





56. ročník Fyzikálnej olympiády
v školskom roku 2014/2015
Kategória A – celoštátne kolo
Text experimentálnej úlohy

Fyzikálne vlastnosti RGB LED diódy

Úvod

V súvislosti s hľadáním ekologicky priaznivých riešení je jedným zo základných opatrení hľadanie možností úspory energie. Na spotrebe energie ľudskej populácie sa výrazne podieľa osvetlenie. Presadzujú sa preto osvetľovacie prostriedky s vysokou svetelnou účinnosťou a nízkou spotrebou elektrickej energie. Moderným riešením sú osvetľovacie telesá využívajúce technológiu LED (Light Emitting Diode). V nasledujúcej tabuľke je uvedený elektrický príkon potrebný na získanie svetelného toku 500 lm.

Osvetľovacie telesá				
	LED žiarovka	Kompaktná žiarivka	Halogénová žiarovka	Klasická žiarovka
Príkon	5 W	10 W	35 W	50 W

Z tabuľky vidno, že LED žiarovka je $10\times$ úspornejšia ako klasická žiarovka s žeraveným volfrámovým vláknom.

Prvú použiteľnú červenú LED vyvinul roku 1962 kanadský fyzik Nick Holonyak na báze AlGaAs. Využitie na osvetľovanie umožnil až vynález modrej LED na báze GaN, ktorý sa uskutočnil v roku 1994 (I. Akasaki, H. Amano, S. Nakamura – Nobelova cena v roku 2014). Vynález umožnil vytvorenie RGB LED, zostavy trojice diód vyžarujúcich červené (R-red), zelené (G-green) a modré (B-blue) svetlo. Zložením žiarenia troch farieb RGB s rovnakou intenzitou vzniká biele svetlo. Zmenou pomeru intenzity jednotlivých zložiek RGB sa dosahuje rôzne zafarbenie svetla.

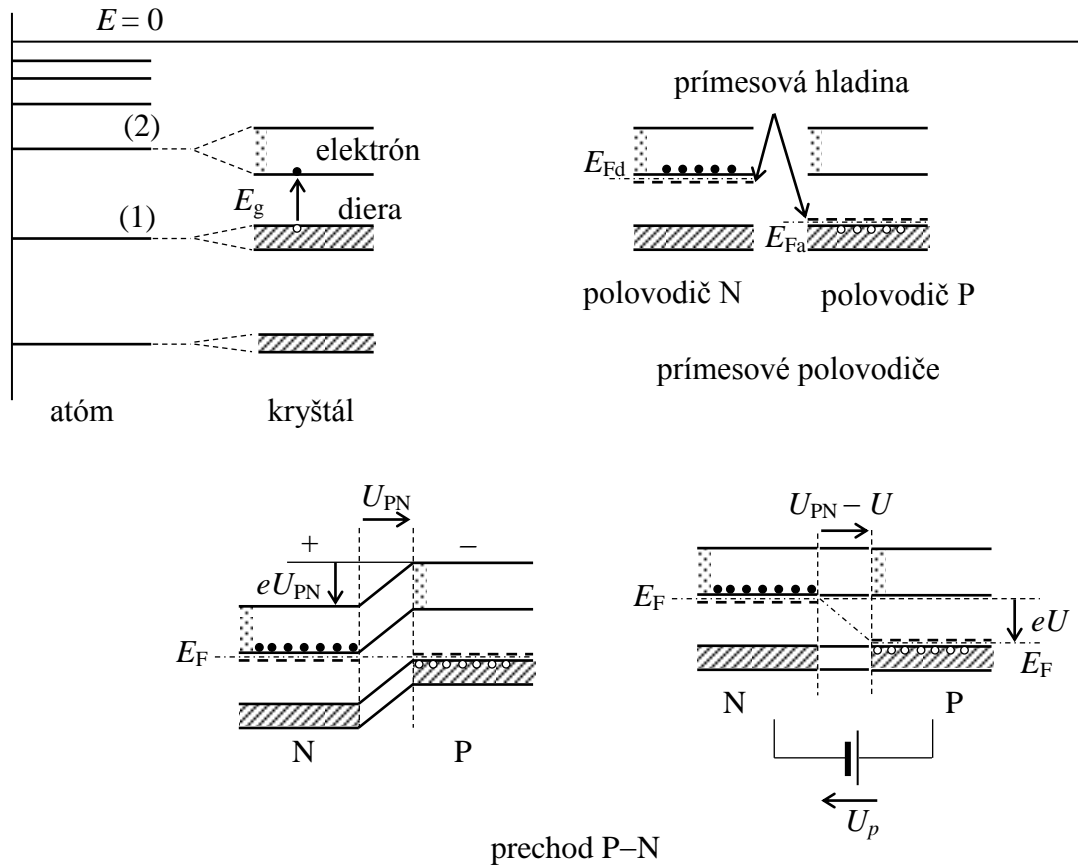
Polovodičový P–N prechod

Fyzikálny základ LED spočíva vo vlastnostiach polovodičového P–N prechodu. Kvalitatívne vysvetlenie základných vlastností poskytuje pásmový model energetických hladín elektrónov.

Zatiaľ, čo v izolovaných atómoch môžu elektróny v elektrónovom obale nadobúdať len určité diskkrétne hodnoty energie (diskkrétne energetické spektrum), pri usporiadaní atómov do kryštálu dochádza v dôsledku vzájomného pôsobenia atómov k rozštiepeniu diskkrétnych energetických hladín na energetické pásma. Každé pásmo obsahuje $2N$ stavov, v ktorých sa môžu elektróny nachádzať (N je počet atómov v kryštále). Elektróny obsadzujú stavy od stavu s najnižšou energiou smerom nahor. Ak je najvyššie pásmo obsadené čiastočne, látka je elektricky vodivá a neprepúšťa svetlo. Takéto pásmo sa nazýva „vodivostné“. Ak je nad najvyšším obsadeným pásmom energetická medzera E_g („zakázané pásmo“ – gap), ide o polovodič (ak $E_g < 3$ eV) alebo izolant (ak $E_g > 3$ eV).

Čistý polovodič je pri nízkej teplote $T \rightarrow 0$ K elektricky nevodivý. Nenulová vodivosť vyžaduje prítomnosť pohyblivých elektrónov vo vodivostnom pásme (pásmo nad zakázaným pásmom) a/alebo

dier vo valenčnom pásme (pásno pod zakázaným pásmom). Vznik párov elektrón–diera sa dosiahne dodaním energie $E \geq E_g$, a to teplotnou excitáciou, žiarením a pod. Závislosť vodivosti od teploty využívajú termistory, od žiarenia fotorezistory.



Obr. A3E-1

Zvýšenie elektrickej vodivosti sa dosiahne pomocou prímiesí. Donory vytvoria v kryštáli voľné elektróny, akceptory pohyblivé diery. Pre termodynamickú rovnováhu v ľubovoľnej sústave je dôležitá Fermiho energia, ktorá predstavuje chemický potenciál sústavy. V prípade nerovnováhy chemického potenciálu dochádza k difúzii, ktorá sa ukončí ustálením konštantnej hodnoty chemického potenciálu v celej sústave. V N-polovodiči je Fermiho hladina tesne pod okrajom vodivostného pásma, v P-polovodiči tesne nad okrajom valenčného pásma.

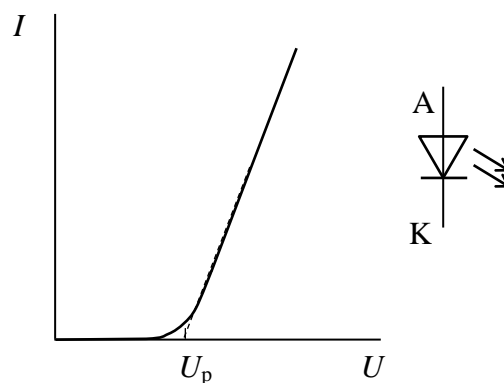
Pri spojení polovodičov P a N dochádza k difúzii elektrónov z polovodiča N do polovodiča P a opačne k difúzii dier z P do N. V úzkej oblasti kontaktu dochádza k rekombinácii elektrónov a dier a vzniká nevodivá hradlová vrstva bez voľných nosičov náboja. V dôsledku difúzie sa N-polovodič nabíja kladne a P-polovodič záporne. Na hradlovej vrstve vzniká kontaktné napätie U_{PN} , ktoré zodpovedá šírke zakázaného pásma $U_{PN} = E_g/e$. Fermiho hladinu možno posúvať vonkajším napätím U . Ak má napätie U opačnú polaritu ako U_{PN} znižuje sa rozdiel hranice vodivostného pásma v oboch polovodičoch. To vedie postupne k nárastu prúdu cez prechod. Pre $U > U_{PN}$ je prechod vodivý a V - A charakteristika sa stáva lineárnou. Ak predĺžime lineárnu časť až na os napätia, dostaneme tzv. prahové napätie U_p , ktoré predstavuje približne otváracie napätie prechodu. Hodnota

U_p je približne $0,7 U_{PN}$. Pri rekombinácii elektrónu a diery v oblasti prechodu pri prechode prúdu v priepustnom smere sa uvoľňuje energia eU , ktorá sa odovzdá kryštálickej mriežke (nežiarivé prechody) alebo sa vyžiari vo forme fotónu (elektroluminiscencia).

Luminiscenčné diódy – LED

Pre aplikácie P–N priechodu sa využívajú jednoduché polovodiče, napr. Si, Ge zo skupiny IV, alebo kompozitné z dvojice prvkov zo skupín III–V (napr. GaAs, InSb, GaN) a II–VI (napr. ZnS, CdS, ZnO). V P–N prechodoch jednoduchých polovodičov prevládajú pri rekombinácii nežiarivé prechody, zatiaľ čo v kompozitných prevládajú žiarivé prechody. Kompozitné polovodiče sa preto používajú na výrobu LED. Ako bolo opísané, farba elektroluminiscencie je daná typom použitého polovodiča. Svetelná účinnosť niektorých farieb klasických LED je ale nižšia ako u ostatných farieb. V tom prípade sa využíva na vytvorenie svetla kombinácia primárnej elektroluminiscencie LED s vysokou účinnosťou a následnej sekundárnej fotoluminiscencie pomocou vhodného luminoforu, ktorým sa vlnová dĺžka primárneho svetla transformuje na vlnovú dĺžku požadovaného vyžarovaného svetla.

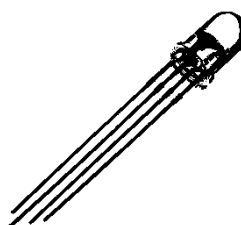
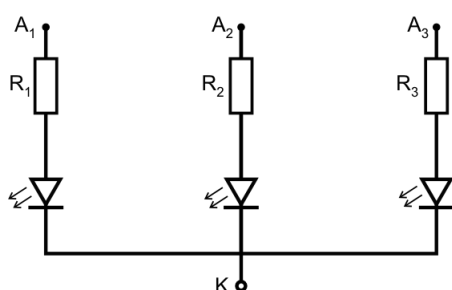
Elektrické vlastnosti LED opisuje V–A charakteristika, obr. A3E–2. Pri napätí v priepustnom smere $U \ll U_p$ je prúd veľmi malý a prechod nevyžaruje. V blízkosti U_p začína prúd narastať a prechod začína vyžarovať svetlo so základnou vlnovou dĺžkou. Pre $U > U_p$ prechod sa stáva vodivý a spektrum žiarenia sa posúva ku kratším vlnovým dĺžkam (napr. červená prechádza do oranžovej).



Obr. A3E–2

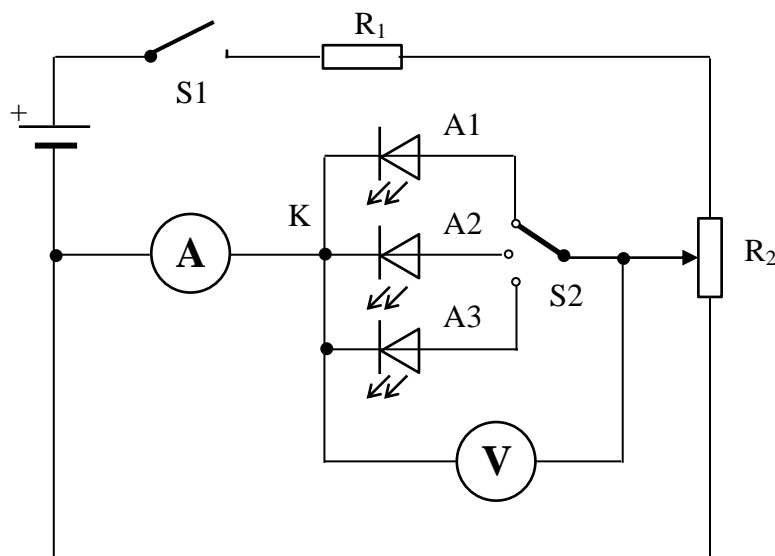
Hodnota prahového napätia U_p sa určí pomocou predĺženia lineárnej časti charakteristiky na os napätia. Približne možno predpokladať, že pri napätí U_p je energia emitovaných fotónov $E_f = e U_p$, čo zodpovedá vlnovej dĺžke svetla $\lambda \leq h c / E_f$, kde je $h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ Planckova konštanta, $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ elementárny náboj, $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ rýchlosť svetla vo vákuu.

RGB LED pozostáva z trojice diód, ktoré sú zdrojom troch základných farieb. Tieto diódy sú napájané osobitne, pričom sériové odpory vyvažujú nerovnomernosť svetelnej účinnosti diód, obr. A3E–3. Elektródy sú odlišené dĺžkou prívodov, najdlhší je spoločný prívod K.



Obr. A3E–3

Zadanie experimentálnej úlohy



Obr. A3E-3

K dispozícii máte merací panel podľa obr. A3E-3, v ktorom je zapojený ochranný sériový odpor R_1 , spínač S1 na pripojenie zdroja, prepínač S2 riešený krokosvorkou, ktorú postupne presúvame na anódy A1, A2, A3 troch R-G-B LED; batéria s napätím 4,5 V, potenciometer R_2 na reguláciu napätia na dióde, svorky na pripojenie ampérmetra (rozsah 0-20 mA) a voltmetra (rozsah 4,5 V), dva meracie prístroje, spojovacie vodiče a 2 ks milimetrového papiera.

Pozn.: V nevyhnutnom prípade môžete požiadať o informáciu prítomného pedagóga.

Upozornenie: Pri zapojení elektrického obvodu dbajte na správnu polaritu spojenia zdroja napätia a jednotlivých prechodov P-N diódy. Prekročenie medznej hodnoty anódového prúdu $I_{Amax} = 20 \text{ mA}$ môže spôsobiť tepelné zničenie prechodu P-N diódy.

Pokiaľ nekonáte meranie, odporúčame prerušiť obvod spínačom S1 (šetrenie batérie).

Riešenia vpisujte do priloženého dokumentu Zhrnutie výsledkov. Vaše riešenie bude hodnotené na základe výsledkov a odpovedí uvedených v Zhrnutí a grafov V - A charakteristík.

Úlohy

Ú 1: Zostavte elektrický obvod podľa schémy na obr. A3E-3. Spínač S1 môžete zapnúť až po kontrole zapojenia prítomným pedagógom. Ten potom vyznačí pridelenie bodovej hodnoty za úspešné splnenie tejto úlohy.

Ú 2: K jednotlivým anódam A1, A2, A3 priradte farby žiarenia.

Ú 3: Vykonajte merania napätia U_A a prúdu I_A pre všetky P - N prechody a zaznamenajte ich do tabuľky.

Pozn.: Pri meraní venujte osobitnú pozornosť nelineárnej časti charakteristiky.

Ú 4: Na priloženom milimetrovom papieri zostrojte v spoločnom grafe V-A charakteristiky $I_A = f(U_A)$ všetkých troch P-N prechodov. V grafe zostrojte priamky zodpovedajúce lineárnym častiam jednotlivých V-A charakteristík a s presnosťou na 3 platné číslice určte hodnoty prahového napätia U_p .

Ú 5: S použitím získaných hodnôt U_p určte pre každú V-A charakteristiku hodnotu Planckovej konštanty, ak uvažujete vlnové dĺžky farieb emitovaných priechodmi $\lambda_R = 690 \text{ nm}$, $\lambda_G = 530 \text{ nm}$

- a $\lambda_B = 440 \text{ nm}$. Pre každú získanú hodnotu určte relatívnu odchýlku (v percentách) od tabuľkovej hodnoty Planckovej konštanty.
- Ú 6: Na základe výsledkov predchádzajúcich úloh určte, ktorý z prechodov vyžaruje svetlo na základe primárnej elektroluminiscencie a ktorý na základe sekundárnej fotoluminiscencie. Odpoveď zdôvodnite.
- Ú 7: Puzdro diódy zatieníte priloženou bužírkou a pre jednotlivé priechody RGB LED určte hodnoty napätia U_A , pri ktorých vidíte, že prechod začína vyžarovať svetlo. Pre hodnoty prúdu $I_A \approx 1,00 \text{ mA}$ určte hodnoty napätia U_{A1} . Zo získaných hodnôt určte pre jednotlivé farby zodpovedajúci tok fotónov dn/dt (počet fotónov za jednotku času), ak predpokladáte, že účinnosť premeny elektrického príkonu na svetlo je $\eta = 80 \%$.
- Ú 8: Vedecký, technický a ekonomický význam LED svetelnej techniky bol medzinárodným spoločenstvom ocenený aj tým, že rok 2015 bol označený za rok svetla. 5. marec 2015 je európskym dňom objavov použitím svetla v experimentoch. Uveďte tri, podľa vás najdôležitejšie, výhody a tri nevýhody svetelnej LED techniky

56. ročník Fyzikálnej olympiády – Úlohy celoštátneho kola kategórie A

Autori úloh: Klivanec Daniel, Lacsny Boris
Recenzia a úprava: Klivanec Daniel, Mucha Ľubomír
Redakcia: Čáp Ivo
Slovenská komisia fyzikálnej olympiády
Vydal: IUVENTA – Slovenský inštitút mládeže, Bratislava 2015

Úloha 4: Vložte graf na milimetrovom papieri.

Hodnoty prahového napätia pre jednotlivé prechody:

Farba žiarenia	U_p/V
Červená	
Zelená	
Modrá	

Úloha 5:

Vzorový výpočet:

--

Farba	h_i	δh_i [%]
Červená		
Zelená		
Modrá		

Úloha 6:

Odpoveď označte krížikom.

Farba	Elektroluminiscencia	Fotoluminiscencia
Červená		
Zelená		
Modrá		

Zdôvodnenie:

--

Úloha 7:

Farba žiarenia	U_A / V
Červená	
Zelená	
Modrá	

Vzorový výpočet toku fotónov:

Farba	U_{A1} / V	$I_A \approx 1,00 \text{ mA}$	dn/dt
Červená			
Zelená			
Modrá			

Úloha 8:

Výhody:

.....
.....
.....

Nevýhody:

.....
.....
.....