

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Charakterizace polovodičových materiálů
Jméno autora:	Bc. Petr Voborník
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra mikroelektroniky
Oponent práce:	RNDr. Pavel Hubík, CSc.
Pracoviště oponenta práce:	Fyzikální ústav AV ČR

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	průměrně náročné
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání je středně náročné, vyžaduje získat studiem literatury základní orientaci v transportních jevech v pevných látkách a osvojit si poměrně rozsáhlé programátorské znalosti a dovednosti.	

Splnění zadání	splněno s menšími výhradami
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Zadání práce bylo v zásadě splněno. Demonstrace funkčnosti programu (bod 3 zadání) nebyla provedena kompletně, protože studentovi se nepodařilo získat validní měření Hallova jevu. Zdůvodnění (zvolené vzorky byly buď poškozeny nebo nevykazovaly měřitelný signál Hallova jevu) je pochopitelné; nicméně vzniká otázka, zda nebylo možné zajistit jiné vzorky, nejlépe takové, u kterých by bylo možno očekávat výrazný Hallův jev. Zřejmě kvůli k omezenému rozsahu získaných experimentálních výsledků, byl proveden pouze jejich základní kvantitativní rozbor, bez pokusu o hlubší fyzikální zhodnocení.	

Zvolený postup řešení	 vynikající
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Hlavní cíl práce, vytvořit softwarové vybavení pro přístrojový systém měřící transportní vlastnosti polovodičů, určuje základní metodické kroky: 1. zpracovat programovou kontrolu používaných přístrojů a 2. implementovat fyzikální vztahy umožňující vyhodnocení experimentálních dat. Pro obojí student zvolil bezplatný systém Python, moderní flexibilní programovací jazyk, který mu umožnil vytvořit všechny klíčové části programu: komunikaci s přístroji, efektivní zpracování dat i uživatelské rozhraní. Autor nezapomněl ani na další podstatnou část každé kvalitní softwarové aplikace: nápovědu, která pomáhá uživateli si rychle osvojit práci s programem. Použitý jazyk Python je vhodný pro budoucí postupné rozšiřování aplikace; některé možnosti rozšíření student v práci naznačil. Metody řešení považují tedy za velmi dobře zvolené.	

Odborná úroveň	C - dobře
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Student byl postaven před odborné problémy jak fyzikální, tak programátorské. Zatímco teoretický rozbor se zabývá převážně fyzikálními aspekty elektrických vlastností polovodičů, tak praktická část se zabývá v úvodu popisem experimentálního vybavení a dále prezentuje výsledky vývoje softwarové aplikace, ve kterých jsou samozřejmě v druhém plánu skryty i studentovy poznatky fyzikální. Experimentální výsledky získané pomocí vyvinuté aplikace tvoří pouze malou, závěrečnou část práce. Text vykazuje výbornou odbornou úroveň v praktické části, student v ní dokázal využít i (pravděpodobně méně frekventovanou) literaturu řešící programátorské problémy, včetně např. náhrady komerčního softwaru knihovnami jazyku Python. V teoretické fyzikální části student zvolil při výkladu pojmů odpor a rezistivita méně obvyklý, avšak jistě možný postup od 1D k 3D systémům. To zřejmě ovlivnilo i jeho tvrzení v úvodní části (str. 16), kde je uveden výrok „Elektrická rezistivita p	

je definována rovnicí 19 jako podíl elektrického odporu a délky vodiče. Její jednotka je ohm na metr...“, který však nemá obecnou platnost a může být pro čtenáře matoucí.

Teoretické části bych rovněž vytknul některá nepřesná a neobratná tvrzení a termíny (např. str. 19, „pohyblivosti elektronů a děr jsou konstanty“, str. 22, „Takový typ nosiče se nazývá Donor“, str. 30, „Princip metody Van der Pauw spočívá v posílání proudu mezi dvěma rohy vzorku“, str. 31, „Charakterizace pohyblivosti nosičů náboje je velice důležitá pro přesné měření Hallova jevu“, str. 43 „midgap“) i nepřesné a nevysvětlené vzorce (vzorec (21) - v souvislosti s definicí I_1 a I_2 , vzorec (26) – veličiny r_1 a r_2 nejsou definovány). Vysvětlení čtyřbodové metody v části 2.4.3 je trochu nepřesné (spíše než rezistivity vzorku a kontaktů musíme při měření uvažovat odpory), tvrzení „hroty uprostřed slouží ke snížení odporu kontaktů“ je matoucí. Chybí mi zde i vysvětlení vztahu mezi obecnými principem čtyřbodového měření odporu a metodami Hall bar a Van der Pauwa. Samotná metoda Van der Pauwa měla být popsána přesněji už v části 2.5 (obr. 10 i text pod ním je velmi nejasný) a část 2.6 mohla být její součástí (nebo podkapitolou), stejně jako rovnice (41).

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

B - velmi dobře

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Po formální stránce je text zpracován pečlivě; i když jsem zaznamenal několik překlepů. Jazyková úroveň je dobrá, kromě výše zmíněných textových nepřesností souvisejících spíše s autorovou nedokonalou orientací v problematice se jen občas objevují některé formulační neobratnosti (str. 39, „pájka, která je postříbřená“ místo pájka s obsahem stříbra, str. 42, „v ekvilibriu uvažujeme rovnováhu...“). V popiscích pod obrázky teoretické části jsem někdy postrádal podrobnější vysvětlení symbolů. V textu jsou všechny symboly fyzikálních jednotek psány kurzívou, což je nestandardní styl. Praktickou část vhodně doplňují četné ilustrace, jako jsou vývojové diagramy, ukázky kódu, snímky počítačových obrazovek i nákresy a fotografie přístrojů; rozsah práce zůstává nicméně přiměřený.

Výběr zdrojů, korektnost citací

B - velmi dobře

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Student pracuje s literaturou dobře, počet citovaných prací je adekvátní. Práce, které se zabývají teorií transportu, jsou zastoupeny poměrně hojně, ale možná zde bylo na místě více využívat základní učebnice, což mohlo studentovi pomoci zabránit některým výše zmíněným nepřesnostem v teoretickém rozboru. Oceňuji využití manuálů a firemní příruček, které byly určitě vhodnými průvodci při tvorbě softwarové aplikace. Ve formátování citací se pravděpodobně najdou drobné chyby; např. citace [5] a [12] vypadají neúplně. Citační etika se zdá být dodržena, včetně uvádění odkazů na originální předlohy prezentovaných obrázků.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Vložte komentář (nepovinné hodnocení).

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Obsah diplomové práce Petra Voborníka ukazuje na velké úsilí, které student při jejím zpracování vyvinul. Z práce jsou zřejmé určité rezervy ve zvládnutí problematiky elektronového transportu v polovodičích i v uspořádání a formulování textu. Na druhou stranu celkové pojetí softwarové aplikace pro měření i její zpracování vykazuje vysokou úroveň. I přes drobné nedodělky bylo zadání práce splněno.

Pro obhajobu práce bych měl následující otázky:

1. Na str. 21 zmiňujete posuv Fermiho hladiny. Jak byste Fermiho hladinu definoval, a jakou její pozici lze očekávat v diamantu silně legovaném borem (jakým je pravděpodobně Váš vzorek 3-026)?
2. V souvislosti s mými poznámkami výše (v části Odborná úroveň): mohl byste stručně a výstižně definovat princip čtyřbodového měření odporu?
3. Jaký je vztah mezi rovnicemi (31) a (41) Vaší práce?
4. Jaké závislosti jsou uvedeny v grafu v levé části obrázku 38?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B - velmi dobře**.

Datum: 8.6.2022

Podpis: