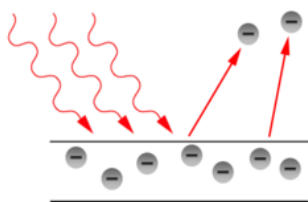


## Experimentální úloha

### Určení velikosti zakázaného pásu energie (energy band gap) polovodičových tenkých vrstev

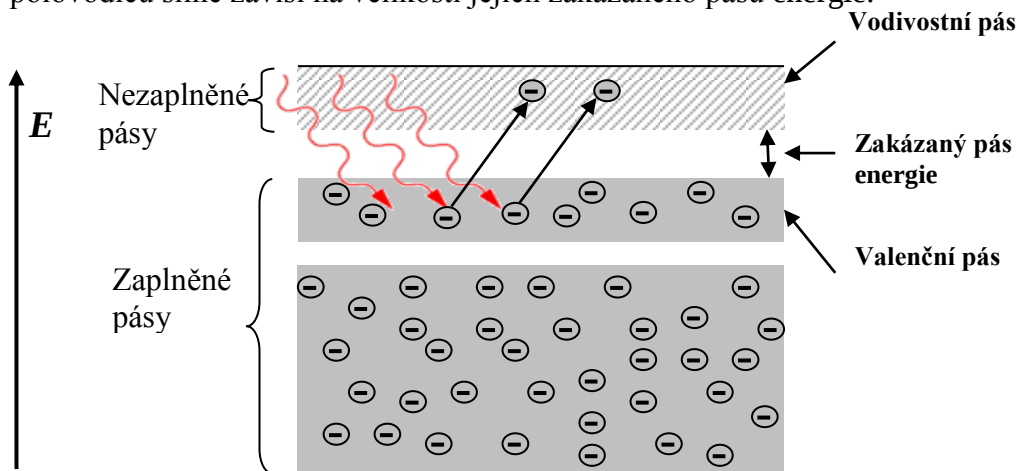
#### I. Úvod

*Polovodiče* lze zhruba charakterizovat jako materiály, jejichž elektronické vlastnosti spadají někde do “mezery” mezi vlastnostmi vodičů a vlastnostmi izolantů. Abychom porozuměli elektronickým vlastnostem polovodičů, začněme s fotoelektrickým efektem, jakožto dobře známým jevem. Fotoelektrický efekt je kvantový elektronický jev – látka, která absorbuje dostatečnou energii elektromagnetického záření (tj. fotonů), emituje fotoelektrony. Minimální energie potřebná k emisi elektronu z kovu vystaveného elektromagnetickému záření (tj. fotoelektronu) je definována jako “výstupní práce”. Tedy, pouze fotony s frekvencí  $\nu$  vyšší než charakteristický práh, tj. s energie  $h\nu$  ( $h$  je Planckova konstanta) větší než je výstupní práce daného materiálu, jsou schopny vyrazit z materiálu fotoelektrony.



**Obrázek 1. Ilustrace emise fotoelektronů z kovové desky:** Dopadající foton musí mít energii větší než je výstupní práce materiálu

Podstata výstupní práce ve fotoelektrickém efektu je vlastně blízká podstatě zakázaného pásu energie polovodičového materiálu. Ve fyzice pevných látek definujeme u izolantů a polovodičů zakázaný pás energie  $E_g$  jako rozdíl mezi nejvyšší energie valenčního pásu a nejnižší energie vodivostního pásu. Valenční pás je zcela zaplněn elektrony a vodivostní pás je prázdný. Nicméně elektrony mohou přejít z valenčního do vodivostního pásu, pokud získají dostatečnou energii (minimálně rovnou velikosti zakázaného pásu energie). Vodivost polovodičů silně závisí na velikosti jejich zakázaného pásu energie.



**Obrázek 1. Schéma energetických pásů polovodiče**

Technicky lze zakázaný pás energie upravovat a měnit jeho vlastnosti změnou složení polovodičových slitin. Nedávno bylo prokázáno, že změnou nanostruktury polovodičů lze manipulovat s jejich zakázanými pásy.

V této experimentální úloze budeme měřit velikost zakázaného pásu energie tenké vrstvy polovodiče, který obsahuje nano-částicový řetízek oxidu železitého ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), použitím optických metod. Abychom tuto velikost zakázaného pásu energie změřili, budeme studovat optické absorpční vlastnosti průhledné vrstvy. Využijeme optické spektrum prošlého světla. Zhruba řečeno, absorpční spektrum vykazuje ostrý nárůst, pokud se energie dopadajících fotonů rovná velikosti zakázaného pásu energie.

## II. Experimentální zařízení

Následující položky naleznete na vašem pracovním stole:

1. Velká bílá krabice obsahující spektrometr s halogenovou lampou.
2. Malá krabička obsahující vzorek polovodičové vrstvy, skleněnou podložku, držák na vzorek, mřížku a fotorezistor.
3. Multimetr.
4. Kalkulačka.
5. Pravítko.
6. Papírová destička s otvorem v jejím středu.
7. Sada bílých samolepek.

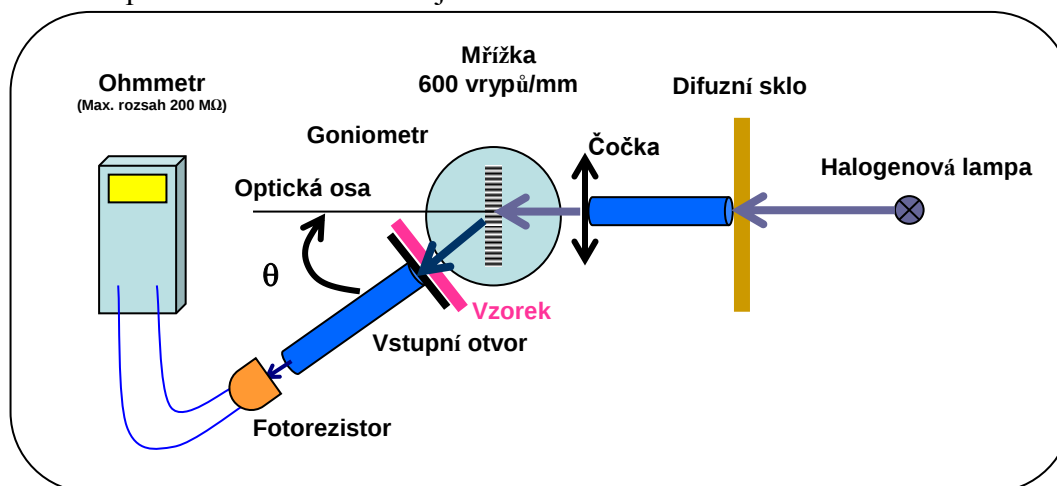
Spektrometr obsahuje goniometr (zařízení k měření úhlů) s přesností  $5'$ . Halogenová lampa připevněná k pevnému ramenu spektrometru je zdrojem záření (více informací naleznete v příloženém "Popisu přístrojů").

Malá krabička obsahuje následující položky:

1. Držák na vzorek se dvěma okénky. V jednom okénku je namontovaná skleněná podložka (sklíčko) potažená tenkou vrstvou  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ve druhém nepotažená skleněná podložka.
2. Fotorezistor připevněný do držáku - použijete jako detektor světla.
3. Průsvitná difrakční mřížka (600 vrypů/mm).

**Poznámka:** Nedotýkejte se povrchu žádné součásti z malé krabičky!

Schéma experimentálního zařízení je na obrázku 3:



Obrázek 3. Schéma experimentálního zařízení

### III. Metody

Propustnost tenké vrstvy je závislá na vlnové délce dopadajícího světla  $T_{film}(\lambda)$  podle vztahu

$$T_{film}(\lambda) = I_{film}(\lambda) / I_{glass}(\lambda), \quad (1)$$

kde  $I_{film}$ , resp.  $I_{glass}$  značí intenzitu světla prošlého potaženým sklíčkem, resp. intenzitu světla prošlého nepotaženým sklíčkem. Hodnotu  $I$  je možné měřit detektorem světla, např. fotorezistorem. Elektrický odpor fotorezistoru klesá se vzrůstající intenzitou dopadajícího světla. Intenzita  $I$  se poté vypočte z následujícího vztahu

$$I(\lambda) = C(\lambda)R^{-1}, \quad (2)$$

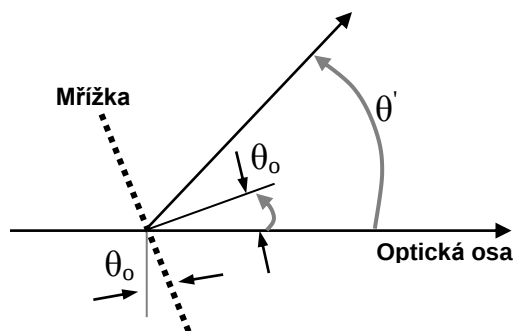
kde  $R$  je elektrický odpor fotorezistoru a  $C$  je koeficient závislý na vlnové délce  $\lambda$ .

Průsvitná mřížka ve spektrometru ohýbá různé vlnové délky světla pod různými úhly. Chceme-li tedy studovat změny  $T$  v závislosti na  $\lambda$ , stačí měnit úhel fotorezistoru ( $\theta'$ ) vzhledem k optické ose (definované směrem světelného paprsku dopadajícího na mřížku), jak ukazuje obrázek 4.

Ze základní rovnice difrakce na mřížce

$$n\lambda = d[\sin(\theta' - \theta_0) + \sin \theta_0] \quad (3)$$

je možné vypočítat úhel  $\theta'$  odpovídající určité  $\lambda$ :  $n$  je celé číslo reprezentující řád difrakce,  $d$  je mřížková konstanta (vzdálenost odpovídajících okrajů dvou nejbližších vrypů) a  $\theta_0$  je úhel, který svírá vektor kolmý na mřížku s optickou osou (viz obr. 4). (V tomto experimentu se budeme snažit umístit mřížku kolmo na optickou osu. Jelikož to není možné provést s perfektní přesností, odpovídající chyba bude měřena v úhlu 1- e.)



Obrázek 4. Definice úhlů užitých v rovnici (3)

Experimentálně bylo ukázáno, že pro fotony s energie mírně větší než velikost zakázaného pásu energie platí následující vztah:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^\eta, \quad (4)$$

kde  $\alpha$  je absorpční koeficient vrstvy,  $A$  je konstanta závislá na materiálu vrstvy a  $\eta$  je konstanta určená absorpčním mechanismem materiálu vrstvy a její strukturou. Propustnost závisí na  $\alpha$  dle následujícího dobře známého vztahu:

$$T_{film} = \exp(-\alpha t), \quad (5)$$

kde  $t$  je tloušťka vrstvy.

#### IV. Úkoly:

0. Vaše aparatura a krabička se vzorky (malá krabička obsahující držák na vzorek) jsou očíslovány. Zapište **číslo aparatury (Apparatus number)** a **číslo vzorku (Sample number)** do příslušných rámečků v odpovědích.

##### 1. Nastavení a měření:

|     |                                                                                            |       |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-a | Podle stupnice nonia goniometru zapište maximální přesnost měření úhlů ( $\Delta\theta$ ). | 0,1 b |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

**Poznámka:** Na požádání můžete dostat lupu.

##### Krok 1:

Zapněte halogenovou lampu a nechte ji zahřát. Raději lampu v průběhu celého experimentu nevypínejte. Jelikož se halogenová lampy zahřívají, dávejte prosím během experimentu pozor, abyste se jí nedotkli.

Umístěte lampu co možná nejdále od čočky, získáte tak rovnoběžný svazek světelných paprsků.

Nyní provedeme hrubé nastavení nuly goniometru bez použití fotorezistoru. Povolte fixační šroub otočného ramene 18 (uvolněte rameno) a vizuálně nastavte otočné rameno rovnoběžně s optickou osou. Nyní pevně dotáhněte šroub 18, zafixujte otočné rameno. Povolte fixační šroub nonia 9 a otočte stojan do nulové polohy na stupnici nonia. Nyní zafixujte nonius, pevně utáhněte šroub 9 a použijte šroub jemného nastavení nonia (šroub 10) k nastavení nuly na stupnici nonia. Připevněte mřížku do držáku. Otočte stojan mřížky tak, aby mřížka byla v poloze přibližně kolmé na optickou osu. Vložte papírovou destičku s otvorem před zdroj světla a otvor umístěte tak, aby paprsek dopadal ze zdroje světla na mřížku. Opatrně otáčejte mřížkou, dokud světelný terč (prasátko) odraženého světla nebude dopadat na otvor. Pak odražený světelný paprsek splývá s dopadajícím.

|     |                                                                                                                                                           |       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-b | Změřte vzdálenost mezi otvorem a mřížkou. Pomocí této vzdálenosti odhadněte přesnost nastavení mřížky kolmo na optickou osu ( $\Delta\theta_o$ ).         | 0,3 b |
|     | Nyní otáčením otočného ramene určete a zapište rozsah úhlů, pro které pozorujete difrakci prvního řádu viditelného světla (od modrého světla po červené). | 0,2 b |

##### Krok 2:

Připevněte nyní fotorezistor na konec otočného ramene. K optickému seřízení měřícího zařízení pomocí fotorezistoru povolte šroub 18 a jemně otáčejte otočným ramenem tak, aby fotorezistor měl nejmenší odpor. Pro jemné doladění pevně utáhněte šroub 18 a použijte šroub jemného nastavení otočného ramena.

Pomocí šroubu jemného nastavení nastavte nulu na stupnici nonia.

|     |                                                                                                                                         |       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-c | Zapište naměřenou minimální hodnotu odporu ( $R_{\min}^{(0)}$ ).                                                                        | 0,1 b |
|     | Vaše nastavení nuly je nyní přesnější, zapište přesnost tohoto nového nastavení ( $\Delta\varphi_0$ ).                                  | 0,1 b |
|     | Poznámka: $\Delta\varphi_0$ je chyba v nastavení rovnoběžnosti, tj. je mírou různoběžnosti nulové polohy otočného ramene a optické osy. |       |

- **Nápověda:** Po skončení tohoto úkolu utáhněte fixující šrouby nonia. Utáhněte také šroub v držáku fotorezistoru (pro jeho fixaci) a neodstraňujte jej během experimentu.

### Krok 3:

Nastavte pohyblivé rameno do oblasti difrakce prvního řádu. Nalezněte úhel, ve kterém je odpor fotorezistoru minimální (tj. maximální intenzita světla). Pomocí polohovacích šroubů můžete mírně měnit sklon stojanu mřížky, abyste dosáhli ještě menší hodnoty odporu.

|     |                                                                                           |       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-c | Zapište pozorovanou minimální hodnotu odporu ( $R_{\min}^{(1)}$ ) do příslušného rámečku. | 0,1 b |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

Nyní je třeba znovu zkontrolovat kolmost mřížky na optickou osu s ohledem na nastavení nuly. K tomu musíte tedy použít metodu splnutí odraženého paprsku s dopadajícím, viz krok 1.

- **Důležité:** Provádějte všechna další měření v temnu (s uzavřeným víkem krabice).

**Měření:** Přišroubujte držák vzorku na otočné rameno. Před tím, než začnete měřit, zkontrolujte vzhled vaší polovodičové vrstvy (vzorku). Vložte vzorek před vstupní otvor  $S_1$  na otočném rameni tak, aby stejnoměrně potažená část vzorku zakrývala otvor. Abyste se ujistili, že budete stále pracovat se stejnou částí vzorku, udělejte si značky na držáku vzorku a na otočném rameni pomocí bílých samolepek.

**Pozor:** Při měření větších odporů je nutné ponechat fotorezistor relaxovat. Proto při každém měření v této oblasti počkejte 3 až 4 minuty před zaznamenáním výsledku měření.

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-d | Měřte odpor fotorezistoru pro nepotažené sklíčko a pro sklíčko potažené polovodičovou vrstvou jako funkci úhlu $\theta$ (hodnota úhlu mezi fotorezistorem a vámi určenou optickou osou odečtená ze stupnice goniometru). Poté vyplňte tabulku 1d. Budete potřebovat nejméně 20 měřících bodů v rozsahu, který jste určili v kroku 1b. Provádějte svá měření při vhodném rozsahu ohmetru. | 2,0 b |
|     | Uvažujte chybu příslušnou každému měřicímu bodu pouze na základě odečítání ohmetru.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,0 b |

### Krok 4:

Přesnost, s kterou jsme dosud měřili, je stále omezená, neboť není možné seřadit otočné rameno s optickou osou, resp. kolmou polohu mřížky k optické ose se 100% přesností. Potřebujeme tedy nalézt asymetrii měřené prostupnosti na obou stranách od optické osy (vyplývající z odchylky kolmice ke mřížce od optické osy ( $\theta_0$ )).

Abyste změřili tuto asymetrii, postupujte podle následujících kroků:

|     |                                                                                                                                                                                           |       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1-e | Nejprve změřte $T_{film}$ pro $\theta = -20^\circ$ . Poté změřte hodnoty $T_{film}$ pro několik různých úhlů okolo $+20^\circ$ . Vyplňte tabulku 1e (můžete použít hodnoty z tabulky 1d). | 0,6 b |
|     | Zakreslete závislost $T_{film}$ na $\theta$ a vizuálně proložte body křivkou.                                                                                                             | 0,6 b |

Na vaší křivce nalezněte úhel  $\gamma$ , pro který je hodnota  $T_{film}$  rovna té hodnotě  $T_{film}$ , kterou jste naměřili pro  $\theta = -20^\circ$  ( $\gamma \equiv \theta|_{T_{film}=T_{film}(-20^\circ)}$ ). Označte odchylku tohoto úhlu od  $+20^\circ$  jako  $\delta$ , jinými slovy

$$\delta = \gamma - 20^\circ. \quad (6)$$

|     |                                               |       |
|-----|-----------------------------------------------|-------|
| 1-e | Zapište hodnotu $\delta$ do určeného rámečku. | 0,2 b |
|-----|-----------------------------------------------|-------|

Pak lze pro difrakci prvního řádu zjednodušit rovnici (3) následujícím způsobem:

$$\lambda = d \sin(\theta - \delta/2), \quad (7)$$

kde  $\theta$  je úhel odečtený ze stupnice goniometru.

## 2. Výpočty:

|     |                                                                                                                                                                                                                                                          |       |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2-a | Užitím (7) vyjádřete $\Delta\lambda$ v závislosti na chybách ostatních parametrů (předpokládejte, že $d$ je přesné a není zatíženo žádnou chybou). Použijte také rovnice (1), (2) a (5) k vyjádření $\Delta T_{film}$ v závislosti na $R$ a $\Delta R$ . | 0,6 b |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

|     |                                                                        |       |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2-b | Zapište rozsah hodnot $\Delta\lambda$ v oblasti difrakce prvního řádu. | 0,3 b |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-------|

|     |                                                                                                                                       |       |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2-c | Na základě naměřených hodnot z úkolu 1, vyplňte tabulku 2c pro každé $\theta$ . Vlnová délka by měla být počítána užitím rovnice (7). | 2,4 b |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2-d | Zakreslete $R_{glass}^{-1}$ a $R_{film}^{-1}$ jako funkci vlnové délky společně do stejného grafu. Povšimněte si, že na základě rovnice (2) nám chování $R_{glass}^{-1}$ a $R_{film}^{-1}$ může poskytnout rozumné indicie o chování $I_{glass}$ a $I_{film}$ . | 1,5 b |
|     | Do tabulky 2d zapište vlnové délky, pro které dosahují $R_{glass}$ a $R_{film}$ svých minimálních hodnot.                                                                                                                                                       | 0,4 b |

|     |                                                                                                                                                                                  |       |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2-e | Zakreslete graf závislosti $T_{film}$ na vlnové délce pro polovodičovou vrstvu (vzorek). Tato veličina také reprezentuje změny propustnosti vrstvy v závislosti na vlnové délce. | 1,0 b |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|

## 3. Analýza dat:

Dosazením za  $\eta = 1/2$  a  $A = 0.071 \text{ ((eV)}^{1/2}/\text{nm})$  do rovnice (4) lze vypočíst hodnoty  $E_g$  a  $t$  v jednotkách eV a nm. Tohoto cíle dosáhneme nakreslením vhodného grafu v souřadnicovém systému  $x - y$  a extrapolací v oblasti splňující zmíněnou rovnici.

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |       |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>3-a</b> | Označme $x = h\nu$ a $y = (\alpha t h\nu)^2$ . Pomocí svého měření v úkolu 1 vyplňte tabulku 3a pro vlnové délky okolo 530 nm a větší. Zapište své výsledky ( $x$ a $y$ ) na správný počet platných míst založený na odhadu chyby v jednom datovém bodě.<br><u>Připomeňme, že <math>h\nu</math> má být vypočteno v eV a vlnové délky v nm.</u><br>Napište jednotku každé proměnné do závorek v prvním řádku tabulky. | 2,4 b |
| <b>3-b</b> | Zakreslete graf závislosti $y$ na $x$ .<br>Všimněte si, že parametr $y$ odpovídá absorpci polovodičové vrstvy. Proložte přímkou body v lineární oblasti okolo 530 nm.<br>Určete oblast platnosti rovnice (4) tak, že zapíšete nejmenší a největší souřadnici $x$ datových bodů, kterými jste prokládali přímkou.                                                                                                     | 2,6 b |
| <b>3-c</b> | Označte směrnici této přímky $m$ , a odvoďte výraz pro tloušťku polovodičové vrstvy ( $t$ ) a její chybu ( $\Delta t$ ) v závislosti na $m$ a $A$ (uvažujte, že $A$ není zatíženo žádnou chybou).                                                                                                                                                                                                                    | 0,5 b |
| <b>3-d</b> | Vypočtete hodnoty $E_g$ a $t$ a jejich chyby v jednotkách eV a nm. Vyplňte tabulku 3d.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3,0 b |

❖ Užitečné fyzikální konstanty potřebné pro vaši analýzu

- Rychlost světla:  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- Planckova konstanta:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- Náboj elektronu:  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$