

Fyzikální praktikum 3

Úloha 5. Šířka pásu zakázaných energií

Úkoly

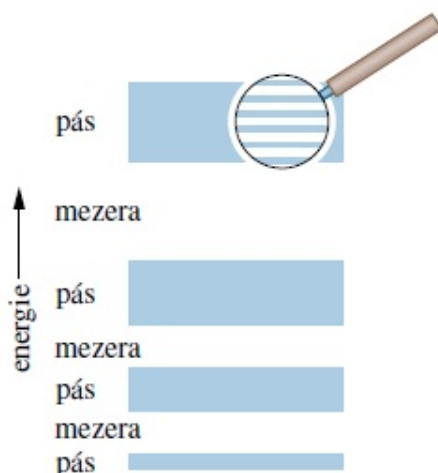
1. Pomocí fotoelektrického jevu určete šířku zakázaného pásu energií v křemíku a germaniu.

Úvod

Pevné látky můžeme obecně rozdělit na vodiče a izolátory. Vodiče pak můžeme dále rozdělit na kovy a polovodiče. Jedním z kritérií tohoto dělení může být šířka pásu zakázaných energií elektronů.

Energiové pásy

Izolovaný atom může mít pouze diskrétní energiové hladiny. Když se atomy přibližují, aby vytvořili pevnou látku, sdružují se jejich hladiny a vytvářejí energiové pásy pevné látky (obrázek 1). Tyto energiové pásy jsou vzájemně odděleny energetickými mezerami, nazývanými pásy zakázaných energií. Ty odpovídají intervalu energií, které nemůže nabývat žádný elektron. Každý energiový pás je vytvořen obrovským počtem velice blízkých hladin. Podle Pauliho vylučovacího principu může každý stav patřící těmto hladinám obsazen nejvýše jedním elektronem.



Obrázek 1: Pásová struktura pevné látky. Zvětšený pohled ukazuje, že každý pás se skládá z velmi velkého počtu velmi blízkých energiových hladin.

Izolátory

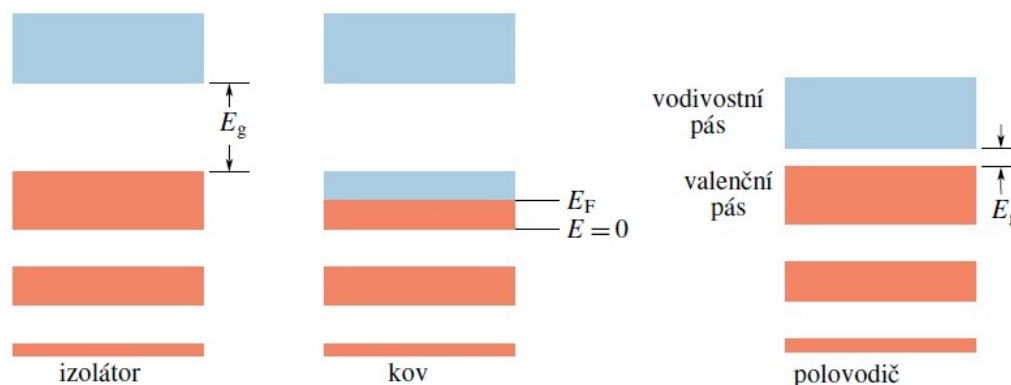
V izolátoru je nejvyšší pás obsahující elektrony zcela zaplněn a je oddělen od neobsazeného pásu tak velkým zakázaným pásem, že elektrony obecně nemohou být dostatečně tepelně aktivovány, aby ho přeskročily.

Kovy

Kovy mají naopak valenční a vodivostní pásy uspořádaný tak, že se částečně překrývají. Šířka zakázaného pásu je nulová.

Polovodiče

Pásová struktura polovodiče je podobná struktuře izolátoru s tím rozdílem, že šířka zakázaného pásu E_g polovodiče je mnohem menší. U křemíku (polovodič) je při pokojové teplotě vybudena vlivem tepelné aktivace malá část elektronů do vodivostního pásu, a tím vznikne ve valenčním pásu stejný počet děr. Elektrony i díry jsou nosiči náboje.



Obrázek 2: Vlevo je schématické znázornění pásové struktury izolátoru. Zaplněné hladiny jsou zobrazeny červeně. Nejvyšší zaplněná hladina leží na vrcholu pásu a další vyšší prázdňá hladina je od ní oddělena relativně velkou energiovou mezerou - zakázaným pásem E_g . Uprostřed je pásová struktura kovu. Nejvyšší zaplněná hladina - Fermiho hladina - E_F , leží blízko středu pásu. Protože prázdňé hladiny jsou k dispozici uvnitř téhož pásu, elektrony v pásu mohou snadno měnit hladiny a tak může docházet k vedení elektrického proudu. Pásová struktura polovodičů připomíná strukturu izolátoru až na to, že pás zakázaných energií E_g je mnohem užší. Elektrony tak mají reálnou šanci ho přeskóčit působením tepelné aktivace.

Počet elektronů ve vodivostním pásu se může podstatně zvýšit dotováním např. malým množstvím fosforu - tím vznikne materiál typu n . Počet děr ve valenčním pásu se může značně zvýšit dotováním např. hliníkem - tím se vytvoří materiál typu p .

Přechod p-n

Přechod p-n je monokrystal polovodiče, jehož jedna část je dotována tak, aby vytvořila materiál typu p , a druhá část je totvána tak, aby tvořila materiál typu n . Oba tyto materiály se setkávají v rovině přechodu. V tepelné rovnováze na této rovině dojde k následujícím dějům:

1. Majoritní nosiče (elektrony na straně n a díry na straně p) difundují přes rovinu přechodu a vytvářejí difúzní proud.
2. Minoritní nosiče (díry na straně n a elektrony na straně p) jsou unášeny spádem elektrického potenciálu přes rovinu přechodu a vytvářejí driftový proud. Oba proudy mají stejnou velikost, takže výsledný proud je nulový.

3. V oblasti roviny přechodu vznikne ochuzená zóna, sestávající se převážně z donorových a akceptorových iontů.
4. Napříč ochuzenou zónou se vytvoří kontaktní napětí.

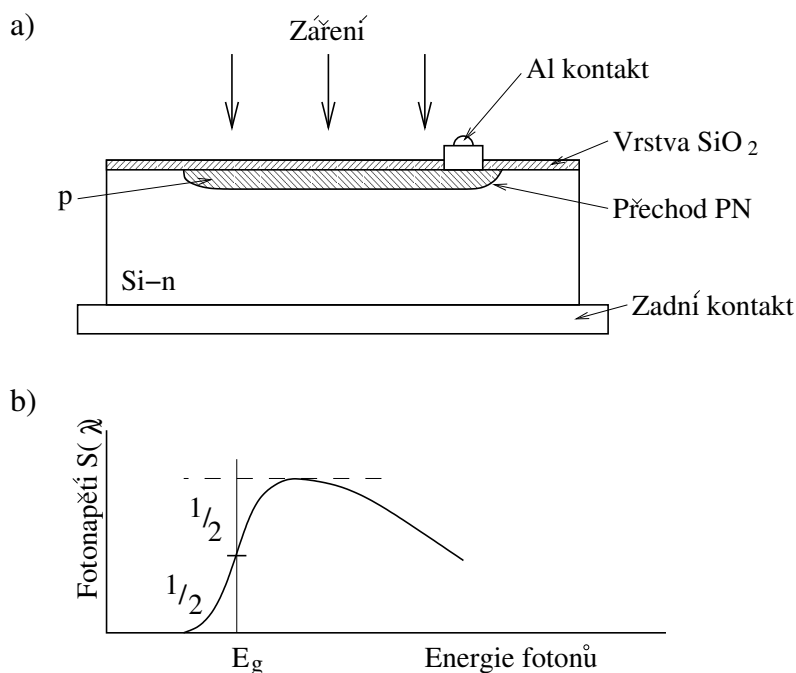
Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (emitovány) z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. viditelné světlo) látkou. Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky, pak hovoříme o vnějším fotoelektrickém jevu. V případě vnitřního fotoelektrického jevu uvolněné elektrony neopouští látku, ale zůstávají v látce jako vodivostní elektrony.

Generování vodivostních elektronů elektromagnetickým zářením nastává v případě, kdy je energie fotonu rovna nebo větší než je šířka zakázaného pásu. Dochází k uvolnění elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Pokud se tak děje okolí PN přechodu, jsou tyto nadbyteční (z pohledu tepelné rovnováhy) nositelé náboje vnitřním elektrickým polem rozdělováni. Elektrony tečou směrem do materiálu typu n a díry do materiálu typu p . Tím způsobují změnu prostorového náboje v okolí PN přechodu vzhledem k případu bez vnější generace. Důsledkem je změna elektrického pole v uvedené oblasti a na PN přechodu se objeví tzv. fotonapětí. Fotonapětí závisí na způsobu generace a na intenzitě záření.

Princip metody

Fotoelektrický jev budeme měřit na křemíkové a germaniové fotodiodě, což je polovodičový prvek, který obsahuje přechod PN a je určen k převádění světelného signálu na elektrický. Při jeho činnosti se využívá fotoelektrického jevu. Průřez jednoho typu diody je na obrázek 1a. V základním materiálu křemíku typu n je vytvořena např. difúzní příměsí oblast typu p a tím je vytvořen PN přechod. K oběma oblastem jsou zhotoveny kontakty. Povrch diody je chráněn vrstvou SiO_2 . Tato destička s PN přechodem bývá zalita do pryskyřice, která tvoří pouzdro diody.



Obrázek 3: (a) Schéma fotodiody a (b) Závislost fotonapětí na energii fotonů.

Záření o různé vlnové délce je v polovodiči absorbováno ve vrstvě o různé tloušťce. Tloušťka materiálu typu p musí být tedy taková, aby použité záření bylo absorbováno v blízkosti PN přechodu. Absorpce záření je totiž popsána vztahem:

$$I(x) = I_0 R \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

kde $I(x)$ je intenzita záření v hloubce x pod povrchem, R je optická odrazivost α je koeficient absorpce. Z uvedeného vztahu je vidět, že intenzita záření s hloubkou exponenciálně ubývá. Dále s klesající vlnovou délkou koeficient absorpce roste a záření je tak absorbováno blíže přechodu PN fotodiody.

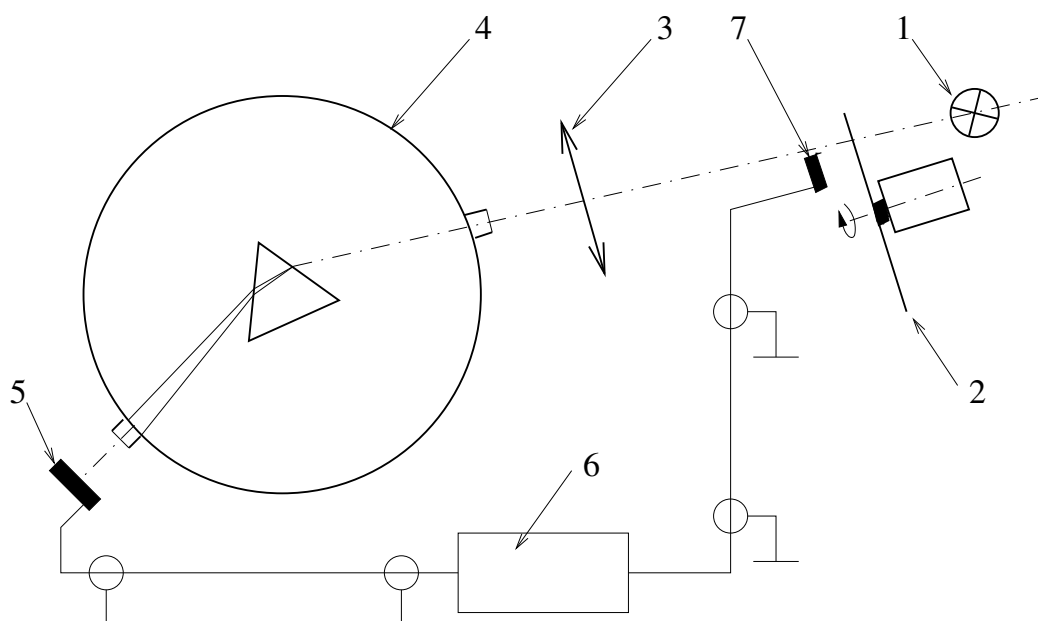
Fotonapětí tak s rostoucím absorpčním koeficientem záření nejdříve roste, dosahuje maxima, avšak v důsledku generace těsně pod povrchem mimo oblast přechodu PN opět klesá - viz. obrázek 1b.

Šířka zakázaného pásu E_g se určuje z tzv. spektrální závislosti fotonapětí připadajícího na jeden foton $S(\lambda)$, s čímž rozumíme závislost podílu měřeného fotonapětí $U(\lambda)$ a počtu $N(\lambda)$ dopadajících fotonů na vlnové délce:

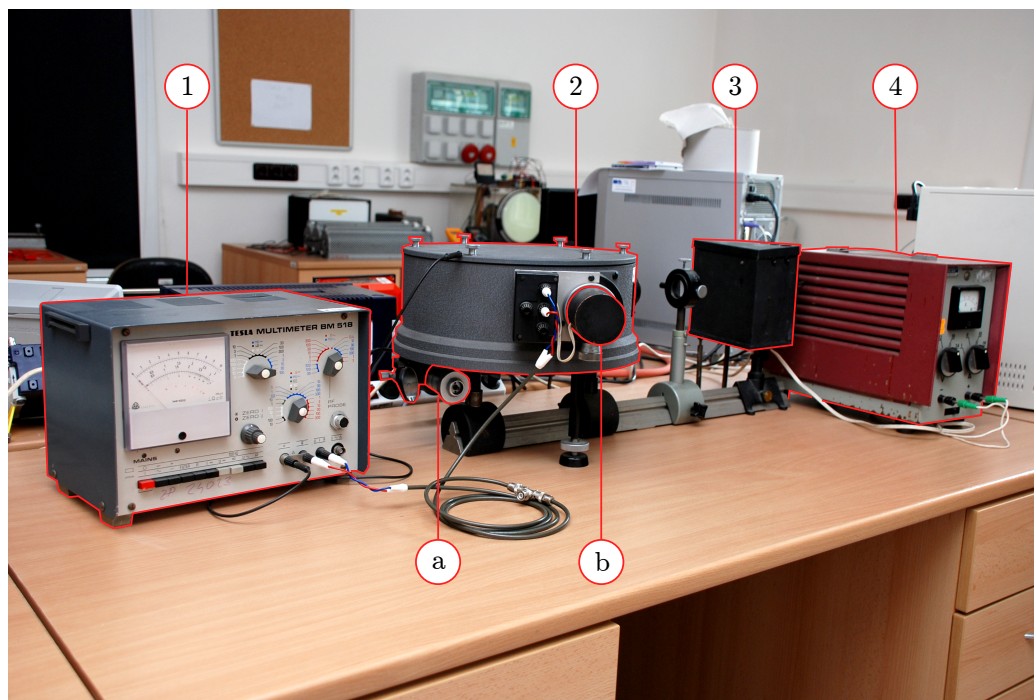
$$S(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{N(\lambda)} \quad (2)$$

Aparatura

Experimentální aparatura (4) se skládá ze dvou podstatných částí, kterými jsou optická soustava a zařízení pro měření nízkých napětí. V optické soustavě světlo halogenové žárovky prochází otvory točícího se kotouče, které přes optiku vstupuje do monochromátoru. Po výstupu dopadá přerušovaný monochromatický paprsek na polovodičový vzorek, protože je výhodnější měřit střídavý signál. Střídavý signál poté měříme střídavým nanovoltmetrem. Fotodioda s operačním zesilovačem generuje referenční signál stejné frekvence jako měřený. Jednotlivé polovodičové diody (křemíková, germániová) jsou vyměnitelné. **Je třeba dbát na to, aby světlo dopadalo bezpečně na aktivní oblast fotodiody!**



Obrázek 4: Schéma aparatury: 1 halogenová žárovka, 2 - točící se kotouč, 3 - optika, 4 - monochromátor (uvnitř je hranol), 5 - polovodičový dioda, 6 - střídavým nanovoltmetrem, 7 - fotodioda s operačním zesilovačem.



Obrázek 5: Aparatura pro měření úlohy: (1) Nanovoltmetr. (2) Monochromátor, který obsahuje a) mikrometrický šroub pro otáčení hranolu, b) krytka s fotodiódou. (3) Žárovka s kotoučem. (4) Zdroj napětí pro žárovku.

Postup měření

1. Zkontrolujte zapojení dle obrázku 4. Zaměřte se především na zdroj napětí pro referenční signál (15 V), připojení koaxiálního kabelu s referenčním signálem k nanovoltmetru, napájení žárovky a na propojení koaxiálním kabelem měřenou diodu a nanovoltmetr.
2. Pro měření použijte křemíkovou i germaniovou diodu.
3. Při měření dbejte na to, aby světlo dopadalo bezpečně na aktivní oblast fotodiody.
4. Nastavte vstupní štěrbinu na 10-20 μm .
5. Nastavte výstupní štěrbinu na 5-20 μm .
6. Pro každou diodu změřte závislost $U = f(\lambda)$.
 - (a) Vzhledem k použité optické soustavě, je hranol nastavován pomocí otočného mikrometrického šroubu, jehož polohu zaznamenávejte. Polohy hranolu pak přepočítejte na základě tabulky uvedené na konci návodu.
 - (b) Pomocí kalibrační křivky přiložené u návodu odečtěte hodnoty $N(\lambda)$ pro ty vlnové délky, pro které jste měřili $U(\lambda)$.
 - (c) Pro každou vlnovou délku λ určíte $S(\lambda)$ dle vzorce (2).
7. Pro každou vlnovou délku λ vypočtěte energii záření dle vztahu $E = hc/\lambda$, kde h je Planckova konstanta ($h \doteq 6.626 \times 10^{-34} \text{Js}^{-1}$), c je rychlost světla ($c \doteq 3 \times 10^8 \text{m/s}$) a λ je vlnová délka.
8. Do grafu vynesete závislost $S = f(E)$ a pro poloviční výšku odečteme šířku zakázaného pásu energií E_g .

Dodatek

Tabulka pro převod nastavení mikrometrického šroubu na vlnovou délku světla vytupujícího z monochromátoru.

Cejchování monochromátoru				
$\lambda(\text{nm}) = fce(d) (\text{mm})$				
d (mm)	λ (nm)		d (mm)	λ (nm)
10.1	1895		11.1	1140
10.2	1820		11.2	1085
10.3	1740		11.3	1035
10.4	1640		11.4	985
10.5	1580		11.5	935
10.6	1505		11.6	895
10.7	1425		11.7	855
10.8	1350		11.8	820
10.9	1275		11.9	800
11.0	1210		12.0	775
			12.1	750

Vlnová délka světla λ (nm) jako funkce nastavených dílků monochromátoru d (mm), λ (nm) = $fce(d)$ (mm). Při podrobnějších údajích dílků je možné hodnoty vlnových délek v daném intervalu lineárně interpolovat.