

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

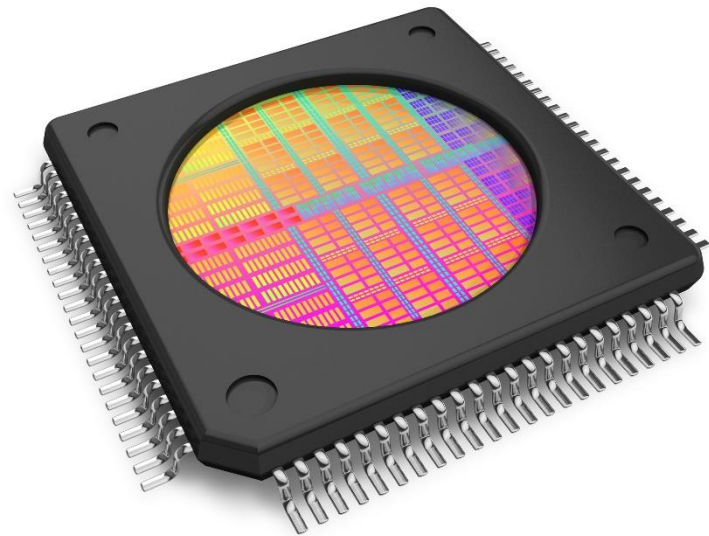
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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

**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Polovodičové materiály a technologie KET/PMAT



Cvičení 4



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

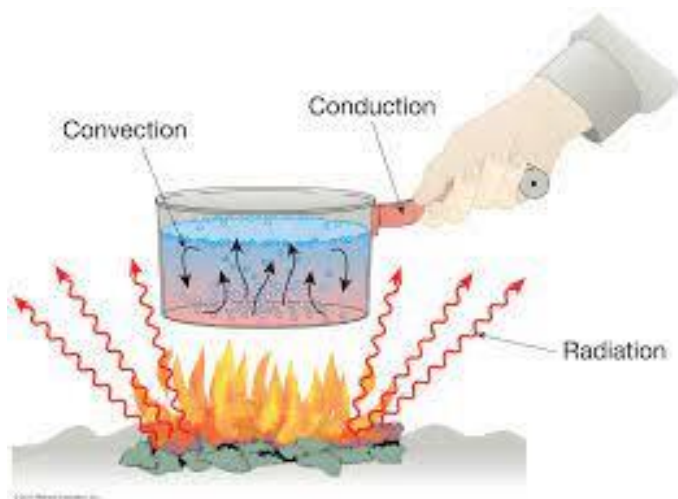
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Chlazení polovodičových struktur

Výpočty chlazení vychází ze **ztrátového výkonu**, který vzniká v systému polovodičové součástky (PN přechod diody, stabilizační diody, bipolárního nebo unipolárního tranzistoru, v systému integrovaného obvodu). **Vzniklé teplo se musí ze systému odvést do pouzdra, ze kterého se přes vhodnou styčnou plochu převádí do chladiče.** Chladič musí být navržen tak, aby veškerý výkon vyzářil do okolního prostoru. Pomocí odváděného výkonu a rozdílu teplot je definován tepelný odpor.

Přenos tepla

- Vedení
- Proudění
- Záření



$$R_{\vartheta} = \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{P} = \frac{\Delta\vartheta}{P}$$

ϑ_a [K (°C)] – teplota okolí

ϑ_m [K (°C)] – teplota tělesa

P [W] – odváděný výkon

R_{ϑ} [K/W (°C/W)] – tepelný odpor

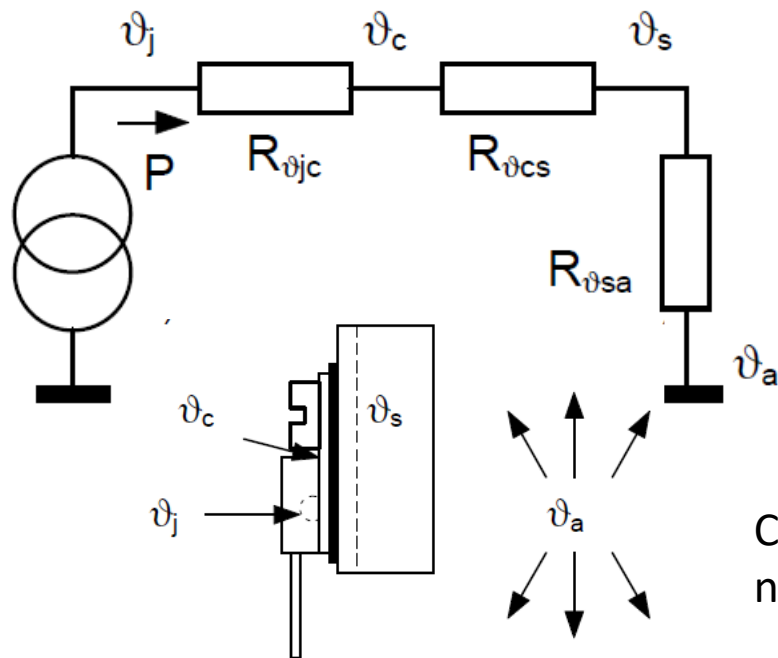
Způsoby chlazení

- Přirozené chlazení
- Chlazení nuceným oběhem vzduchu
- Chlazení nuceným oběhem kapaliny
- Termoelektrické chlazení

<https://www.youtube.com/watch?v=LC5o2jC3yaw>

Chlazení polovodičových struktur

Pro běžné výpočty se předpokládá, že jsme schopni charakterizovat každý z prvků systému (polovodičový přechod, pouzdro, styčná plocha, chladič) zjednodušeným způsobem. Používáme **analogie s elektrickými obvody** tím, že uvažujeme jako náhradní lineární prvky tepelné odpory jednotlivých úseků. Zdrojem tepelného toku je ztrátový výkon, který na tepelném odporu vyvolá rozdíl teplot. Přičtením všech rozdílů teplot k teplotě okolí dostaneme předpokládanou teplotu přechodu při zatížení daným výkonem.



ϑ_a [K (°C)] – teplota okolí

ϑ_j [K (°C)] – teplota PN přechodu

ϑ_c [K (°C)] – teplota pouzdra

ϑ_s [K (°C)] – teplota chladiče

$R_{\theta_{jc}}$ [K/W (°C/W)] – tepelný odpor vnitřní

$R_{\theta_{cs}}$ [K/W (°C/W)] – tepelný odpor styku chladiče

$R_{\theta_{sa}}$ [K/W (°C/W)] – tepelný odpor chladiče

Chladič musí být navržen tak, aby byla splněna následující rovnice:

$$R_{\theta} \geq R_{\theta_{jc}} + R_{\theta_{cs}} + R_{\theta_{sa}}$$

Příklad 1

Navrhňte chladič pro tranzistor BD135, který pracuje jako výkonový prvek sériového stabilizátoru se vstupním napětím $U_1 = 12 \text{ V}$ a výstupním napětím $U_2 = 5 \text{ V}$, odebíraný proud 0 až 0,5 A. Omezení proudu při zkratu je na 0,7 A. Teplotu okolí uvažujte 45°C . Povrch pouzdra a chladiče je potřen silikonovou vazelínou s tepelným odporem $R_{\theta_{cs}} = 6 \text{ K/W}$.

Katalogové hodnoty tranzistoru

Maximální proud kolektoru

$$I_{Cmax} = 1,5 \text{ A}$$

Maximální ztrátový výkon

$$P_{tot} = 8 \text{ W (při teplotě pouzdra max. } 70^\circ\text{C)}$$

Teplota polovodičového přechodu

$$\vartheta_{jmax} = 150^\circ\text{C}$$

Maximální tepelný odpor bez chladiče

$$R_{\theta ja} = 110 \text{ K/W}$$

Vnitřní tepelný odpor

$$R_{\theta ja} = 10 \text{ K/W}$$

Příklad 1 - řešení

Navrhněte chladič pro tranzistor BD135, který pracuje jako výkonový prvek sériového stabilizátoru se vstupním napětím $U_1 = 12\text{ V}$ a výstupním napětím $U_2 = 5\text{ V}$, odebíraný proud 0 až 0,5 A. Omezení proudu při zkratu je na 0,7 A. Teplotu okolí uvažujte 45°C . Povrch pouzdra a chladiče je potřen silikonovou vazelínou s tepelným odporem $R_{\theta cs} = 6\text{ K/W}$.

Ztrátový výkon v normálním režimu:

$$P_z = (U_1 - U_2) \cdot I_2 = (12 - 5) \cdot 0,5 = 3,5\text{ W}$$

Celkový tepelný odpor:

$$R_{\theta} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_a}{P_z} = \frac{150 - 45}{3,5} = 30\text{ K/W}$$

Tepelný odpor chladiče:

$$R_{\theta sa} = R_{\theta} - R_{\theta jc} - R_{\theta cs} = 30 - 10 - 6 = 14\text{ K/W}$$

Z katalogového listu vybereme chladič s tepelným odporem 10,5 K/W. Výsledný tepelný odpor pak bude 26,5 K/W.

Příklad 2

Na základě parametrů a výpočtů z Příkladu 1 zjistěte teplotu polovodičového přechodu a chladiče v normálním pracovním režimu.

Příklad 2 - řešení

Na základě parametrů a výpočtů z Příkladu 1 zjistěte teplotu polovodičového přechodu a chladiče v normálním pracovním režimu.

$$\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja}P = 45 + 26,5 \cdot 3,5 = 137,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta_c = \vartheta_a + R_{\vartheta sa}P = 45 + 10,5 \cdot 3,5 = 81,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Teplota přechodu bude 137,8 °C a teplota povrchu chladiče 81,8 °C. Bezpečnostní rozdíl mezi maximální teplotou polovodičového přechodu a teplotou polovodičového přechodu v nastaveném pracovním režimu je cca 12°C. Doporučuje se však bezpečnostní rozdíl alespoň 20°C. Teplota chladiče je tedy značně velká a je nutné zvolit chladič s nižším tepelným odporem.

Zvolíme-li chladič s tepelným odporem 6 K/W, bude bezpečnostní rozdíl teploty 28 °C.

Příklad 3

Na základě parametrů a výpočtů z Příkladu 1 a 2 zkontrolujte teplotu polovodičového přechodu při zkratu na výstupu a teplotě okolí 25°C.

Příklad 3 - řešení

Na základě parametrů a výpočtů z Příkladu 1 a 2 zkontrolujte teplotu polovodičového přechodu při zkratu na výstupu a teplotě okolí 25°C.

Ztrátový výkon při zkratu: $P_k = U_1 I_2 = 12 \cdot 0,7 = 8,4 \text{ W}$

Teplota polovodičového přechodu při zkratu:

$$\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja} P_k = 25 + 22 \cdot 8,4 = 209,8 \text{ °C}$$

Teplota přechodu při trvalém zkratu překročí povolenou teplotu přechodu a tranzistor se zničí. Při teplotě 25°C bude při normálním zatížení teplota přechodu 102°C. Vnitřní časová konstanta pouzdra je podstatně menší, proto při zvýšení ztrátového výkonu o 4,9 W stoupne teplota přechodu velmi rychle o 49°C a překročí teplotu povolenou. Ke zničení dojde v krátkém čase.

Řešení: použít jiný tranzistor s vyšší teplotou polovodičového přechodu nebo zmenšit celkový tepelný odpor (tepelný odpor styku, tepelný odpor chladiče).

Příklad 4

Podle katalogu je chladič vyroben z Al plechu síly 2,5 mm, plocha chladiče je cca 35 cm². Stanovte, za jakou dobu dosáhne teplota ustáleného stavu. Hustota hliníku je $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ a měrná tepelná kapacita hliníku je $c = 895 \text{ J/kg.K}$.

Příklad 4 - řešení

Podle katalogu je chladič vyroben z Al plechu síly $t = 2,5 \text{ mm}$, plocha chladiče je cca $S = 35 \text{ cm}^2$. Stanovte, za jakou dobu dosáhne teplota ustáleného stavu. Hustota hliníku je $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ a měrná tepelná kapacita hliníku je $c = 895 \text{ J/kg.K}$.

Objem chladiče: $V = S \cdot t = 35 \cdot 0,25 = 8,75 \text{ cm}^3$

Hmotnost chladiče: $m = \rho \cdot V = 2,7 \cdot 8,75 = 24 \text{ g}$

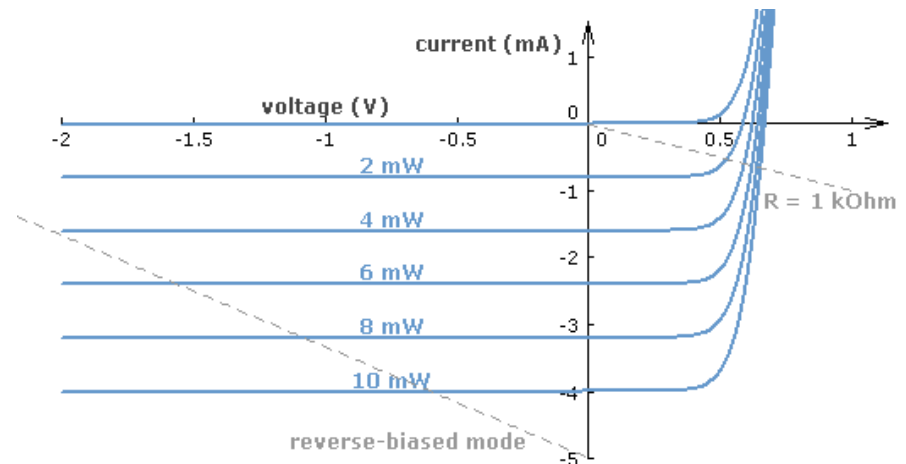
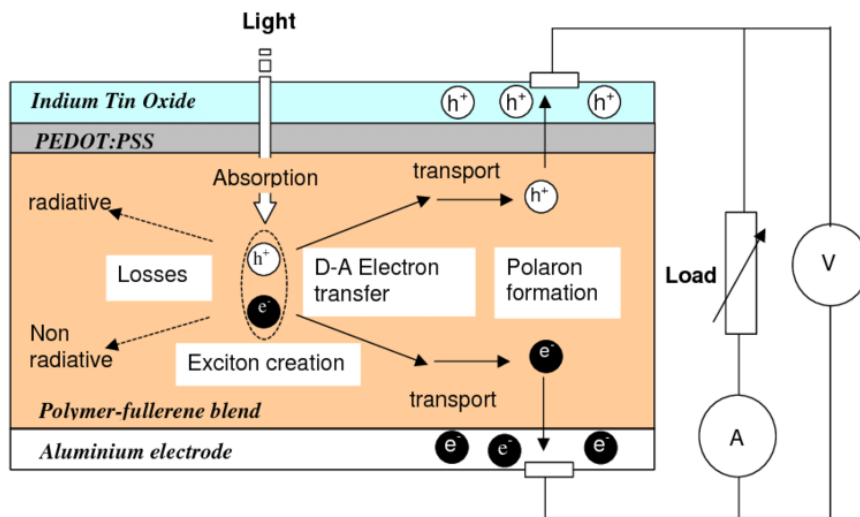
Tepelná kapacita: $C_g = c \cdot m = 895 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 21,4 \text{ J/K}$

Časová konstanta: $\tau_g = C_g R_g = 128,4 \text{ s} \cong 2 \text{ min}$

Ustálený stav je dosažen po 3 - 5 τ_g , teplotu můžeme brát jako ustálenou za 6 - 10 min.

Optoelektronika

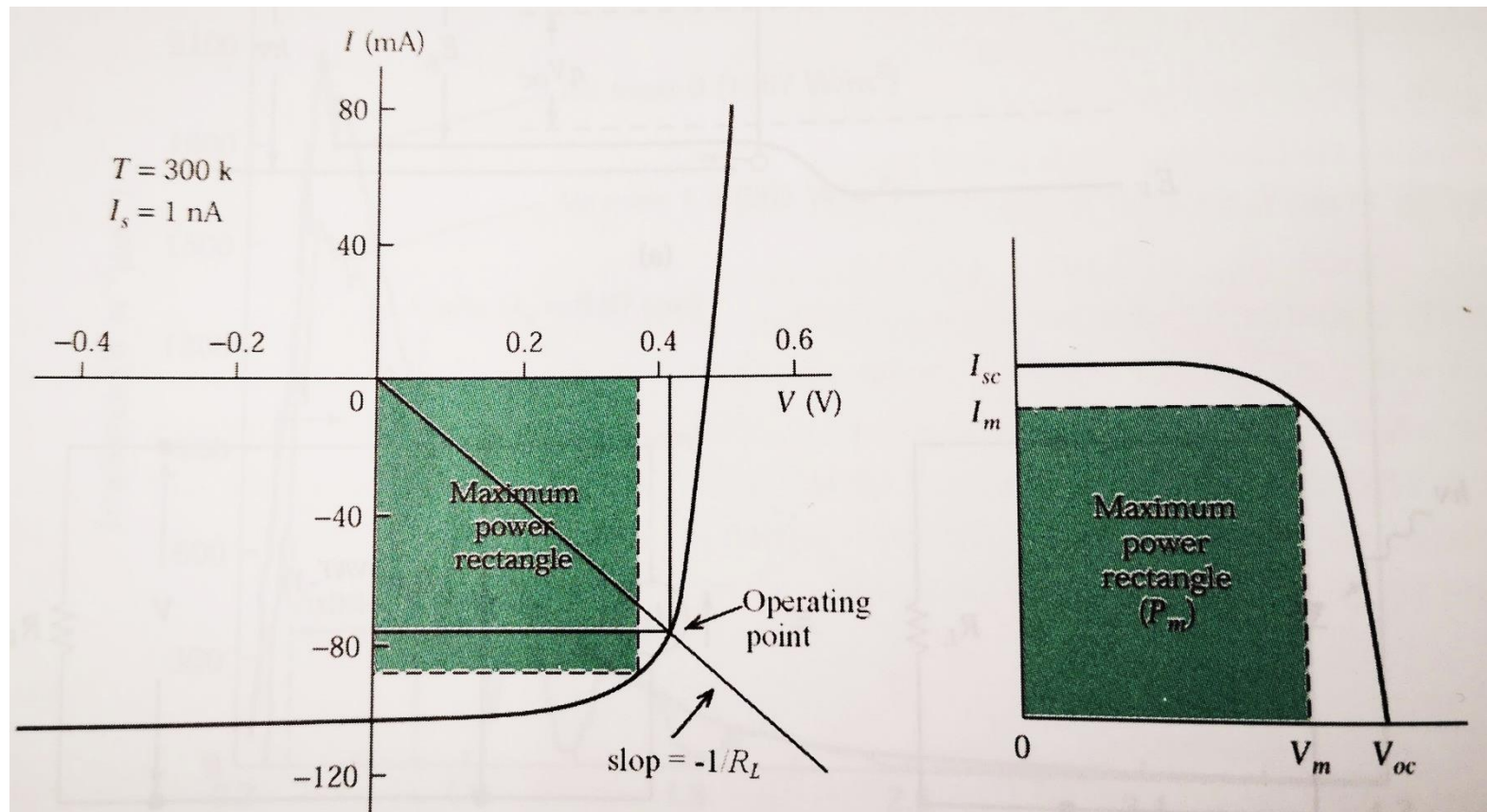
- **Opto-elektronické součástky** – přeměna světelné energie na el. energii (solární články, fotodiody, fotorezistory, fototranzistory)
- **Elektro-optické součástky** – přeměna el. energie na světelnou energii (LED, laserové diody)



https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw

Příklad 5

Určete napětí naprázdno a výstupní výkon pro napětí 0,35 V solárního článku, jehož V-A charakteristika je uvedena na obrázku. Teplota 300 K, $I_s = 1 \text{ nA}$.



Příklad 5 - řešení

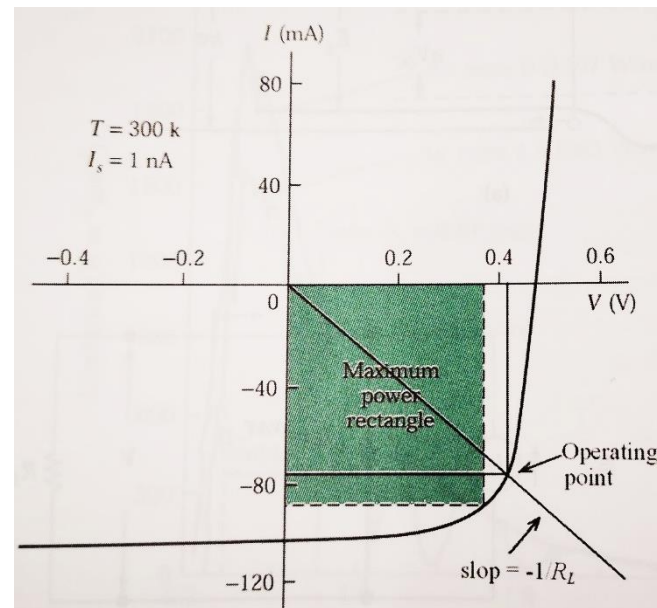
Určete napětí naprázdno a výstupní výkon pro napětí 0,35 V solárního článku při teplotě 300 K, jehož V-A charakteristika je uvedena na obrázku. Teplota 300 K, $I_s = 1$ nA.

Napětí naprázdno:

$$V_O = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_S} + 1 \right) \cong \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_S} \right) \quad V_O = 0,026 \cdot \ln \left(\frac{100 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9}} \right) = 0,48 \text{ V}$$

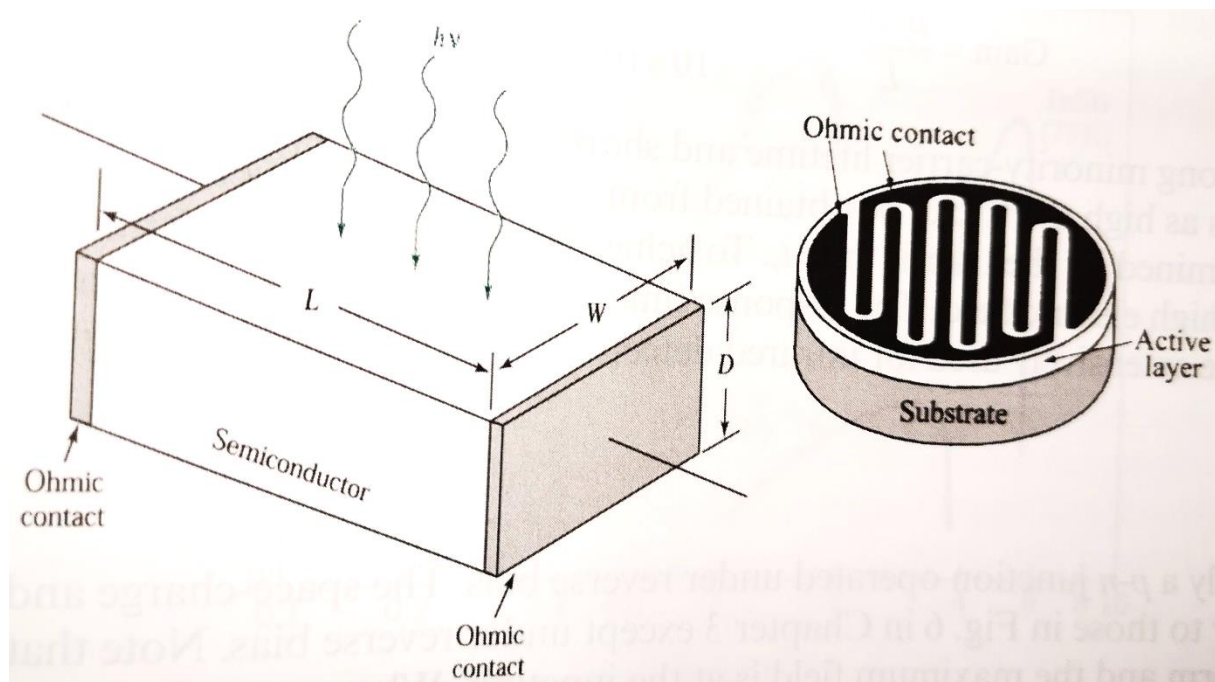
Výstupní výkon pro napětí 0,35 V:

$$P = UI = U \left(I_S \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_L \right)$$
$$P = 0,35 \cdot \left(-1 \cdot 10^{-9} \left(e^{\frac{0,35}{0,026}} - 1 \right) - (-0,1) \right) =$$
$$= 3,48 \cdot 10^{-2} \text{ W}$$



Příklad 6

Určete proud protékající fotorezistorem a fotoelektrický zisk, jestliže na povrch dopadá $5 \cdot 10^{12}$ fotonů/s a účinnost fotorezistoru je 0,8. Doba života nosičů je 0,5 ns, pohyblivost nosičů $\mu_n = 2500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Fotorezistor je připojen do obvodu s intenzitou elektrického pole $E = 5000 \text{ V/cm}$ a délka polovodičové struktury je $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$.



Příklad 6 - řešení

Určete proud protékající fotorezistorem a fotoelektrický zisk, jestliže na povrch dopadá $5 \cdot 10^{12}$ fotonů/s a účinnost fotorezistoru je 0,8. Doba života nosičů je $\tau = 0,5$ ns, pohyblivost nosičů $\mu_n = 2500$ cm²/Vs. Fotorezistor je připojen do obvodu s intenzitou elektrického pole $E = 5000$ V/cm a délka polovodičové struktury je $L = 10$ μm.

$$I_p = q \cdot \eta \cdot \text{počet dopadajících fotonů} \cdot \left(\frac{\mu_n \tau E}{L} \right)$$

$$I_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8 \cdot 5 \cdot 10^{12} \cdot \left(\frac{2500 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 5000}{10 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \right) = 4 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 4 \mu\text{A}$$

$$G = \frac{\mu_n \tau E}{L} = \frac{2500 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 5000}{10 \cdot 10^{-4}} = 6,25$$

Příklad 7

Určete modulační šířku pásma LED diody na bázi GaAs, jestliže doba života nosičů je 500 ps.

Modulační šířka pásma optických zdrojů

Frekvence napájení LED, kdy dochází k poklesu světelného výkonu o cca 70 % oproti stejnosměrnému napájení. K poklesu dochází vlivem časového zpoždění mezi injektovanými nosiči a emisí fotonů vlivem střídavého napětí. Výstupní světelný výkon je závislý na době života nosičů.

Příklad 7 - řešení

Určete modulační šířku pásma LED diody na bázi GaAs, jestliže doba života nosičů je 500 ps.

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = 318 \text{ MHz}$$

Příklad 8

Určete odrazivost polovodiče GaAs, který má index lomu $n = 3,6$.

Příklad 8 - řešení

Určete odrazivost polovodiče GaAs, který má index lomu $n = 3,6$.

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 = \left(\frac{3,6 - 1}{3,6 + 1} \right)^2 = 0,32$$

$R = 0,32 \rightarrow 32 \%$ dopadajícího světelného záření se odrazí od povrchu polovodiče.