



4. Úloha

Určení šířky zakázaného pásu polovodičů

1 Teoretický úvod

Polovodičové materiály (polovodiče) představují v současné době jedny ze základních materiálů pro moderní elektrotechnické aplikace. Jsou využívány v elektronických zařízeních (počítače, mobilní telefony), v řídicích systémech, napájecích částech elektrických pohonů, elektronických prvků v automobilech atd.

Charakteristickou vlastností polovodičových materiálů je přítomnost tzv. pásu zakázaných energií (zakázaného pásu). Znamená to, že pohyb nosičů náboje (elektronů a děr) mezi pásem valenčním a pásem vodivostním je znesnadněn a vyžaduje dodání vnější energie. Potřebná energie je nejčastěji dodána ve formě tepla, ale může se jednat i o světelnou energii nebo energii elektrického pole. Dodání energie umožní nosičům překonání energetické bariéry a tím i vedení elektrického proudu polovodičovým materiálem.

Analogická situace nastává v případě, že elektron přechází opačným směrem, tzn. z vodivostního pásu do pásu valenčního. V tom případě se jeho energie snižuje a její přebytek je vyzařen ve formě fotonů (elektromagnetického záření) o dané energii (vlnové délce) – tzv. luminiscence. Tento jev je využíván u elektroluminiscenčních diod (LED).

V rámci úlohy si ukážeme dva možné způsoby, jak určit šířku zakázaného pásu – první bude vycházet ze sledování teplotní závislosti elektrických parametrů p - n přechodu, druhý bude využívat optické měření.

1.1 Metoda 1 – Určení šířky zakázaného pásu LED elektrickým měřením

Volt-ampérovou charakteristiku p - n přechodu polovodičové diody lze zjednodušeně popsat pomocí tzv. diodové (Shockleyho) rovnice

$$I = I_0(e^{\frac{qU}{kT}} - 1), \quad (1)$$

kde I_0 (A) je saturační (nasycený) proud v závěrném směru (hodnota cca 10^{-10} až 10^{-15} A), T (K) je termodynamická teplota přechodu, q je elementární náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C) a k je Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹). Vzhledem k tomu, že saturační proud I_0 je velice malý, lze druhou část rovnice zanedbat a pracovat pro zjednodušení jen s exponenciální částí.

V závěrném směru je saturační proud diody I_0 úměrný ploše přechodu diody a je také teplotně závislý. Závisí na třetí mocnině teploty podle rovnice



$$I_0 = A \cdot T^{(3+\frac{\gamma}{2})} \cdot e^{\left(\frac{E_g}{kT}\right)}, \quad (2)$$

kde A je plocha p - n přechodu, γ konduktivita polovodiče a E_g je šířka zakázaného pásu.

Pro dostatečně malé hodnoty rozdílu teplot jsou členy A a γ konstanty a vztah lze uvést v tvaru

$$I_0 = B \cdot e^{\left(\frac{E_g}{kT}\right)}, \text{ kde } B = A \cdot T^{3+\frac{\gamma}{2}} = \text{konst.} \quad (3)$$

a velikost saturačního proudu pak bude úměrná zejména koeficientu $e^{\left(\frac{E_g}{kT}\right)}$.

Pokud zkombinujeme rovnice (3) a (1) a zanedbáme již zmiňovanou jedničku, získáme tedy pro proud I konečný vztah

$$I = B \cdot e^{\left(-\frac{E_g}{kT} + \frac{qU}{kT}\right)}, \quad (4)$$

který obsahuje jak napěťovou, tak i teplotní závislost proudu p - n přechodem. Pokud proud p - n přechodem v průběhu měření budeme udržovat konstantní, vztah se zjednoduší do tvaru

$$C = -\frac{E_g}{kT} + \frac{qU}{kT}, \text{ kde konstanta } C = \ln \frac{I}{B}. \quad (5)$$

Vyjádřením termodynamické teploty pak rovnici převedeme do tvaru

$$T = \frac{q}{kC} \cdot U - \frac{E_g}{kC}, \quad (T = aU + b), \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{kC} q ; \quad b = -\frac{1}{kC} E_g$$

Rovnice (6) popisuje lineární závislost napěťového úbytku na p - n přechodu diody jako funkci termodynamické teploty a ze které lze získat hodnotu šířky zakázaného pásu E_g sledovaného polovodiče. Dosazením dle rovnic (7) a (8) lze pak vypočítat šířku zakázaného pásu jako podíl konstant a a b .

$$\frac{a}{q} = \frac{1}{kC}; \quad b = -\frac{1}{kC} E_g \quad (7)$$

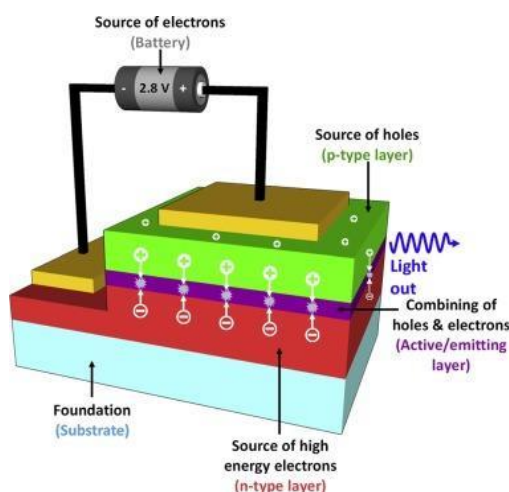
$$E_g = -\left(\frac{b}{a}\right) q \quad (J) \quad \text{nebo} \quad \frac{E_g}{q} = -\left(\frac{b}{a}\right) \quad (eV) \quad (8)$$

1.2 Metoda 2 – Určení šířky zakázaného pásu LED optickým měřením

Princip elektroluminiscenční diody je založen na rekombinaci elektronů s dírami, kdy elektron odevzdává energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu.



Vhodnými materiály jsou polovodiče s tzv. přímým přechodem (nevzniká fonon – vibrace krystalické mřížky) a větší šířkou zakázaného pásu. Používané kombinace materiálů jsou např. GaAsP, GaP, GaAlAs (červená), InGaP, SiC (zelená a modrá).



Obr. 1: Typická struktura vrstev LED (převzato z článku s DOI 10.1016/j.crhy.2017.12.001).

V případě, že se elektron nachází ve vodivostním pásu s energií E_c a díry ve valenčním pásu s energií E_v , dochází při procesu rekombinace k uvolnění (vyzáření) energie

$$\Delta E = E_c - E_v \text{ (J)}. \quad (9)$$

Mezi energií ΔE (šířkou zakázaného pásu označovanou také E_g) a frekvencí emitovaného záření platí vztah

$$\Delta E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ (J)}, \quad (10)$$

kde f (Hz) je frekvence, λ (m) je vlnová délka, h je Planckova konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s) a c představuje rychlost světla ($2,997925 \cdot 10^8$ m·s⁻¹). Pokud chceme šířku zakázaného pásu vyjádřit v běžnější energetické jednotce, elektronvoltech (eV), musíme její hodnotu ještě vydělit elementárním elektrickým nábojem q .

Pokud tedy změříme vyzařovací spektrum LED, bude šířka zakázaného pásu polovodiče odpovídat dominantní vlnové délce emitovaného záření.



2 Zadání

2.1 Zadání pro metodu 1

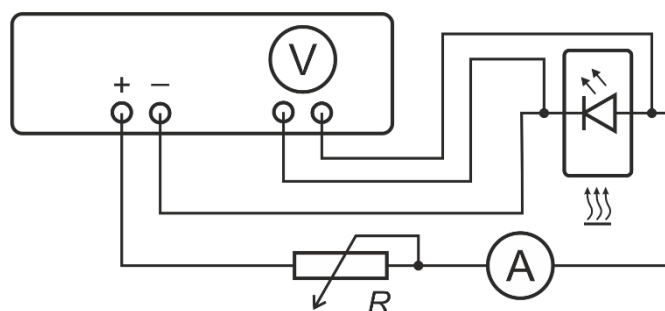
- 1) Proveďte určení šířky zakázaného pásu pro dvě předložené LED na základě měření úbytku napětí na p - n přechodu v definovaném teplotním intervalu.
- 2) Získané hodnoty napěťových úbytků pro jednotlivé teploty vynesete do grafu jako napěťovou závislost teploty ($T = f(U)$).
- 3) Určete rovnici lineární regrese získaného průběhu a ze získaných hodnot vypočtete pomocí vztahu (8) hodnotu šířky zakázaného pásu daného polovodičového materiálu.

2.2 Zadání pro metodu 2

- 1) S pomocí spektrofotometru proveďte měření emisního spektra elektroluminiscenčních diod.
- 2) Z naměřených dat určete s pomocí vztahu (10) šířku zakázaného pásu použitých polovodičových materiálů.
- 3) Na základě Tab. 1 na str. 54 v podpůrném dokumentu *VISHAY_Physics of Optoelectronic Devices* přiřadte použitý materiál elektroluminiscenční diody (uvažujte hodnoty vrcholu spektra ve 3. sloupci označeném $\lambda_p = \lambda_p$ (nm)).
- 4) Šířku zakázaného pásu vypočítanou na základě měření spektrofotometrem porovnejte s hodnotou získanou pomocí elektrického měření.

3 Použité přístroje a další laboratorní vybavení

- přípravky s elektroluminiscenčními diodami (LED ve skleněné vialce s vývody)
- propojovací přípravek
- měřicí stanice VirtualBench (využit voltmetr a zdroj stejnosměrného napětí)
- digitální multimetr ve funkci přesného ampérmetru
- magnetická míchačka s ohřevem doplněná teplotní sondou
- odporová dekáda
- spektrofotometr



Obr. 2: Schéma zapojení obvodu pro měření šířky zakázaného pásu LED
(V – voltmetr, A – ampérmetr, R – odporová dekáda).

4 Postup měření

4.1 Postup měření pro metodu 1

1. Zvolenou LED spojte s propojovacím přípravkem a připojte multimetr ve funkci přesného ampérmetru, odporovou dekádu a měřicí stanici VirtualBench (zdroj a voltmetr) dle schématu zapojení (Obr. 2). Použitý stejnosměrný zdroj představuje součást měřicí stanice VirtualBench, kdy je konkrétně použit výstup s maximálním napětím 6 V. Vývody zdroje představují svorkovnici na čelním panelu měřicí stanice (označeno *DC power supply*), do které je potřeba připojit samostatné vodiče a dotáhnout je pomocí přiloženého šroubováku. Jako voltmetr použijte vstupy panelu *Digital multimeter* měřicí stanice VirtualBench označené HI a LO (viz následující Obr. 3).



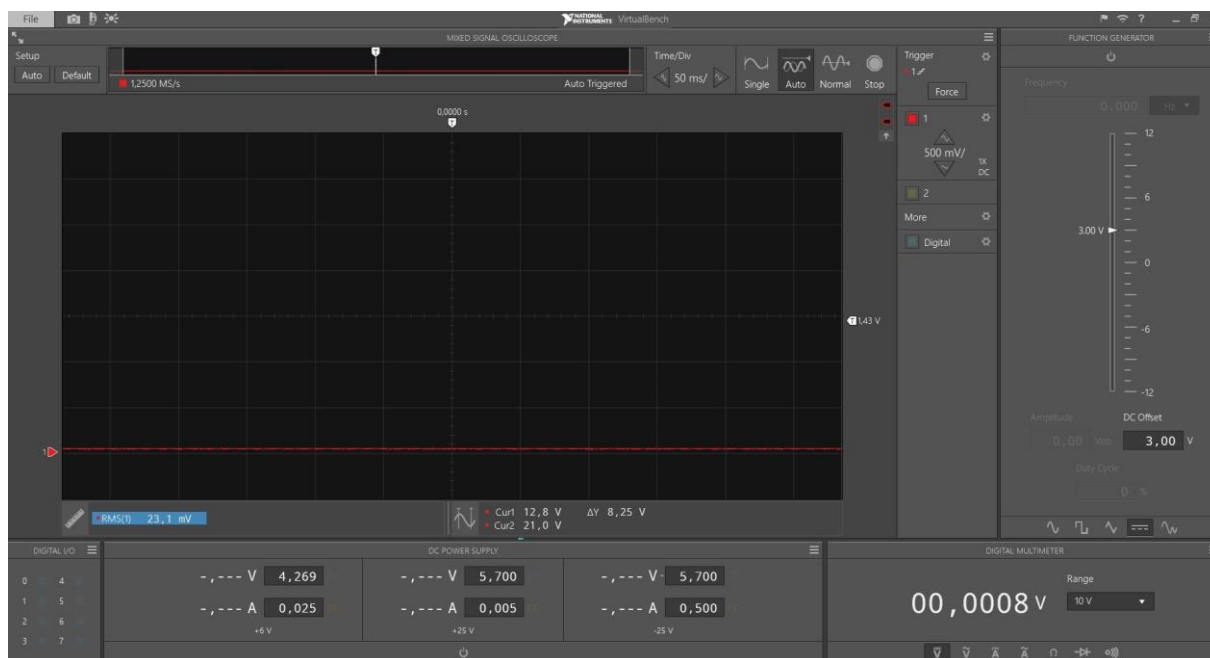
Obr. 3: Čelní panel měřicí stanice při využití zdroje a voltmetru.

2. Přístroj VirtualBench připojte k počítači pomocí USB kabelu. Pokud je vše v pořádku, tak se na počítači objeví automaticky nový virtuální disk, na kterém spustíte soubor *VirtualBench.exe*. Následně se zobrazí ovládací panel měřicí stanice dle Obr. 4.
3. Skleněnou vialku s vybranou LED vložte do kádinky naplněné vodou tak, aby plastové víčko bylo nad vodou. Dále do kádinky vložte magnetické míchadlo. Kádinku poté



umístěte na magnetickou míchačku, do skleněné vialky zasuňte teplotní sondu magnetické míchačky a míchačku zapněte tlačítkem na levé straně.

- Na odporové dekádě nastavte hodnotu odporu na 200 k Ω . Nastavte proudové omezení zdroje na 25 mA a napětí na zdroji tak, aby obvodem s LED protékal proud 10 μ A. **Nastavenou hodnotu proudu je třeba udržovat po celou dobu měření konstantní** (úpravou napětí na zdroji).
- Z voltmetru, měřícího napěťový úbytek na LED, zaznamenejte hodnotu odpovídající aktuální teplotě.



Obr. 4: Ovládací panel měřicí stanice VirtualBench zobrazený na připojeném počítači.

- Pomocí levého otočného voliče na magnetické míchačce nastavte teplotu na cca 70 °C a následně spusťte ohřev stiskem levého otočného voliče. Pomocí pravého otočného voliče nastavte hodnotu otáček na cca 250 rpm a stiskem voliče spusťte promíchávání vody v kádince. Během ohřevu míchačka na displeji přepíná zobrazení nastavené a aktuální hodnoty teploty měřené připojenou teplotní sondou.
- Zaznamenejte hodnotu napětí na LED v rozsahu teplot 30 °C až 70 °C po 5 °C. Na magnetické míchačce nastavujte postupně teplotu vždy o 40 °C vyšší, než jaká je teplota, při které bude realizován nejbližší odečet (tzn. pro 35 °C nastavte teplotu 75 °C atd.). Při odečtech hlídejte hodnotu proudu tekoucího obvodem a v případě potřeby doregulujte napětí tak, aby hodnota proudu odpovídala stále hodnotě 10 μ A.



8. Po dosažení požadované maximální teploty 70 °C vypněte míchačku a opatrně vyjměte vialku s LED. Vodu z kádinky vylijte a napusťte novou.
9. Kádinku opět umístěte na míchačku a vložte do ní vialku s druhou LED. Měřte stejným způsobem od teploty 30 °C do 70 °C opět s krokem 5 °C.

Pozn.: Při výpočtech nezapomeňte převést teplotu ve stupních Celsia na termodynamickou teplotu v kelvinech.

4.2 Postup měření pro metodu 2

1. Měřenou LED připojte přes ochranný rezistor s odporem 100 Ω k napět'ovému zdroji měřicí stanice VirtualBench. Ověřte, že proudové omezení zdroje je nastavené na 25 mA.
2. Do otvoru spektrofotometru určeného pro optickou kyvetu vložte adaptér pro měření světelných zdrojů. Správná orientace je na adaptéru naznačena šipkou, která by měla směřovat k šípce u otvoru na těle spektrofotometru.
3. Pomocí USB kabelu připojte spektrofotometr SpectroVis Plus k počítači a spusťte program *Vernier Spectral Analysis* (ikona programu je umístěna na ploše počítače). V úvodním menu programu vyberte volbu *Emisní spektrum – vs. vlnová délka (celé spektrum)*.
4. Napětí na zdroji zvyšujte do té doby, dokud obvodem nebude procházet proud 20 mA.
5. V hlavním okně programu na počítači spusťte měření tlačítkem *Spustit měření* v horní části obrazovky. Měřicí konec adaptéru umístěte proti čočce LED do takové vzdálenosti, aby nedocházelo k saturaci signálu (ořezu křivky v horní části grafu).
6. Stiskněte tlačítko *Ukončit* a pomocí kurzoru orientačně odečtěte vlnovou délku vrcholu naměřené spektrální křivky. Z menu v levém horním rohu programu vyberte volbu *Exportovat* a naměřený průběh uložte ve formátu CSV.