

## **Oponentský posudok doktorskej dizertačnej práce Mgr. Michala Šindlera s názvom Properties of superconductors in the terahertz frequency region**

Paradoxne optickým vlastnostiam vysokoteplotných supravodičov (kuprátov aj pniktidov), ktorých základné vlastnosti sú stále nedostatočne pochopené, sa venuje veľká pozornosť, zatiaľ čo existuje len málo takýchto štúdií klasických supravodičov a úplne absentuje systematické štúdium ich vysokofrekvenčnej dynamiky ako funkcie teploty. Transmisia študovaná v magnetickom poli na konvenčných supravodičoch druhého typu v terahertzovej oblasti, teda blízko energetickej medzery, môže tiež prispieť k hlbšiemu pochopeniu dynamiky supravodivých vírov. Predkladaná práca veľmi **vhodne prispieva do aktuálnych oblastí výskumu**. Za modelový systém klasického supravodiča druhého typu bol zvolený nitrid nióbu NbN, ktorý, vo forme tenkého filmu rôznej hrúbky a pripravený na rôznych podložkách, mal kritickú teplotu od 10 do 15 K.

Dizertačná práca je napísaná výbornou angličtinou takmer bez preklepov. Je členená do 6 kapitol. **Úvod** sa zaoberá základmi optických vlastností tuhých látok, krátko sú spomenuté dielektrické vlastnosti v normálnom stave a pomerne obsérne sa rozoberajú základy supravodivosti, vrátane teórie BCS, teórie Ginzburga a Landaua a prezentovaná je tiež komplexná vodivosť supravodiča ako funkcia teploty a frekvencie elektromagnetického žiarenia. **Druhá časť** sa venuje použitým experimentálnym zariadeniam, laserovej tepelnej spektroskopii/LTS, terahertzovej spektroskopii v časovej doméne / TD TS a popisu troch používaných vzoriek. Jedna je polykryštalický NbN film na kremíku a dva NbN filmy rôznej hrúbky na zafíre. **Tretia časť** je opis Yehovho formalizmu, ktorý autor použil na numerické simulácie šírenia elektromagnetického vlnenia v anizotropnom prostredí (vzorka a podložka). **Štvrtá a piata časť** sa venujú samotným výsledkom práce dizertanta. Vo **štvrtjej časti**, venovanej spektroskopii v nulovom magnetickom poli, autor spočítal závislosť transmisie, reflexie a absorpcie od hrúbky, teploty a frekvencie NbN filmu bez podložky. Čo je dôležité z didaktického hľadiska, autor tiež vysvetlil správanie týchto troch veličín pomocou vyššie uvedenej komplexnej vodivosti  $\sigma(T, \nu)$ . Neskôr autor využil Yehov formalizmus na spočítanie transmisie dvojvrstvy supravodič/podložka. Po takejto dôkladnej príprave analyzuje, resp. porovnáva experimentálne získané transmisie na polykryštalickom filme na kremíku a filme na zafíre. Výsledky polykryštalického filmu (publikované vo Phys. Rev. B 2010) kvalitatívne zodpovedajú numerickým simuláciám, najmä ak sa berie do úvahy rozumný predpoklad nehomogenity filmu s rozptylom kritickej teploty. Oveľa lepší súhlas medzi experimentom a modelom sa dosahuje pre kvalitnejšie vzorky na zafírovej podložke (Phys. Rev. B 2011). Menšia časť meraní je urobená s polarizátorom a väčšia bez neho (lepšia intenzita elm lúča). Analýza týchto meraní poskytla informácie o uhle polarizácie v experimente. Pomocou TD TS spektroskopie autor zmeral reálnu aj imaginárnu časť vodivosti NbN filmu na zafírovej podložke ako funkciu frekvencie. Dáta boli fitované Zimmermanovým modelom. **Piata**, najrozsiahlejšia časť sa zaoberá meraniami a simuláciami

v magnetickom poli s príslušnou analýzou (Physica C, in print). Merania boli vykonané v tzv. Faradayovej (indukcia poľa  $\mathbf{B}$  kolmá na film a a polarizácia kolmá na pole) aj Voigtovej konfigurácii ((indukcia poľa  $\mathbf{B}$  paralelná s rovinou filmu a polarizácia kolmá aj paralelná s poľom). Pre popis vírov bol použitý jednoduchý model, ktorý ich predstavoval ako cylindre s normálnym stavom vo svojom vnútri, ktoré sú umiestnené v supravodivom médiu v dvoch aproximáciách (Maxell-Garnetov model a priblíženie efektívneho média). Predpokladá sa platnosť Zimmermanovho modelu aj v prítomnosti magnetického poľa. V oboch konfiguráciách a pre obe polarizácie je spočítaná komplexná vodivosť. Boli zmerané teplotné závislosti transmisie pre rôzne hodnoty magnetického poľa a merané pre frekvencie pod aj nad hodnotou energetickej medzery  $2\Delta$ . Z transmisie na polykryštalickej vzorke je určená závislosť horného kritického poľa  $B_{c2}$  na teplote a tá je extrapolovaná k nulovej teplote rôznymi modelmi. Transmisia je lepšie popísaná modelom efektívneho média. Na vzorke NbN na zafíre bol problém určiť hodnotu  $B_{c2}(0)$ , čo je dôležitý parameter v modeli. Model kvalitatívne popisuje namerané údaje. Vo Voigtovej konfigurácii ( $B$  paralelné s rovinou filmu) bolo tiež problematické určenie  $B_{c2}(0)$ . Práca končí **Záverom, Zoznamom tabuliek, skratiek a Literatúrou** s výstižným zoznamom referencií. Tiež sú v práci uvedené **reprinty 4 publikovaných prác**.

K práci mám nasledujúce poznámky a pripomienky. Formálne aj obsahovo je práca na veľmi dobrej úrovni.

- Z minima drobných preklepov uvádzam, že vektory majú byť tučným písmom a nie vždy sú. Pozri napr. str. 8.
- Odvodenie vzorca 1.28 je asi pre  $\omega\tau \gg 1$  a nie pre  $\tau \Rightarrow 0$ .
- Odvodenie reflektivity rovnej 1 pre frekvencie menšie ako plazmová by bolo zrozumiteľnejšie, ak by sa vo vzorci 1.29 rozpísal komplexný index lomu na  $n + ik$ , kde reálna časť  $n = 0$ .
- Vzorec 1.58 sa používa skôr pre špinavú limitu na určenie efektívnej (malej) koherenčnej dĺžky.
- Na str. 8 nie vysvetlené, čo je BWO spektroskopia.
- Na str. 25 sa uvádza, že transmisia je daná podielom signálu v bolometri a pyroelektrickom detektore, ale na str. 23 sa uvádza, že pomer medzi intenzitou odrazeného a transmitovaného lúča v beamspliteri/BS sa mení s frekvenciou.
- V tlačenej verzii práce chýbajú experimentálne dáta v obr. 4.9 – 4.13.
- V časti 5 autor analyzuje teplotnú závislosť  $B_{c2}(T)$  vo Faradayovej konfigurácii rôznymi modelmi. V prípade NbN je ale najreálnejšie používať model Werthammera, Helfanda a Hohenberga, podľa ktorého je  $B_{c2}(T) = 0.693 * B_{c2}(0) * (dB_{c2}/dT)_{T \rightarrow T_c}$ . Ten dáva hodnoty blízke vzorcu 5.8. Sklon  $dB_{c2}/dT$  v blízkosti  $T_c$  sa mení od vzorky NbN ku vzorke (pozri aj Refs. 26 a 48 v práci), ale aj extrapolácia WHH dáva stále hodnoty menšie, ako je tzv.

Clogstonova paramagnetická limita, takže nevidím dôvod na pochybnosti o použiteľnosti WHH modelu.

- Pre Voigtovu konfiguráciu je celkom iste vhodný Tinkhamov vzorec 5.11.
- Autor argumentuje, že neistota v určení  $B_{c2}(0)$  ovplyvňuje nezhodu medzi experimentálnou a modelovou transmisíou. Bolo toto tvrdenie testované? Potenciálnych priebehov  $B_{c2}(T)$  nie je veľa a autor by overil, či práve toto je rozhodujúci parameter.
- V práci Ref. 62 autori získali pre vzorku s  $T_c$  okolo 15 K energetickú medzeru  $2\Delta = 6$  meV a  $2\Delta/kT_c = 4,6$ . Môže autor komentovať tento fakt a porovnať to s hodnotami pre jeho vzorky?
- Techniky, ktoré rozvinul autor v dizertácii nájdu aj ďalšie uplatnenie. Vo veľmi tenkých vrstvách NbN (Ref. 48) sa možno priblížiť ku prechodu supravodič – izolátor, čo je veľmi zaujímavý predmet záujmu súčasnej fyziky (pozri napr. T.I. Baturina, EPL 97, 17012 (2012)). Vidí autor možnosti v tomto smere?

Doktorand opublikoval na danú tému 4 karentové publikácie (dvakrát Phys. Rev. B a dvakrát Physica C), kde je dvakrát prvým autorom. Práce boli prezentované na medzinárodných konferenciách. Celkove má práca vynikajúcu úroveň. Autor získal rozsiahle vedomosti a zručnosti v odbore. Zorientoval sa v teoretických základoch vysokofrekvenčných vlastností tuhých látok, najmä supravodivosti, prispel ku rozvoju experimentálnej techniky laserovej tepelnej spektroskopie a TD TS a zvládol numerické metódy a modely. Tieto skutočnosti potvrdzujú, že získal schopnosť samostatne vedecky pracovať.

Konštatujem, že dizertačná práca Mgr. Michala Šindlera priniesla cenné fyzikálne a technické poznatky prispievajúce k rozvoju vednej disciplíny. Odporúčam, aby bola práca prijatá na obhajobu v odbore 4F3 Fyzika kondenzovaných látok a materiálový výskum a po jej úspešnom vykonaní bol Mgr. Michalovi Šindlerovi priznaný titul PhD v tomto odbore.

V Košiciach 22. augusta 2012

prof. RNDr. Peter Samuely, DrSc.