

9. Absorpční hrana u polovodičů

K přechodu elektronu z valenčního pásu do pásu vodivostního v polovodičích nebo izolátorech je zapotřebí energie větší nebo rovné šířce zakázaného pásu E_g . Jednou z forem energie, která může tento přechod vyvolat, je záření (fotony). Nejmenší energie fotonu $h\nu_0$, která tento přechod realizuje v případě přímých přechodů, kdy dochází k interakci jen mezi elektronem a fotonem, je právě E_g . Hodnotu energie $h\nu_0$, případně jí odpovídající vlnovou délku λ_0 nazýváme absorpční hranou. Ta u polovodičů (isolátorů) odpovídá nástupu tzv. vlastní absorpce. Absorpci charakterizuje absorpční koeficient K . Lze jej určit experimentálně z naměřené hodnoty intenzity světla prošlého studovaným vzorkem. Pro případ jednoduchého průchodu světla při kolmém dopadu v případě, že se neuplatňují vícenásobné odrazy uvnitř vzorku, platí vztah

$$I_d = I_0(1 - R)^2 e^{-Kd} \quad (1)$$

kde I_0 je intenzita dopadajícího světla

I_d je intenzita prošlého světla

R je odrazivost na rozhraní vzduch - vzorek

d je tloušťka vzorku

Absorpční hrana bývá většinou počátkem oblasti vysoké absorpce. Koeficient absorpce zpravidla prudce roste s rostoucí energií fotonů. Závislost $K = f(h\nu)$ podává řadu informací o pevné látce. Přesné vystižení relace mezi K a $h\nu$ podává informaci o druhu elektronových přechodů a rozbořením této závislosti lze určit E_g , případně i další parametry dané látky, např. energii fononů. Studium spektrální závislosti koeficientu absorpce $K(h\nu)$ při různém tlaku p , teplotě T , koncentraci příměsí N , intenzitě elektrického pole E aj., umožňuje určení koeficientů dE_g/dp , dE_g/dT , dE_g/dN , dE_g/dE aj., vyjadřujících závislost šířky pásu zakázaných energií na vnějších parametrech. Tyto informace jsou důležité pro vypracování pásového modelu studované pevné látky.

V závislosti na pásové struktuře látky mohou být *mezipásové přechody*:

a) *přímé* (kolmý přechod, jednoduchá interakce mezi fotonem a elektronem),

b) *nepřímé* („šikmý“ přechod, je nutná interakce elektron – foton – fonon),

I. *dovolené* (ve smyslu výběrových pravidel),

II. *nedovolené*.

Na rozdíl od nedovolených přechodů elektronů v atomech, které se neobjevují v emisních ani v jednoduchých absorpčních spektrech, lze tzv. nedovolené přechody v absorpčních spektrech polovodičů pozorovat.

Jednotlivé druhy přechodů se vzájemně liší různou závislostí $K = f(h\nu)$. Pro uvedené čtyři možnosti přechodů platí:

$$\text{přímý dovolený} \quad K = A_1(E - E_g)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{přímý nedovolený} \quad K = A_2(E - E_g)^{3/2} \quad (3)$$

$$\text{nepřímý dovolený} \quad K = A_3(E - E_g \pm E_B)^2 \quad (4)$$

$$\text{nepřímý nedovolený} \quad K = A_4(E - E_g \pm E_B)^3 \quad (5)$$

$E = h\nu$ je energie fotonu,

A_i ($i = 1, \dots, 4$) jsou konstanty, nebo výrazy slabě závislé na energii fotonu E ,

E_B je energie fononu emitovaná (+) nebo absorbovaná (-) při přechodu elektronu z valenčního do vodivostního pásu..

Z hlediska interpretace výsledků měření spektrální závislosti absorpčního koeficientu, je významný charakter závislosti K na $h\nu$. Jde tedy o to nalézt takový exponent výrazu na pravé straně rovnic (2) až (5), který nejlépe vyhovuje experimentálním datům.

Metoda měření.

Obecně se K určuje z naměřeného poměru intenzity světla prošlého I_d a dopadajícího I_0 a světla odraženého I_r a dopadajícího na planoparalelní destičku tloušťky d . Ve vzorku dochází k vícenásobnému odrazu světla. Je-li tloušťka vzorku řádově větší než vlnová délka světla, můžeme zanedbat interferenci ve vzorku a výslednou intenzitu vypočítat jako součet intenzit mnohonásobně odražených paprsků uvnitř vzorku. Tak dostaneme

$$i_r = \frac{I_r}{I_0} = R \left[1 + \frac{(1-R)^2 e^{-2Kd}}{1-R^2 e^{-2Kd}} \right] \quad (6)$$

$$i_d = \frac{I_d}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-Kd}}{1-R^2 e^{-2Kd}} \quad (7)$$

Z těchto vztahů lze určit odrazivost R i absorpční koeficient K pro známou tloušťku vzorku d . Existuje řada metod přesných i aproximativních umožňujících určit K , případně i R . Uvedeme jen ty nejjednodušší:

- a) Určí se odrazivost R na tlustém vzorku nepropouštějícím světlo, nebo na vzorku šikmo seříznutém tak, aby se neuplatňovaly odrazy na zadním rozhraní vzorek – vzduch, případně na vzorku se zdrsňenou nebo začerněnou zadní stranou. R pak spolu s naměřenou hodnotou i_d a d dosadíme do (7) a vypočítáme K .
Můžeme také postupovat tak, že použijeme graf závislosti $i_d = f(Kd)$ sestrojený pro různé hodnoty R . Pak pro dané R a experimentálně určené hodnoty i_d odečteme z grafu Kd a pro známou tloušťku vzorku d určíme absorpční koeficient K .

- b) Změříme i_d pro dva nebo více vzorků s různou tloušťkou d_j . Pak za předpokladu, že

$$R^2 e^{-2Kd} \ll 1,$$

toho lze dosáhnout vhodnou volbou tloušťky vzorků, dostaneme z (7)

$$\frac{i_{d,1}}{i_{d,2}} \cong e^{-K(d_1-d_2)} \quad (8)$$

odkud

$$K \cong \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{i_{d,1}}{i_{d,2}} \quad (9)$$

Tento způsob odpovídá zanedbání vícenásobných odrazů ve vzorku a lze jej s dostatečnou přesností využít obvykle jen v případě, že $i_d \leq 0,1$ pro oba vzorky.

V našem případě použijeme způsobu a) s tím, že odrazivost R nebudeme určovat experimentálně, ale její hodnota pro měřený polovodič a spektrální oblast v okolí absorpční hrany bude převzata z údajů publikovaných v literatuře.

Experimentální uspořádání.

Schéma experimentálního uspořádání je na obr.1. Světlo ze zdroje spojitého záření (wolframová žárovka) je soustředěno na vstupní štěrbinu \check{S}_1 Zeissova zrcadlového monochromátoru. Monochromatické světlo o vlnové délce λ z výstupní štěrbinu \check{S}_2 dopadá na vzorek umístěný v pohyblivém držáku a po průchodu vzorkem dopadá na fotodetektor, jímž je PbS fotocela (fotorezistor). Vzorek můžeme posunout tak, že jím světlo neprochází a fotodetektor měří intenzitu dopadajícího světla I_0 a po zasunutí vzorku před detektor měří intenzitu I_d . Spolu se známou odrazivostí R a tloušťkou vzorku d , kterou změříme, máme k dispozici všechny hodnoty potřebné k určení $K(\lambda)$ podle metody a).

Měření provedeme pro několik vzorků s různou tloušťkou v oblasti propustnosti až do hodnot $i_d = I_d/I_0 \approx 0,01$.

Vlnová délka se nastavuje mikrometrickým šroubem, čte se v dílcích T na bubínku monochromátoru a pomocí tabulky se převádí na vlnovou délku λ . Pro převod vlnové délky na energii fotonu použijeme vztah

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,2398}{\lambda} \quad [E] = \text{eV}, \quad [\lambda] = \mu\text{m}$$

Hledaná hodnota Kd se může určit odečtením z grafu $i_d = f(Kd; R)$ přiloženého k úloze, nebo přímo výpočtem z (7).

Měření I_0 a I_d se provádí střídavou metodou. Dopadající světlo je před vstupní štěrbinou monochromátoru přerušováno rotujícím kotoučem s výřezy a střídavý signál z PbS fotocely je měřen selektivním úzkopásmovým milivoltmetrem nebo synchronním detektorem. Fotorezistor je zapojený v sérii s rezistorem ke zdroji stejnosměrného napětí. Změna odporu fotorezistoru způsobí změny proudu v obvodu a tento střídavý proud o frekvenci $f = 120 \text{ Hz}$ shodné s frekvencí přerušovaného světla vyvolá na rezistoru střídavé napětí U , které je přímo úměrné intenzitě světla dopadajícího na PbS fotorezistor. Hodnoty U_0 a U_d se odečítají na analogové stupnici selektivního voltmetru. Zde je nutno dávat pozor na správnost nulové polohy na analogovém přístroji a na správnost čtení při přepínání rozsahů.

Vyhodnocení výsledků.

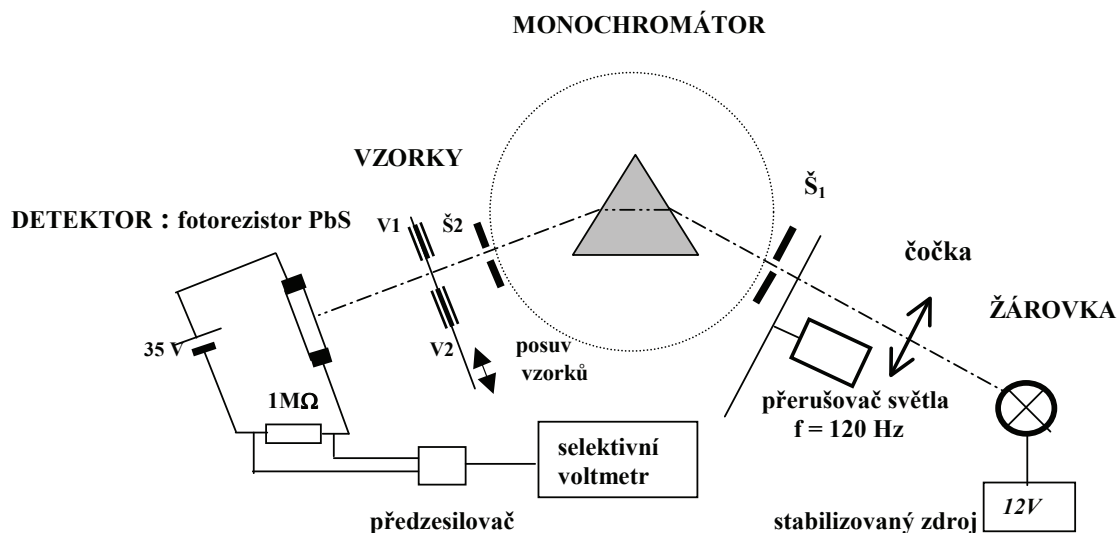
Spektrální závislost absorpčního koeficientu vyneseme do grafu v závislosti na energii fotonů. K tomu, abychom zjistili, která z uvedených závislostí (2) až (5) nejlépe vyhovuje našim experimentálním výsledkům vyneseme do grafů závislosti K^2 , $K^{2/3}$, $K^{1/2}$, $K^{1/3}$ na energii fotonů:

$$\begin{aligned} K^2 &= f(E), & K^{1/2} &= f(E), \\ K^{2/3} &= f(E), & K^{1/3} &= f(E). \end{aligned} \quad (10)$$

Je-li některá z těchto závislostí lineární, pak odpovídající exponent určuje druh přechodů elektronů ve studované látce.

Úkol:

- Sestavte a seříd'te aparaturu podle obr. 1.
- Změřte spektrální závislost propustnosti vzorků Ge a Si.
- Určete druh přechodů elektronů z valenčního do vodivostního pásu u germania a křemíku podle tvaru spektrální závislosti absorpčního koeficientu v oblasti absorpční hrany.
- Určete šířku pásu zakázaných energií E_g v Ge a Si.



Obr. 1. Schéma experimentálního uspořádání pro měření spektrální závislosti propustnosti.

Literatura:

- [1] Moss T. S.: Optical properties of semi-conductors, Butterworths Sci. Publications London, 1959
- [2] Schmidt E., Humlíček J., Lukeš F., Musilová J.: Optické vlastnosti pevných látek, SPN Praha 1986

PŘÍLOHA.

Výpočet koeficientu absorpce.

V rovnici (7) označíme $e^{-Kd} = X > 0$
a přepíšeme ji na kvadratickou rovnici

$$i_d R^2 X^2 + (1 - R)^2 X - i_d = 0$$

její řešení pro $X > 0$ je

$$X = \frac{-(1 - R)^2 + \sqrt{(1 - R)^4 + 4i_d^2 R^2}}{2i_d R^2}$$

a koeficient absorpce je

$$K = -\frac{1}{d} \ln X .$$