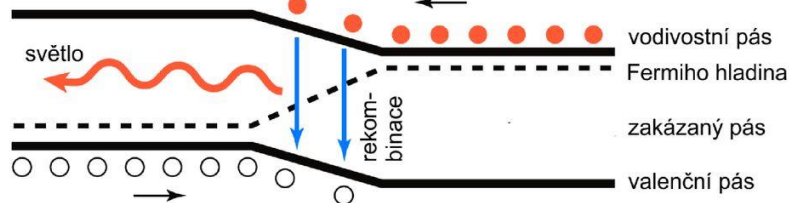
	k (W/m.K)
Copper	390
Gold	296
Aluminum	200
Silicon	118
Solder	50
Mold Compound	0.68
Substrate Dielectric	0.2
Still Air	0.025

Elektromagnetické 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.
- **Luminiscence** – světlo netepelného původu, vyvolané generací elektro-děrových dvojic v příslušném materiálu a jejich následnou rekombinací.

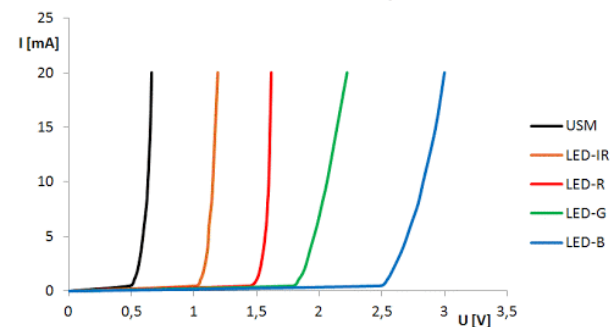
Princip LED



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

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

A-V charakteristiky diod



Kontrolní otázky

- Vysvětlete princip generace a jednotlivé způsoby rekombinace nosičů v polovodiči.
- Co je doba života nosičů?
- Co je Fermiho hladina a na čem závisí její poloha v zakázaném pásu?
- Jakým způsobem se mění elektrické vlastnosti polovodičů vlivem teploty?
- Za jakých podmínek začne polovodičem protékat proud?
- Vysvětlete, jak vzniká v polovodiči Nyquistův šum.
- Na čem závisí pohyblivost nosičů v polovodiči?
- Vysvětlete princip driftového a difuzního proudu.
- Co je difuzní délka nosičů?
- Vysvětlete tepelnou vodivost polovodičů.
- Jaký je rozdíl mezi fotovodivostí a luminiscencí?

