

Úloha č.9 - Detekce optického záření

1 Teoretický úvod

Detektory optického záření, tzv. *fotodetektory*, jsou nezbytnou pomůckou při práci s elektromagnetickým zářením. Společný princip většiny detektorů pro optickou oblast je založen na převodu optického signálu na elektrický, který je pak předmětem měření. K tomu dochází prostřednictvím předávání energie fotonů dopadajících na aktivní plochu fotodetektoru přítomným atomům.

Dochází-li k přeměně energie dopadajících fotonů na teplo, jedná se o tzv. *tepelné detektory*. Tyto detektory jsou využívány zřídka a zejména pro detekci viditelného a infračerveného záření o vysokých výkonech. Nevýhodou je jejich nízká účinnost a dlouhá doba odezvy.

Druhou skupinu tvoří tzv. *fotoelektrické detektory*, u kterých dochází vlivem absorpce energie fotonů k přechodům elektronů na vyšší energetickou hladinu a k vytvoření volných nosičů náboje. Tento jev se nazývá *fotoefekt*. Pohybem takto generovaných nosičů náboje ve vnějším elektrickém poli vzniká měřitelný elektrický proud.

Vnější fotoefekt - fotoelektronová emise

V případě, že energie fotonů dopadajících na povrch kovu ve vakuu je dostatečně velká, může dojít k uvolnění elektronu z jeho povrchu, tzv. *fotoelektronové emisi*. Nejjednodušší detektory využívající vnějšího fotoefektu bývají konstruovány tak, že jsou uvnitř vakuové trubice umístěny dvě elektrody. Záření dopadající na katodu z fotoemisního materiálu uvolňuje elektrony do prostoru vakua, kde jsou urychlovány elektrickým polem směrem k anodě a po dopadu vytvářejí ve vnějším obvodu proudový impuls. Mnohem častěji se lze ovšem setkat s tzv. **fotonásobičem**, u kterého jsou do vakuové trubice mezi katodu a anodu vloženy další elektrody, tzv. *dynody*, se vzrůstajícím elektrickým potenciálem. Elektrony, emitované opět z katody, dopadají postupně na jednotlivé dynody. Díky svému urychlení uvolňují po dopadu na každou dynodu při tzv. *sekundární emisi* vždy větší množství elektronů, které jsou unášeny k další dynodě. Výsledkem je znásobení původního signálu faktorem až 10^8 , v závislosti na počtu dynod a celkovém urychlovacím napětí (10^2 až 10^3 V). Díky spojení vnějšího fotoefektu a sekundární emise lze fotonásobiče používat k detekci slabých signálů až na úrovni jednotlivých fotonů. Často se například používají v kombinaci se scintilátory k detekci vysokoenergetického záření. Spektrální citlivost fotonásobičů závisí na materiálu fotokatody a dynod, typicky se pohybuje v rozmezí 300 – 800 nm.

Vnitřní fotoefekt - fotovodivost

Fotodetektory určené pro měření blízkého UV a blízkého IR záření jsou nejčastěji založeny na vnitřním fotoefektu, neboli *fotovodivosti*, při kterém je energie absorbovaných fotonů využita na přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Polovodičové materiály tento efekt umožňují díky existenci tzv. *zakázaného pásu* energií vhodné šířky mezi valenčním a vodivostním pásem. Zakázaný pás o šířce 0,1 – 3 eV na straně jedné nedovoluje elektronům přejít z valenčního pásu do vodivostního. Na druhé straně však při absorpci fotonu z oblasti viditelného až blízkého infračerveného záření může dojít ke generaci volného elektronu ve vodivostním pásu, a současně díry v pásu valenčním. Tím roste elektrická vodivost materiálu, která je předmětem měření.

Jedním ze základních parametrů fotodetektorů založených na vnitřním fotoefektu je citlivost \mathcal{R}_λ udávaná v jednotkách A/W. Vyjadřuje poměr mezi elektrickým proudem I_f , protékajícím detektorem a výkonem dopadajícího záření P_i

$$\mathcal{R}_\lambda = \frac{I_f}{P_i} = \eta_\lambda \frac{e}{h\nu} = \eta_\lambda \frac{\lambda}{1,24} , \quad (1)$$

kde kvantová účinnost η_λ ($0 \leq \eta_\lambda \leq 1$) vyjadřuje pravděpodobnost, že foton po dopadu na detektor vygeneruje pár elektron-díra, tvořící elektrický proud, vlnovou délku λ je potřeba zadat v μm . Kromě lineární závislosti citlivosti na vlnové délce dopadajícího záření je spektrálně závislá také hodnota kvantové účinnosti.

Na principu fotovodivosti je založeno několik druhů detektorů, nejčastěji se lze potkat s fotoodporem, fotodiodou a fototranzistorem.

Fotoodpor

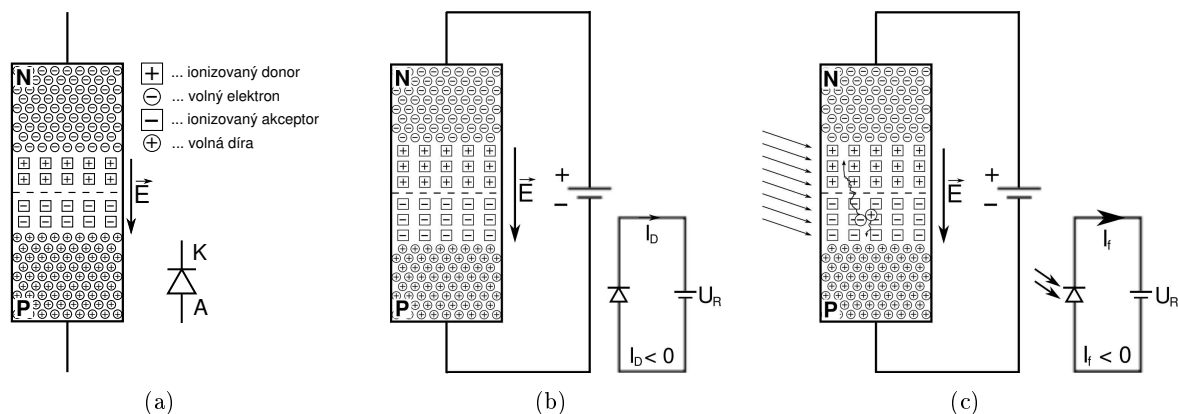
Fotoodpor je nejjednodušším detektorem využívajícím fotovodivosti. Bývá vyroben z některého z vlastních polovodičů (tj. polovodičů bez dopantů), v závislosti na spektrální oblasti jeho využití. V optické oblasti se nejčastěji využívá sloučenina CdS (tzv. *binární polovodič*) s maximální citlivostí pro $\lambda = 520 \text{ nm}$. Při dopadu záření na polovodič dochází ke vzniku párů elektron-díra, což zvyšuje vodivost, resp. snižuje elektrický odpor této součástky.

Fotoodpor patří mezi detektory, které vykazují vnitřní zisk. Ten je nepřímo úměrný době τ_e , za kterou elektron proletí uvnitř polovodiče dráhu mezi dvěma elektrodami. Odtud vychází typická struktura fotoodporu, kdy se polovodičový materiál nachází mezi dvěma hřebenovými elektrodami, čímž se dosahuje krátké doby průletu τ_e za současné maximalizace osvětlené plochy.

Mezi výhody fotoodporů patří jejich nízká cena, vysoká citlivost a možnost jejich využití v obvodech se střídavým proudem, narozdíl od fotodiod. Nevýhodou ve srovnání s jinými fotodetektory je zejména jejich dlouhá doba odezvy.

Fotodioda

Další skupina fotodetektorů je konstrukčně shodná s běžnými polovodičovými diodami. V okolí p-n přechodu vzniká díky difuzi a vzájemné rekombinaci pohyblivých nosičů náboje tzv. *ochuzená oblast*, ve které je náboj přítomen pouze ve formě ionizovaných atomů příměsi, tzv. *donorů* a *akceptorů* (viz. Obrázek 1(a)). Donory, polovodič N, snadno ztrácejí elektron - jsou tedy ionizovány kladně. Akceptory, polovodič P, ochotně přijímají valenční elektrony okolních atomů vlastního polovodiče - jsou ionizovány záporně. Díky rozmístění atomů příměsi vzniká v ochuzené oblasti elektrické pole, které zabraňuje vniku majoritních volných nosičů náboje - děr z oblasti P a elektronů z oblasti N.



Obrázek 1: Fotodioda se závěrným napětím. (a) V ochuzené oblasti samostatné diody v místě p-n přechodu vzniká elektrické pole. (b) Přiložení závěrného napětí U_R má za následek rozšíření ochuzené oblasti a zvýšení intenzity elektrického pole. (c) Při absorpci fotonů v ochuzené oblasti jsou generovány elektron-děrové páry, které jsou zdrojem měřitelného elektrického proudu I_f .

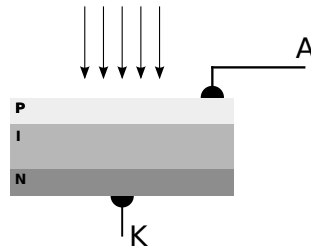
Přiložíme-li k fotodiodě napětí U_R v *závěrném směru* (tj. kladný pól na katodu a záporný na anodu), dojde k rozšíření ochuzené oblasti (viz. Obrázek 1(b)). Elektrony v polovodiči N, stejně jako díry v polovodiči P, jsou totiž pod vlivem přiloženého vnějšího elektrického pole odtahovány

směrem od p-n přechodu. Toto rozšíření má za následek také nárůst intenzity elektrického pole v ochuzené oblasti. Není-li překročeno tzv. *průrazné napětí* U_{BDV} (u běžných Si fotodiod to bývá okolo -30 V), protéká obvodem bez osvětlení pouze velmi malý *proud za tmy* I_D způsobený volnými nosiči náboje vznikajících náhodně v ochuzené oblasti. Dopadá-li však na p-n přechod fotodiody světlo, dochází v ochuzené oblasti vlivem absorpce fotonů ke generacím elektron-děrových párů (viz. Obrázek 1(c)). Nově vzniklé volné nosiče náboje jsou okamžitě urychlovány přítomným elektrickým polem a obvodem protéká měřitelný elektrický proud, *fotoproud* I_f , jehož velikost stoupá lineárně s rostoucím optickým výkonem P_i .

Pokud je na fotodiodu naopak přiloženo napětí U_F v *propustném směru*, chová se fotodioda jako odpor s nelineární závislostí procházejícího proudu na přiloženém napětí. Gradient elektrického potenciálu uvnitř ochuzené oblasti se vlivem přiloženého napětí zmenší a volné nosiče náboje jí mohou začít procházet. Závislost proudu I na přiloženém napětí U_F je exponenciální

$$I \propto \exp\left(\frac{eU_F}{k_B T}\right). \quad (2)$$

Při osvětlení diody závisí velikost a směr výsledného proudu I na velikosti přiloženého napětí U_F . Je-li U_F příliš nízké, převažuje vliv elektrického pole uvnitř zmenšující se ochuzené oblasti. Výsledný proud má stejný směr jako v případě závěrného napětí a je dán nosiči náboje vznikajícími uvnitř ochuzené oblasti. Nad určitou hodnotou U_F začíná převažovat proud, který se řídí elektrickým polem přiloženého zdroje napětí. Hodnota napětí, při kterém je $I = 0$, a dochází ke změně směru proudu, závisí na dopadajícím optickém výkonu P_i .



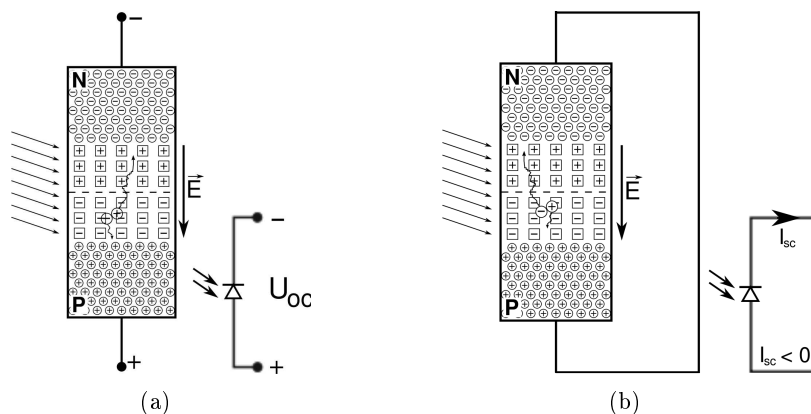
Obrázek 2: Schematické znázornění PIN fotodiody. V praxi dopadá záření kolmo na p-i-n přechody, tj. tak aby byla ochuzená oblast co nejúčinněji osvětlena.

V praxi se fotodioda jako detektor používá nejčastěji s přiloženým závěrným napětím. S rostoucí šířkou ochuzené oblasti se snižuje její kapacita a tím se zlepšuje časová odezva detektoru. Zároveň s ochuzenou oblastí se zvětšuje také fotocitlivý objem, čímž se zlepšuje citlivost fotodetektoru. Kvůli významu ochuzené oblasti byla fotodioda pro detekci upravena tak, že mezi oblast typu P a N je vložena další vrstva I se slabou dotací (viz. Obrázek 2). Konstrukce této tzv. *PIN fotodiody* v podstatě umožňuje rozšířit ochuzenou oblast o celou vnitřní vrstvu, čímž zvyšuje citlivost a rychlost detekce. Aby byl kontakt fotonů s ochuzenou oblastí co největší, dopadá záření na p-i-n přechod kolmo (viz. Obrázek 2).

Fotodioda jako solární článek

Kromě detekce záření lze využít fotodiodu také jako zdroj napětí, tedy jako solární článek. Zapojíme-li fotodiodu naprázdno, v tzv. *fotovoltaickém režimu* (viz. Obrázek 3(a)), elektron-děrové páry generované absorpcí fotonu v ochuzené oblasti budou přispívat ke zvyšování elektrického pole. Napětí naprázdno, naměřené na koncích takto zapojené fotodiody, označujeme U_{oc} (*open-circuit*). Zapojíme-li fotodiodu nakrátko, tj. do obvodu bez zátěže (viz. Obrázek 3(b)), bude obvodem protékat proud I_{sc} (*short-circuit*). Obě hodnoty, U_{oc} a I_{sc} , závisí na hodnotě dopadajícího optického výkonu P_i . Zapojíme-li do obvodu se solárním článkem zátěž, lze volbou jejího elektrického odporu R_z nalézt optimální pracovní bod, při kterém bude článek dodávat maximální výkon daný vzorcem

$$P_{max} = U_{opt} \cdot I_{opt} \quad (3)$$

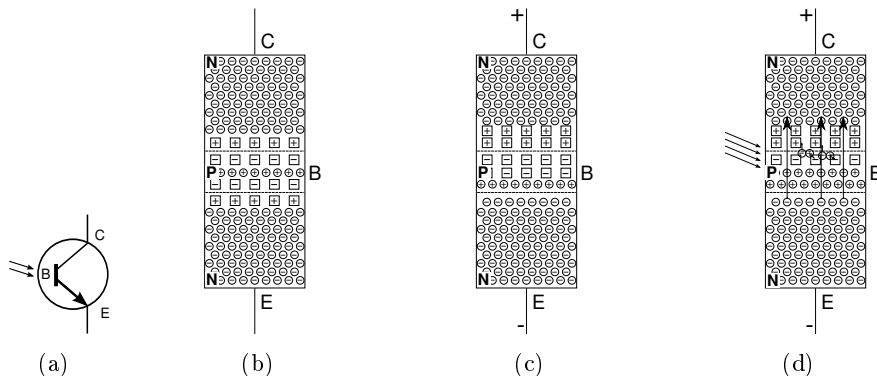


Obrázek 3: Fotodioda jako solární článek. (a) Fotovoltaické zapojení naprázdno. (b) Fotovodivostní zapojení nakrátko.

Kombinací více solárních článků do série lze zvyšovat celkovou hodnotu napětí, jejich paralelním zapojením lze zvyšovat hodnotu dodávaného proudu. Při znalosti optimálního pracovního bodu lze z jednotlivých článků sestavit solární panel dodávající při daném napětí požadovaný výkon s co nejvyšší efektivitou.

Fototranzistor

Dalším typem fotosnímače, který je založen na vnitřním fotoefektu, je fototranzistor. Skládá se ze tří vrstev polovodičů s dotací NPN nebo PNP a tedy obsahuje dva p-n přechody. Narozdíl od fotodiody vykazuje zisk (jeden foton způsobí vznik více elektronů), má však horší dynamické vlastnosti a i proud za tmy je vyšší.



Obrázek 4: NPN fototranzistor: (a) schématická značka NPN fototranzistoru, C - kolektor, B - báze, E - emitor, (b) rozložení nosičů náboje bez přiloženého napětí, (c) rozložení nosičů náboje pro případ přiloženého napětí a bez osvětlení, (d) rozložení nosičů náboje při osvětlení tranzistoru a přiloženém napětí – otevřený tranzistor.

Fototranzistor v porovnání s klasickým tranzistorem má většinou pouze dva vývody, které jsou připojeny k emitoru a kolektoru (viz Obrázek 1). Báze tedy vyvedena není. Pokud přiložíme napětí na tranzistor podle Obrázku 4(c) a pokud na něj nedopadá světlo, neprochází jím žádný proud. Spodní p-n přechod je sice otevřený, ale horní je zavřený. Báze je nabitá záporně vlivem zachycených elektronů a znemožňuje další postup elektronů z emitoru přes bázi do kolektoru – fototranzistor je zavřený. Pokud dojde k osvětlení oblasti báze (blízko horního p-n přechodu viz Obrázek 4(d).), začnou se generovat elektron-děrové páry. Elektrony v oblasti báze (P polovodič) jsou minoritními nosiči náboje a tudíž mohou horním přechodem volně procházet. Zbylé kladné díry způsobí pokles záporného náboje báze, který bránil přechodu elektronů z emitoru do kolektoru. Tranzistor se otevře a přes tenkou bázi začne protékat proud. Velikost protékajícího proudu je tím větší, čím větší je osvětlení oblasti báze.

2 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Seznámení se s principy fungování různých typů fotodetektorů a s jejich základními charakteristikami.

Pomůcky

Během úlohy budou k dispozici následující pomůcky: zdroj stejnosměrného napětí, digitální multimetr, červená laserová dioda ($\lambda = 650 \text{ nm}$), IR laserová dioda ($\lambda = 780 \text{ nm}$), halogenová lampa, fotoodpor, křemíková PIN fotodioda, NPN fototranzistor, otočný potenciometr ($R_{max} = 2 \text{ k}\Omega$), otočný atenuátor, zapojovací panel, spojovací kabely, stojánky k uchycení prvků.

Postup měření

1. Ověření vlastností fotoodporu

U předloženého fotoodporu proměřte závislost jeho elektrického odporu R_f na optickém výkonu dopadajícího světla P_i . Fotoodpor zapojte do série se zátěžovým odporem, na kterém budete měřit velikost napětí U_z . Zátěžový odpor realizujte potenciometrem, na kterém nastavte odpor R_z blízký hodnotě R_{10lx} (viz. Parametry použitých prvků). Na oba odpory přiveďte celkové napětí o velikosti $U_0 = 10 \text{ V}$. Před zahájením měření rozmyslete vliv intenzity dopadajícího záření na napětí U_z . Jako zdroj světla použijte červený laserový modul, výkon dopadajícího světla měňte pomocí otočného atenuátoru.

2. VA charakteristika fotoodporu

Ověřte linearitu VA charakteristiky předloženého fotoodporu při alespoň dvou různých hodnotách dopadajícího optického výkonu. Fotoodpor připojte přímo ke zdroji napětí a proud obvodem měřte pomocí digitálního multimetru.

3. VA charakteristika fotodiody

Zapojte PIN fotodiodu nejprve v přímém a poté i v závěrném směru do obvodu bez zátěžového odporu. Při změně napětí U_F (přímý směr) a U_R proměřte VA charakteristiku fotodiody pomocí multimetru. Hodnoty U_F volte v rozmezí $0 - 1,5 \text{ V}$, podrobněji změřte okolí $U_F = 0,5 \text{ V}$, kde dochází k největší změně. Maximální hodnotu závěrného napětí volte $U_R = -10 \text{ V}$. Charakteristiku proměřte pro 3 různé výkony dopadajícího světla červené laserové diody.

4. Spektrální citlivost fotodiody

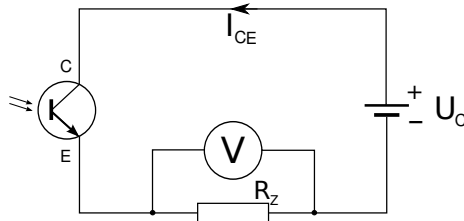
S pomocí obou předložených laserových modulů změřte citlivost \mathcal{R}_λ PIN fotodiody dle vztahu (1) pro odpovídající vlnové délky a vypočtete hodnoty kvantové účinnosti η_λ . Pro každou vlnovou délku změřte alespoň 5 hodnot fotoproudu I_f (měřením napětí na zátěžovém odporu $R_z = 1 \text{ k}\Omega$) při 5 hodnotách dopadajícího optického výkonu P_i . Měření provádějte při $U_R = -10 \text{ V}$.

5. Fotovoltaické zapojení fotodiody

Proměřte VA charakteristiku PIN fotodiody ve fotovoltaickém režimu (bez vnějšího zdroje napětí) pro různé hodnoty zátěžového odporu R_z . Velikost zátěžového odporu volte otočným potenciometrem, hodnotu U_{oc} změřte bez zátěže a pro změření zkratového proudu I_{sc} odpor překleňte vodičem. Jako světelný zdroj použijte halogenovou lampu (12 V ; $2,8 \text{ A}$), kterou umístěte do vzdálenosti 10 cm od PIN fotodiody. Z naměřených hodnot určete maximální výstupní výkon fotodiody P_{max} při daném osvětlení. Navrhněte způsob zapojení fotodiody tohoto typu tak, aby vzniklý fotovoltaický systém dodával výstupní výkon 1 W při napětí 1 V a zapojení bylo co nejefektivnější.

6. Proudová charakteristika fototranzistoru

Zapojte měřící obvod fototranzistoru podle schématu na Obrázku 5 (vnitřní kontakt BNC konektoru je připojen k emitoru a vnější ke kolektoru). Stanovte závislost kolektorového proudu I_{CE} (měřením napětí na zátěžovém odporu $R_z = 100\ \Omega$) na dopadajícím optickém výkonu P_i . Měření proveďte při napětí $U_C = 5\ V$ pro alespoň 7 hodnot optického výkonu.



Obrázek 5: Zapojení fototranzistoru pro měření kolektorového proudu.

3 Požadované výsledky

1. Určete velikost zátěžového odporu R_z . Do grafu vynesete závislosti $R_f(P_i)$ tak, že na obou osách použijete logaritmické měřítko.
2. Vykreslete VA charakteristiky fotoodporu.
3. Do jednoho grafu vykreslete VA charakteristiky PIN fotodiody při různých velikostech dopadajícího optického výkonu P_i . Okomentujte závislost VA charakteristiky na hodnotě P_i .
4. Určete hodnoty citlivosti \mathcal{R}_λ a η_λ pro vlnové délky použitých zdrojů světla. Porovnejte získané hodnoty s teorií. Naměřené hodnoty $I_f(P_i)$ vynesete do grafu a získanou závislost porovnejte s teorií.
5. Vykreslete VA charakteristiku fotovoltaického zapojení PIN fotodiody. Uveďte hodnotu maximálního výstupního výkonu fotodiody P_{max} a schéma zapojení solárního panelu s výkonem 1 W při napětí 1 V.
6. Vykreslete graf závislosti proudu I_{CE} na dopadajícím optickém výkonu P_i .

Reference

- [1] Saleh B. E. A., Teich M. C. *Základy fotoniky*, MatfyzPress, 1995

Parametry použitých prvků

Fotoodpor (CdS)

$R_{10lx} = 10\ k\Omega$... odpor při typickém osvětlení 10 lx a teplotě 25 °C

$R_{min} = 1\ M\Omega$... odpor za tmy

$P_{max} = 125\ mW$... maximální ztrátový výkon, povolené zatížení bez rizika poškození

$V_{max} = 150\ V$... maximální provozní napětí (pouze za tmy)

$\lambda_{smax} = 565 \div 605\ nm$... oblast maximální spektrální citlivosti

PIN fotodioda (Si)

$A = 100 \text{ mm}^2$... fotocitlivá plocha detektoru

$\mathcal{R}_{970} = 0,65 \text{ A/W}$... citlivost detektoru pro $\lambda = 970 \text{ nm}$

$I_D = 2 \text{ nA}$... proud za tmy při závěrném napětí $U_R = -10 \text{ V}$

$U_{BDV} = -30 \text{ V}$... průrazné napětí

$C_0 = 1500 \text{ pF}$... kapacita přechodu bez předpětí

$C_{-10} = 300 \text{ pF}$... kapacita přechodu při $U_R = -10 \text{ V}$

Fototranzistor BPX 81

$A = 0,17 \text{ mm}^2$... fotocitlivá plocha

$V_{CEmax} = 32 \text{ V}$... maximální napětí kolektor - emitor

$I_{CEmax} = 50 \text{ mA}$... maximální kolektorový proud

$I_D = 25 \text{ nA}$... proud za tmy při napětí $U_{CE} = 25 \text{ V}$

$\lambda_{smax} = 850 \text{ nm}$... vlnová délka maximální citlivosti

$\lambda = 440 \div 1070 \text{ nm}$... spektrální rozsah citlivosti

Červený laserový modul

$\lambda = 650 \text{ nm}$... vlnová délka

$V = 3 \text{ V}$... pracovní napětí

$I = 23 \text{ mA}$... maximální proud

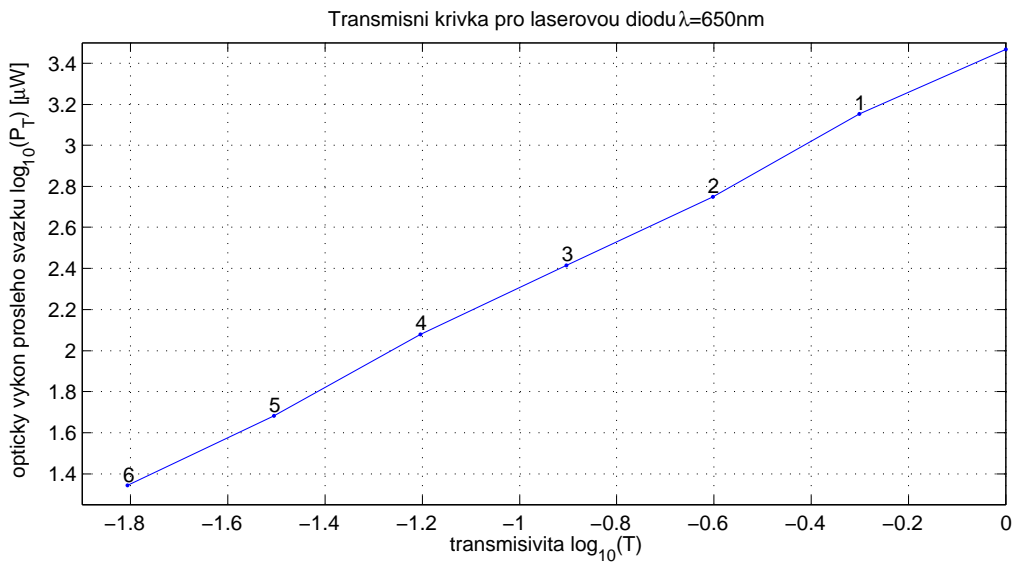
IČ laserový modul

$\lambda = 780 \text{ nm}$... vlnová délka

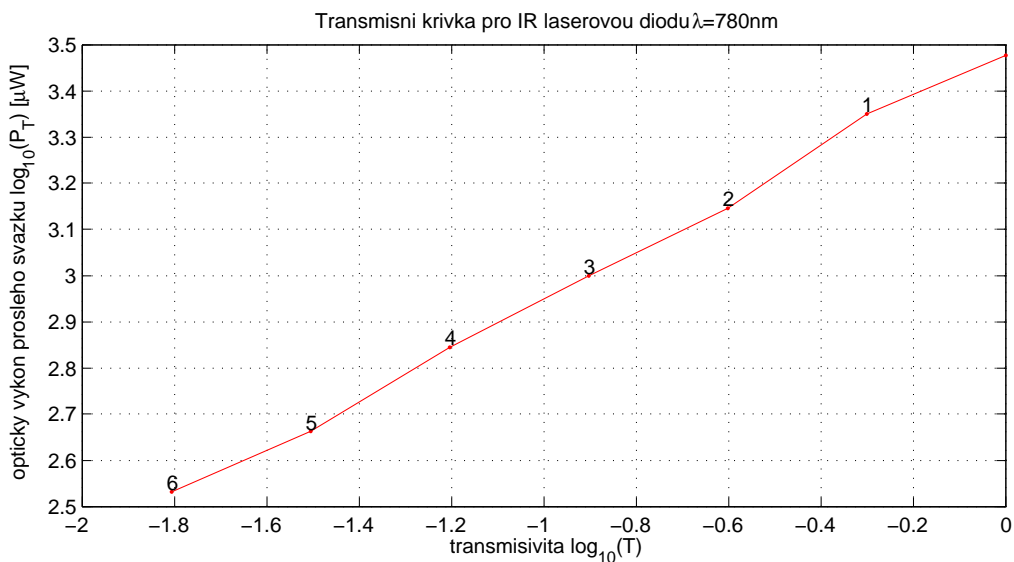
$V = 7,5 \text{ V}$... pracovní napětí

$I = 63 \text{ mA}$... maximální proud

Transmisní charakteristika stupnice šedotónových filtrů



	bez filtru	1	2	3	4	5	6
transmise	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
prošlý výkon [mW]	2,94	1,42	0,56	0,26	0,12	0,048	0,022



	bez filtru	1	2	3	4	5	6
transmise	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
prošlý výkon [mW]	3	2,24	1,4	1	0,7	0,46	0,34