

Snímače optických veličin

Základní pojmy

Optické záření je část elektromagnetického záření zahrnující oblast viditelného, ultrafialového a infračerveného záření. Tomuto rozmezí odpovídá rozsah vlnových délek 10 nm - 0.1 mm. Funkce snímačů optického záření je založena na transformaci energie záření na elektrický signál prostřednictvím změny elektrické veličiny snímače. Tato transformace může být uskutečněna přímo (využitím vnitřního nebo vnějšího fotoelektrického jevu) nebo nepřímo prostřednictvím jiného druhu energie (např. tepelné - termočlánky, bolometry). Při interakci záření s polovodiči dochází ke čtyřem základním jevům - fotoluminiscenci, absorpci, emisi (tzv' vnější fotoelektrický jev) a skupině jevů označovaných jako vnitřní fotoelektrický jev.

Fotoluminiscence je přímá přeměna části pohlcené energie na nové záření jiné vlnové délky. Na tomto principu je založena funkce převaděčů infračerveného záření do viditelné části spektra

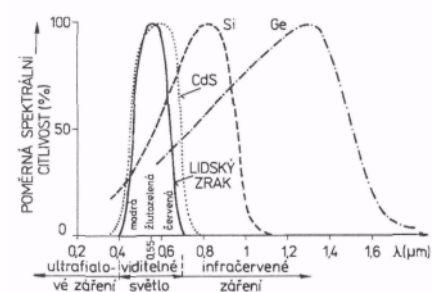
Absorbce záření (vlastní, excitovaná, příměsová) způsobuje ohřev materiálu.

Vnější fotoelektrický jev způsobuje výstup elektronů z povrchu látek a jejich pohyb k elektrodám. Energie (rychlost) fotoelektronů nezávisí na intenzitě osvětlení, ale na kmitočtu (barvě) dopadajícího světla a napětí mezi elektrodami.

Vnitřní fotoelektrický jev spočívá v tom, že absorpci vznikají uvnitř látky ionizací atomů nadbytečné nosiče náboje.

Typy snímačů a jejich vlastnosti

Ve shodě s klasifikací snímačů je lze rozdělit na aktivní (generatorické), na kterých při dopadu záření vzniká elektrické napětí, a pasivní snímače, měnící pouze určitý parametr. Mezi základní parametry snímačů záření patří vedle obecných statických a dynamických vlastností tzv. spektrální citlivost. Ta popisuje závislost elektrických vlastností snímače na vlnové délce λ dopadajícího záření při konstantní intenzitě osvětlení E . Udává se zpravidla v % jako bezrozměrná relativní citlivost v závislosti na vlnové délce, jak je uvedeno na obr 3.193. Z charakteristiky plyne, že rozsah vnímání lidského oka je v mezích 400 - 760 nm.



Obr. 3.193 Relativní spektrální citlivost

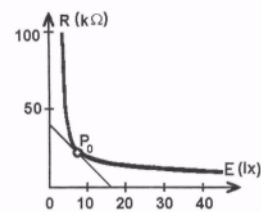
a) Fotorezistor

Fotorezistor využívá změny elektrické vodivosti některých polovodičových materiálů působením světelného toku. Konstrukčně je realizován napařením vhodného polovodičového materiálu (CdS, CdSe) ve tvaru meandru na keramickou podložku tak, aby se dosáhlo určité hodnoty odporu. Systém se ukládá do kovového pouzdra s průhledným okénkem. Základní vlastnost snímače je popsána závislostí odporu R na intenzitě dopadajícího zářivého toku E . Za tmy vykazuje snímač velmi vysoký odpor R_T (řádově $M\Omega$), osvětlením jeho hodnota hyperbolicky klesá. Velikost odporu R v závislosti na zářivém toku E lze vyjádřit výrazem:

$$R = R_0 \cdot E^{-\alpha} \quad (\Omega, \Omega/\text{lx}^{-1}, \text{lx})$$

v němž R_0 je hodnota odporu při intenzitě záření $E = 1$ (lx) a konstanta α závisí na materiálu a geometrii fotorezistoru. Graficky je závislost $p = f(E)$ vyjádřena charakteristikou na obr 3.194

Pro popis vlastností fotorezistoru se kromě tohoto základního vztahu uvádějí některé další veličiny a parametry:



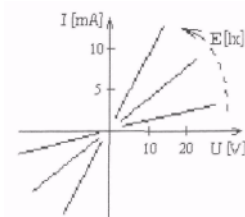
Obr. 3.194
Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení

1) Světelná citlivost je dána podílem změny odporu snímače ΔR vyvolané změnou osvětlení ΔE , takže ji lze vyjádřit výrazem:

$$\gamma = \Delta R / \Delta E$$

Tento podíl technicky vystihuje tendenci změny průběhu závislosti $R = f(E)$ a v charakteristice znamená směrnici tečny ve zvoleném pracovním bodě P_0 jak je znázorněno na obr. 3.194.

2) Voltampérová charakteristika $I = f(U)$ při $E = \text{konst.}$ znázorněná na obr 3.195 je soustava přímek, jejichž parametrem je intenzita osvětlení E . Růstem osvětlení strmost charakteristik vzrůstá, jejich rozestup však při rostoucí intenzitě osvětlení E klesá, takže závislost proudu fotorezistoru I na osvětlení E , označovaná jako luxampérová charakteristika, je nelineární. Maximální hodnota proudu je omezena dovolenou tepelnou ztrátou fotorezistoru.

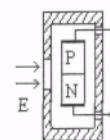


Obr. 3.195
VA charakteristiky fotorezistoru

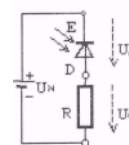
3) Dynamické charakteristiky popisují vlastnosti snímače z hlediska jeho činnosti v čase. Standardním dynamickým parametrem snímačů je časová konstanta vyjadřující u fotorezistoru to, že osvitom či jeho přerušením se nedosáhne nová ustálená hodnota proudu fotorezistorem okamžitě. Všeobecně lze označit dynamické odezvy fotorezistoru jako pomalé, časové konstanty závisí na hodnotě intenzity osvětlení E .

b) Fotodioda

Fotodioda je plošná dioda, jejíž přechod PN je ovlivňován světelným tokem jak je znázorněno na obr' 3.196, Při nulovém osvětlení diody její charakteristiky odpovídají charakteristikám běžné diody. Osvětlením se vytvoří páry elektron-díra, vyvolávající dodatečný proud I diodou. Pro detekci optických signálů se jejich pracovní bod nastavuje do třetího kvadrantu, protože nejcitlivější závislost na světlo (asi 0,2 A/W) vykazuje dioda při polování v závěrném směru, takže se zapojuje podle obr 3.197. Celkový proud diodou je dán rozdílem závěrného proudu diody a fotoelektrickým proudem I_F .

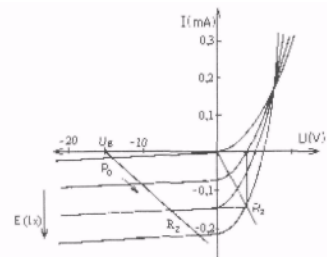


Obr. 3.196
Provedení fotodiody



Obr. 3.197
Zapojení fotodiody

Pracovní bod se růstem osvětlení pohybuje ve třetím kvadrantu po tzv. zatěžovací přímce směrem k větším hodnotám proudů, jak je vyznačeno šipkou. Proud diodou i_D v závislosti na osvětlení E prakticky lineárně vzrůstá.

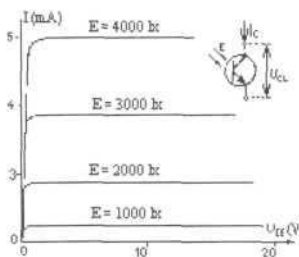


Obr. 3.198 VA charakteristiky fotodiody

Fotodiody všeobecně mají dostatečnou citlivost (řádově stovky nA/lx), zatížitelnost a dlouhodobou stálost, jejich mezní kmitočet je asi 50 kHz. Zlepšení frekvenčních vlastností je dosaženo konstrukcí tzv. PIN-diody nebo lavinové fotodiody. Germaniové fotodiody mají vrchol citlivosti v infračervené oblasti, takže signál infrazářiče má výrazně vyšší úroveň než signál denního světla, jehož kolísání tím nevnaší parazitní signál, a používají se proto v zabezpečovacích systémech.

C) Fototranzistor

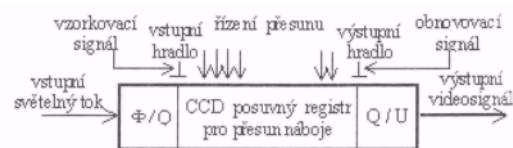
Fototranzistor je optoelektrický prvek. V němž je proud vzniklý absorbcí záření zesílen tranzistorovým jevem. Kolektorový proud fototranzistoru I_c je místo bázovým proudem I_B řízen zářivým tokem E směřovaným do oblasti emitorového přechodu, v němž vznikají páry elektron-díra snižující potenciálovou bariéru kolektorového přechodu. Závěrně polovaný přechod kolektor-báze pracuje obdobným způsobem jako u fotodiody. Schéma zapojení a odpovídající výstupní charakteristiky fototranzistoru jsou znázorněny na obr. 3.199. Z jejich nerovnoměrného rozestupu je zřejmá nelineární závislost přírůstku kolektorového proudu ΔI_c na přírůstku osvětlení ΔE . Podíl změny výstupního kolektorového proudu ΔI_c a změny osvětlení ΔE určuje tzv. citlivost fototranzistoru S :



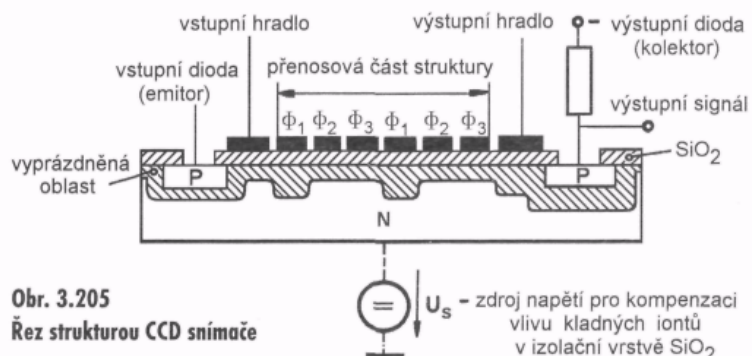
Obr. 3.199 Výstupní charakteristiky fototranzistoru

e) Optoelektronické snímače s nábojově vázanou strukturou (CCD)

CCD-snímače s nábojovou Vazbou (Charge Coup-led Devices)' jejichž blokové schéma lze znázornit dle obr 3.204, jsou základním funkčním prvkem pro snímání plošných obraz. Z podélného řezu snímače na obr 3.205 je patrná unipolární struktura, tvořená monokrystalem N. opatřeným dielektrickou izolační vrstvou SiO_2 , na které je řada těsně sousedících vzájemně izolovaných elektrod. Ty jsou připojeny v daném případě ke třem sběrnícím. generujícím tři úrovně napětí a vyvolávajícím nejen inverzi vodivosti substrátu N stejným způsobem jako u unipolárních tranzistorů, ale i příčné (tj. s povrchem rovnoběžné) elektrické pole, přesouvající náboje po délce



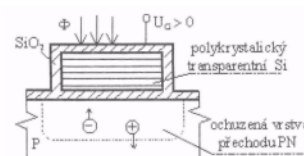
Obr. 3.204 Přenos signálu v CCD snímači



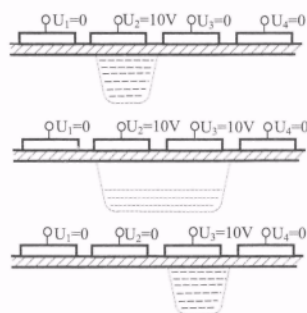
Obr. 3.205 Řez strukturou CCD snímače

struktury jedno, dvou, tří nebo čtyřfázově. Posloupnost činnosti CCD-snímačů se skládá ze tří taktů – převodu světelného toku na náboj, přesunu náboje polovodičovou strukturou CCD na výstup a převodem náboje na výstupní napětí (videosignál). Trojici činností odpovídají tři části struktury - vstupní, přenosová a výstupní.

Vstupní část uspořádaná podle typu signálu převádí vstupní optický (případně elektrický spojitý nebo diskretní) signál na sled nábojů s velikostí úměrnou okamžité velikosti vstupního signálu a zavádí je do přenosové části struktury. Pro zpracování elektrických vstupních signálů je vstupní (i výstupní) část struktury tvořena přechodem PN (na obr 3.205 v substrátu N ostrůvky P), z nichž vedou ohmické kontakty ke zdroji signálu a k zátěži. Při zpracování optických plošných signálů proniká světlo shora maticí tenkých transparentních elektrod (až 5120 x 5120)' pod nimiž vznikají páry elektron-díra, přičemž jsou napětím na elektrodách majoritní nosiče odpuzovány a minoritní tvoří náboj úměrný ozáření (obr. 3.206). Rychlost zápisu pomocí přechodu PN je řádově v jednotkách nanosekund.



Obr. 3.206
Princip převodu světelný tok-náboj



Obr. 3.207 Princip přesunu náboje polovodič. strukturou CCD

Princip přenosu náboje střední částí struktury lze vysvětlit dle obr 3.207. Před přenosem je v potenciálové jámě pod druhou elektrodou ($U = 10V$) uložen náboj Q , napětí ostatních elektrod jsou nulová. Při-pojíme-li na třetí elektrodu napětí $U_3 > U_2$, vytvoří se i pod touto elektrodou potenciálová jáma tak, že při dostatečně malé vzdálenosti mezi elektrodami obě jámy splynou a náboj se mezi nimi rozdělí. Odpojíme-li potom napětí z elektrody (2) „přeteče“ do potenciálové jámy pod elektrodou (3) i zbylá část náboje, tj. náboj se posunul o jednu elektrodu vpravo. Z

mechanismu přesunu plyne, že pro vznik jediné potenciálové jámy se řídicí napětí na sousedních elektrodách musí částečně překrývat, její profil musí být takový. aby se náboj přenesl beze zbytku a frekvence řídicích signálů musí být tak vysoká, aby se velikost náboje nezměnila tepelnou generací nábojů uvnitř struktury.

Třetí takt, tj. převod náboje na výstupní napětí (čtení informace z CCD) se nejjednodušším způsobem provádí pomocí závěrně polarizovaného přechodu PN (obr. .20-5). Po příchodu čtecího impulzu informační náboj přesunutý do potenciálové jámy výstupního CCD generuje proudový impulz, takže na zatěžovacím odporu vznikne napěťový pulz s amplitudou a délkou závislou na velikosti náboje, vzhledem k jeho velikosti řádově $10^{-12} C$ je ale malý. Vhodnější je proto řízení výstupního napětí tranzistoru MOSFET napětím kapacity přechodu PN výstupní diody.

Předností snímačů CCD jsou technologická jednoduchost výroby. vysoká citlivost (práh citlivosti řádově jednotky luxů), malá spotřeba energie (5 pW/bit) v režimu předávání informace, prakticky žádné ztráty v režimu jejich zachování a odstranění zobrazovacích elektronek řádkovaných vysokonapěťově napájeným paprskem.