

## Detekce optického záření

**Detekce záření - zjišťování přítomnosti optického záření v daném místě a v daném čase.**

### Parametry detektoru

- **Detektivita - vztah mezi minimálním detekovatelným výkonem  $P_{\min}$  a šířkou pásma detektoru,  $D = \frac{\sqrt{\Delta f}}{P_{\min}}$ ,  $\Delta f \approx 1/\Delta t$**
- **Konverzní účinnost - účinnost procesu konverze energie během procesu detekce**
- **Časová odezva – rychlost**
- **Spektrální charakteristika**

### Principy činnosti

- **Teplo**
- **Změna elektrické vodivosti**
- **Změna optických vlastností**

### Pyroelektrický detector

Tepelný detektor založený na pyroelektrickém jevu (vznik náboje na povrchu některých dielektrických materiálů při změně jejich teploty). Mohou být velmi rychlé (ps).

### Fotoelektrické detektory

Založeny na fotoelektrickém jevu (přeměna energie optického záření na elektrickou energii).

### Fotoelektrický jev rozlišujeme vnitřní a vnější

**Vnější** fotoelektrický jev je emise elektronů z pevných látek do vakua vyvolaná absorpcí záření. Nastává při kvantových přechodech uvnitř pevné látky. Počet uvolňovaných elektronů je dán počtem absorbovaných fotonů. Kinetická energie elektronů je dána frekvencí fotonů a nezávisí na intenzitě dopadajícího záření.

**Vnitřní** fotoelektrický jev je změna populace elektronových energetických hladin v pevné látce, ke které dochází v důsledku absorpce optického záření – výsledkem je zvýšení počtu volných nosičů náboje.

**Příklad 1.** Vypočítejte proud detektoru vyvolaný na fotodiodě svazkem z He-Ne laseru s výkonem  $1 \mu\text{W}$  za předpokladu, že každé dva fotony vyvolají vznik jednoho náboje. Jaký má být odpor zátěže, aby se napětí na něm rovnalo  $1 \text{ mV}$ ?

Výkon laseru je  $1 \mu\text{W}$ , to znamená, že za každou sekundu emituje laser záření s energií  $E_0 = 10^{-6} \text{ J}$ . Energií jednoho fotonu záření He-Ne laseru vypočítáme podle vztahu:

$$E_{\text{foton}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{633 \times 10^{-9}} = 31 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Za každou sekundu je tedy emitováno  $n$  fotonů:

$$n = \frac{E_0}{E_{\text{foton}}} = \frac{10^{-6}}{31 \times 10^{-20}} = 3.2 \times 10^{12}$$

Předpokládáme, že každé dva fotony vyvolají vznik jednoho náboje, každou sekundu tedy vznikne  $n_{\text{náboj}} = \frac{n}{2} = 1.6 \times 10^{12}$  nábojů (nosičů jednotkových nábojů).

Proud je definován jako tok nosičů náboje za čas (proteklý náboj za čas):

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot q}{t} = \frac{1.6 \times 10^{12} \cdot 1.602 \times 10^{-19}}{1} = 0.256 \times 10^{-6} \text{ A}$$

Aby napětí na odporové zátěži bylo  $U = 1 \text{ mV}$ , musí být při daném proudu detektorem  $I = 0.256 \times 10^{-6} \text{ A}$  hodnota odporu zátěže:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10^{-3}}{0.256 \times 10^{-6}} = 3906 \Omega = 3.9 \text{ k}\Omega$$

**Příklad 2.** Vypočítejte proud detektoru vyvolaný svazkem He-Ne laseru s výkonem  $0.1 \text{ mW}$  ve fotonásobiči, který je tvořen fotokatodou, pěti dynodami a anodou. Předpokládejme, že fotokatoda má kvantovou účinnost  $10\%$  a každá dynoda emituje tři elektrony na jeden dopadající elektron. Na anodu dopadají všechny elektrony z poslední dynody.

Výkon laseru je  $0.1 \text{ mW}$ , to znamená, že za každou sekundu emituje laser záření s energií  $E_0 = 10^{-4} \text{ J}$ . Energií jednoho fotonu záření He-Ne laseru vypočítáme podle vztahu:

$$E_{\text{foton}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{633 \times 10^{-9}} = 31 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Za každou sekundu tedy dopadá na fotokatodu  $n$  fotonů:  $n = \frac{E_0}{E_{\text{foton}}} = \frac{10^{-4}}{31 \times 10^{-20}} = 3.2 \times 10^{14}$ .

Pokud započítáme kvantovou účinnost fotokatody  $10\%$ , tak z této fotokatody je za každou sekundu emitováno na soustavu dynod  $n_{\text{fotokatoda}} = 3.2 \times 10^{13}$  elektronů.

Soustava dynod je tvořena 5 dynodami a každá dynoda emituje tři elektrony na jeden dopadající elektron. To znamená, že z poslední dynody kaskády je emitováno  $3^5$ krát více elektronů než je počet elektronů dopadajících na první dynodu,  $3^5 = 243$ , proto:

Počet elektronů dopadajících na anodu je:  $n_{\text{anoda}} = 243 \cdot 3.2 \times 10^{13} = 777.6 \times 10^{13}$

Proud detektorem určíme podle definice:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot q}{t} = \frac{777.6 \times 10^{13} \cdot 1.602 \times 10^{-19}}{1} = 1245.7 \times 10^{-6} \text{ A} = 1.2 \text{ mA}$$

**Příklad 3.** Úhel divergence laserového svazku s výkonem 1 W umístěného na Zemi je 2 mrad. Jestliže útlum atmosféry představuje 10 dBkm<sup>-1</sup>, vypočítejte, jaká je maximální přípustná vzdálenost mezi zdrojem a retranslátorem, detektorem. Plocha detektoru retranslátoru je 1 cm<sup>2</sup> a minimální spolehlivě detekovatelný signál je 1 μW.

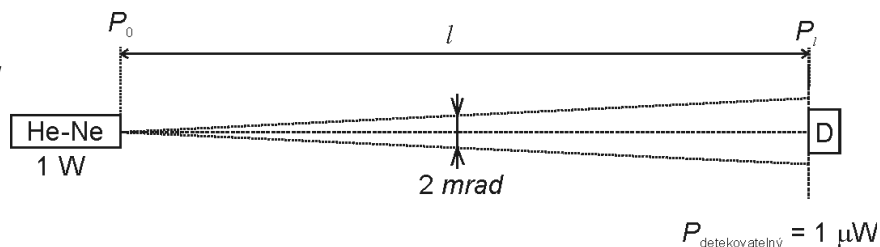
$$P_0 = 1 \text{ W}$$

$$\text{Divergence } 2\theta = 2 \text{ mrad}$$

$$P_{\text{detekovatelný}} = 1 \text{ } \mu\text{W}$$

$$S_{\text{detektor}} = 1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Atenuation} = 10 \text{ dB/km}$$



$$\begin{array}{c} P_1 \rightarrow \boxed{\text{Atenuation}} \rightarrow P_2 \end{array} \quad A = -10 \cdot \log(P_2/P_1)$$

Obsah průřezu svazku laseru na vzdálenosti  $l$  při dané divergenci svazku je:

$$S = \pi r^2, \text{ kde } r \text{ je možno vypočítat: } r = l \cdot \text{tg} \theta \approx l \cdot \theta, \text{ pak platí: } S_{\text{svazek}} = \pi (l \cdot \theta)^2$$

Výkon v laserovém svazku na vzdálenosti  $l$  od zdroje bude v důsledku útlumu atmosféry:

$$P_l = P_0 \cdot 10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)}$$

Aby byl signál detekovatelný, musí být intenzita (plošná hustota výkonu) záření na detektoru na vzdálenosti  $l$  od zdroje větší nebo rovna minimální detekovatelné intenzitě detektoru, vypočítáme mezní hodnotu (rovnost):

$$I = \frac{P_l}{S_{\text{svazek}}} = \frac{P_{\text{detekovatelný}}}{S_{\text{detektor}}}, \text{ do tohoto vztahu dosadíme:}$$

$$I = \frac{P_l}{S_{\text{svazek}}} = \frac{P_0 \cdot 10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)}}{\pi (l \cdot \theta)^2} \text{ a zároveň } I = \frac{P_{\text{detekovatelný}}}{S_{\text{detektor}}} = \frac{10^{-6}}{10^{-4}} = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{ intenzity dosadíme do}$$

rovnosti:

$$\frac{P_0 \cdot 10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)}}{\pi (l \cdot \theta)^2} = 10^{-2} \Rightarrow P_0 \cdot 10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)} = 10^{-2} \cdot \pi (l \cdot \theta)^2, \text{ dosadíme známé hodnoty:}$$

$$1 \cdot 10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)} = 3,14 \cdot 10^{-2} \cdot (2 \times 10^{-3})^2 \cdot l^2$$

$$10^{\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right)} = 3,14 \cdot 10^{-2} \cdot (2 \times 10^{-3})^2 \cdot l^2 = 12,56 \times 10^{-8} \cdot l^2, \text{ tento výraz zlogaritmuje:}$$

$$\left(\frac{-A \cdot l}{10}\right) = \log(12,56) - 8 + 2 \cdot \log l$$

$$-10^{-3} \cdot l = \log(12,56) - 8 + 2 \cdot \log l, \text{ tuto úlohu numericky vyřešíme:}$$

$$l = 3,68 \text{ km.}$$

**Příklad 4.** Vypočtete dopadající signál na detektoru vyvolávaný zářením He-Ne laseru s výkonem 1 mW a s úhlem divergence 2 mrad, vzdálenost laseru a detektoru je 10 km, poloměr fotokatody 1 cm. Pro kvantovou účinnost fotokatody 10% vypočtete vyvolaný proud fotodetektořem.

$$P_{\text{laser}} = 10^{-3} \text{ W}$$

$$\text{Divergence} = 2 \text{ mrad} = 2\theta$$

$$P_{\text{detektor}} = ?$$

$$S_{\text{detektor}} = \pi r^2 = 3.14 \text{ cm}^2 = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Vzdálenost laseru a detektoru je 10 km, to znamená, že při dané divergenci 2 mrad bude obsah průřezu svazku laseru na vzdálenosti 10 km dán vztahem:

$$S_{\text{svazek}} = \pi (l\theta)^2 = 3.14 \cdot (10^4 \cdot 1 \times 10^{-3})^2 = 314 \text{ m}^2$$

Výkon záření dopadající na plochu detektoru ve vzdálenosti 10 km je:

$$P_{\text{detektor}} = P_{\text{laser}} \frac{S_{\text{detektor}}}{S_{\text{svazek}}} = 10^{-3} \frac{3.14 \times 10^{-4}}{3.14 \times 10^2} = 10^{-9} \text{ W}.$$

To znamená, že za každou sekundu dopadnou na plochu detektoru fotony He-Ne laseru s celkovou energií  $E_{\text{detektor}} = 10^{-9} \text{ J}$

Energie jednoho fotonu záření He-Ne laseru lze vypočítat podle vztahu:

$$E_{\text{foton}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{633 \times 10^{-9}} = 31 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Za každou sekundu tedy dopadne na detektor  $n$  fotonů:

$$n = \frac{E_{\text{detektor}}}{E_{\text{foton}}} = \frac{10^{-9}}{31 \times 10^{-20}} = 3.2 \times 10^9$$

Protože kvantová účinnost fotokatody je  $\eta = 10\%$ , za každou sekundu bude ve fotokatodě uvolněno  $m$  volných elektronů:

$$m = \eta \cdot n = 3.2 \times 10^8$$

Proud fotodetektořem určíme podle definice:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{m \cdot q}{t} = \frac{3.2 \times 10^8 \cdot 1.602 \times 10^{-19}}{1} = 5.12 \times 10^{-11} \text{ A}$$