

SAVREMENI SUPERPROVODNI MATERIJALI CONTEMPORARY SUPERCONDUCTIVITY MATERIALS

D. Lj. Mirjanić, J. P. Šetrajić

Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske, Banja Luka

Izvod

U ovom radu biće predstavljena najnovija istraživanja o visokotemperaturnim superprovodnim materijalima. U prvom dijelu rada biće analizirano otkriće superprovodnosti, kao i fenomen i efekti superprovodnosti i superprovodni materijali. U drugom dijelu rada biće analizirana vlastita istraživanja nanostrukturne superprovodnosti, gdje je predstavljen model ultratankih filmova, superrešetki, kvantnih žica i kvantnih tačaka. Na kraju, analiziraće se termodinamičke i transportne osobine, kao i ostvareni rezultati, te perspektive za buduća istraživanja.

Ključne riječi: nanostrukturni materijali, superprovodnici.

Abstract

In this paper will be introduced the newest research in high-temperature superconducting materials. In the first part of the paper will be analyzed discovery of superconductivity and the phenomena and effects related with this topic and the superconducting materials as well. In the second part of the paper will be analyzed our research of nanostructure superconductivity, where we will introduce the model of the ultra-thin films, quantum wires and quantum dots. In the end, we will analyze thermodynamic and transport properties, achieved results and perspectives for the future research.

Key words: nanostructural materials, superconductors.

1. UVOD

Rezerve prirodnih resursa energenata nisu nimalo optimističke. S obzirom na nagli porast potrošnje naftnih derivata, pogotovo u azijskom i afričkom području, energetska spokoj čovječanstva se sveo na još jednu deceniju. Vještački izvori kao što je nuklearno gorivo nije iscrpljivo za dugi niz godina, odnosno vijekova, ali je tu glavni problem odlaganja nuklearnog otpada koji će vrlo brzo donijeti nepremostive nevolje. Udio obnovljivih izvora energije za sada je zanemarljiv i prema preporukama evropske unije sve se čini da se on povećava do 20% ukupnog energetskeg potencijala. Jedan od energetskeg problema je svakako rasipanje energije

prilikom njene proizvodnje, transporta i korišćenja. Imajući ovo u vidu, pred fizičare-istraživače se postavljaju dva fundamentalna zadatka i to: proces kontrolisane nuklearne fuzije i sobno-temperaturske superprovodnosti. Prvi riješen zadatak otklonio bi problem sa nuklearnim otpadom, a drugi bi omogućio proizvodnju, transport i korištenje električne energije praktično bez gubitaka, jer se superprovodni materijali odlikuju odsustvom električne otpornosti, pa prema tome i odsustvom električnih gubitaka pri proticanju električne struje. Poznato je da su gubici električne energije pri njenom transportu proporcionalni veličini električne otpornosti, kvadratu jačine električne struje i vremenu trajanja tog procesa. Na vrijeme trajanja prenosa električne energije ne može se uticati, jer taj proces traje neprekidno zbog naše potrebe da je stalno koristimo. Takođe, je još u prošlom vijeku Nikola Tesla uspio da drastično smanji gubitke smanjenja električne struje upotrebom naizmjenične struje, ali s obzirom na uvećanu potrošnju oni su opet ogromni. Jedino se anuliranjem električne otpornosti, ovi gubici mogu potpuno eliminisati, a to se upravo dešava kod superprovodnih materijala. Superprovodnost je veoma zanimljiva prirodna pojava. Njena svojstva, nazivaju se makroskopski kvantni efekti, otkrivena su 1911. godine. Iako još relativno niskotemperaturski fenomen (do -100°C) njihova primjena doseže do svih oblasti svakodnevnog života čovjeka.

I danas, nakon dvije decenije od otkrića visokotemperaturnih superprovodnih keramika [1-5], mehanizam superprovodnosti još nije potpuno razumljiv. Poduzimajući istraživanja mogućih poboljšanja superprovodljivih karakteristika i neko vrijeme prije ovih otkrića [6-10], obratili smo našu pažnju na proučavanje stanja koja podižu kvalitet kritičnih parametara visoke superprovodnosti. Niskodimenzione strukture (feromagnetici, feroelektrici, dielektrici i provodnici) su modelovani i istraženi u grupi koju je vodio akademik Bratislav Tošić još u 70-im godinama prošloga vijeka. Polukonačne kristalne strukture su urađene u početku, a kasnije i film-strukture [7-19] zbog njihove interesantne karakteristike: pojave lokalizovanih površinskih stanja [7-20].

Superprovodnost

Holandski fizičar Kamerling Onnes je ispitivao promjene električne otpornosti metala na vrlo niskim temperaturama – temperaturama tečnog helijuma (ispod 4,1 K) u nadi da će otkriti mehanizam električnog provođenja, kao i nastanka, tj. postojanja električne otpornosti. Onnes je otkrio jedan izuzetan niskotemperaturski prirodni fenomen: iščezavanje električne otpornosti kod nekih metala na temperaturama iznad nule. Pojava da materijali hlađenjem do i/ili ispod određene – kritične temperature potpuno gube svoju električnu otpornost, naziva se superprovodnost. Od kako je Onnes 1911. godine uočio superprovodno stanje žive na, tj. ispod 4,1 K, stalno se težilo dobijanju novih materijala koji će imati više kritične temperature (T_C). U tom pravcu se dosta napredovalo, pa se kritična temperatura povećavala u prosjeku svakih deset godina po 2 K. Tako je 1973. godine kod jedinjenja Nb_3Ge postignuto $T_C = 23,2 \text{ K}$.

H																		He					
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Ku						
Retke zemlje			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb							

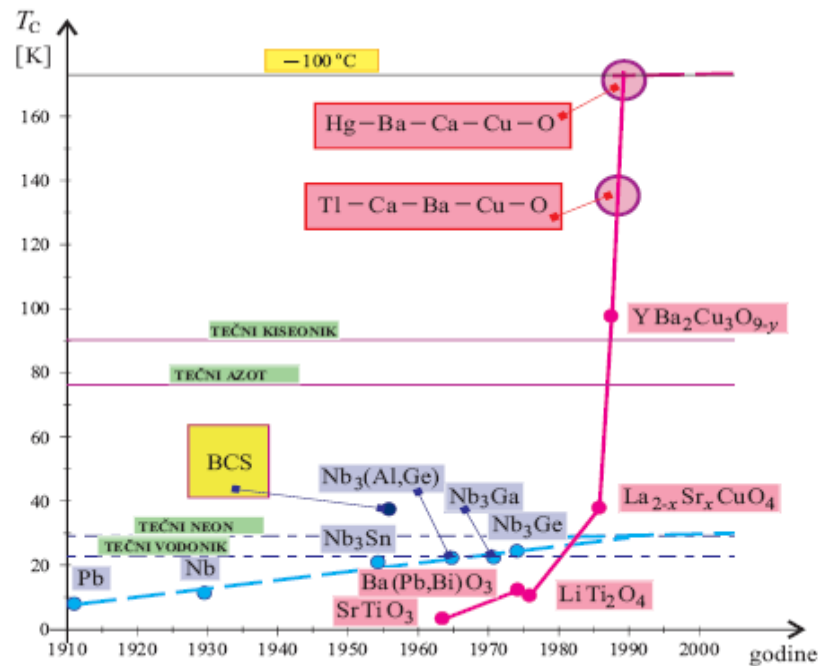
Slika 1. Superprovodne osobine elemenata

(1 – superprovodnost pri normalnom pritisku i u masivnim (balk) uzorcima; 2 – superprovodnost pri visokom pritisku; 3 – superprovodnost u tankim uzorcima)

Neposredno nakon toga, ispitano je da se superprovodnost javlja kod 45 elemenata (slika 1) i preko 1000 metalnih i poluprovodničkih legura. Kako sada stvari stoje, broj superprovodnih prelazi broj nesuperprovodnih metala, ali je sporno da li oni koji ne ispoljavaju superprovodne osobine – neće to učiniti pri nekim izmijenjenim spoljašnjim uslovima (npr. pri ekstremno povećanom pritisku, ili posebnim postupkom dodavanja primjesa – dopinogovanjem, ili specifičnim termo-mehaničkim i hemijskim pripremanjima – spaterovanjem, ...).

Nisko i visokotemperaturska superprovodnost

Svi superprovodni materijali koji superprovode do 30 K, smatraju se klasičnim ili niskotemperaturskim superprovodnicima. Ova „magična“ temperatura [5] dugo godina nije bila prevaziđena – smatralo se da će superprovodnost biti isključivo niskotemperaturski fenomen (slika 2). Međutim, poslije 1986. godine pronađeni su materijali koji superprovode i do oko – 100°C. Svi superprovodnici sa $T_C > 77$ K (a to je tačka ključanja azota) su visokotemperaturski superprovodni materijali. U pogledu fizičkih karakteristika i pokazivanja specifičnih efekata ovog „izmijenjenog“ stanja materije, nisko i visokotemperaturski superprovodnici se ne razlikuju.



Slika 2. Vremenska evolucija kritične temperature

Za praktičnu primjenu superprovodnog materijala veoma je važno da ima što višu kritičnu temperaturu, kritičnu jačinu magnetog polja i kritičnu gustinu električne struje, kao i dobre mehaničke i ostale fizičko-hemijske osobine. Energetska primjena superprovodnih materijala prije svega zbog izostanka Džulovih gubitaka se koristi u proizvodnji električne energije (superprovodni generator), kao i za prenos i akumulaciju električne energije.

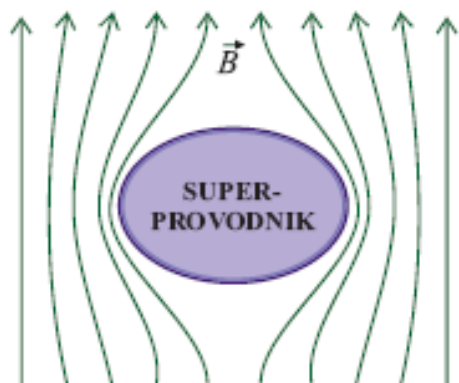
Transport električne energije bez gubitaka (pomoću superprovodnih kablova) već je realizovan na naponskoj mreži od 100 kV i snage 1 GW, a skladištenje električne energije vrši se u vidu magnetnog polja u ogromnim superprovodnim kalemovima koji se održava istrajnim električnim strujama. Primjena superprovodnih magneta ostvarena je kod magnetne separacije i nuklearne magnetne rezonancije. Najrevolucionarnija, ali i najperspektivnija primjena superprovodnosti je u nauci, elektronici i računarstvu.

Kontrola i održavanje termonuklearne reakcije nemoguća je bez izuzetno jakih magnetnih polja ostvarenih unutar superprovodnog solenoidnog magneta. Na principu „magnetnog jastuka“ konstruisani su i izgrađeni vozovi koji se koriste u tzv. levitacionom saobraćaju.

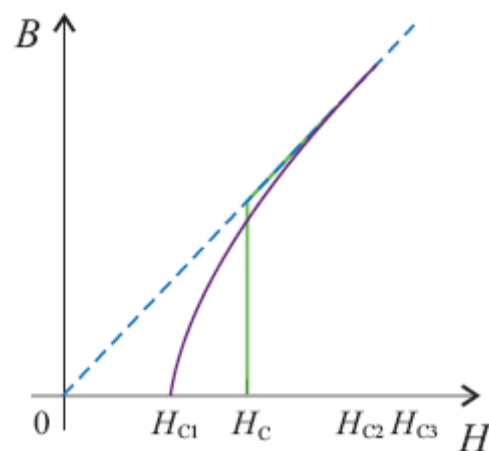
Fenomeni i efekti superprovodnosti

Za potpunije definisanje superprovodnog stanja materijala bitno je istaći efekte i specifičnosti koje prate ovu pojavu: nagli pad i potpuno iščezavanje specifične električne otpornosti na kritičnoj temperaturi; skokovita promjena specifične toplotne kapacitivnosti na kritičnoj temperaturi; dugotrajno postojanje električne struje u konturi od superprovodnog materijal, kada je ona na temperaturi ispod kritične, a u njoj ne djeluje nikakav strujni ni naponski izvor; nagli

prelazak u dijamagnetno stanje – Majnsnerov efekat (slika 3); prisustvo izotopskog i pojava Džozefsonovog efekta; pored kritične temperature, postojanja još dva kritična parametra: kritična gustina električne struje i kritična gustina magnetnog polja.

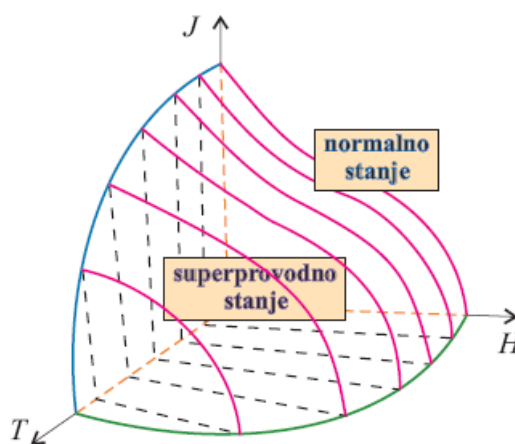


Slika 3. Majnsnerov efekat



Slika 4. Superprovodnici I i II vrste

Superprovodno stanje karakterišu tri kritična parametra: njegova temperatura (T_C), intenzitet jačine spoljašnjeg magnetnog polja (H_C) i gustina električne struje (j_C) koja kroz njega protiče. Na slici 5 je predstavljen trodimenzionalni fazni dijagram.



Slika 5. Fazni dijagram S – N prelaza

Ovaj dijagram definiše površinu u trodimenzionom $T - H - J$ prostoru (sa $T = T_C$, $H = H_C$, i $j = j_C$). Ispod ili unutar ove površine faznih prelaza, materijal se nalazi u superprovodnom stanju, a iznad, odnosno u prostoru izvan ove površine materijal je u normalnom stanju.

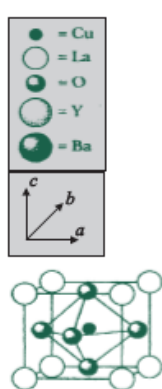
Visokotemperaturni superprovodnici

Od 1987. godine kada su objelodanjeni rezultati o otkriću „vještačkih“ organskih molekula sa 60 ugljenikovih atoma (koji superprovode do oko 70 K) i bakar-oksidnih keramika (do oko 170 K),

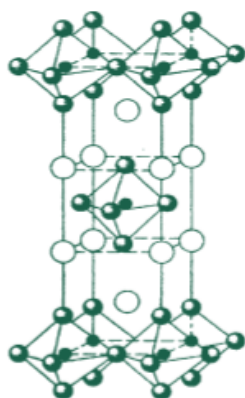
nova tehničko-tehnološka revolucija postala je sasvim blizu stvarnosti. Sinteza visokotemperaturnih materijala sa $T_C > 100$ K predstavlja početak nove tehnološke revolucije, a smatra se da će njihovom primjenom doći do većih promjena u tehničkom i tehnološkom smislu, nego što je to učinila poluprovodnička i mikroelektronska tehnologija. U tabeli 1. su predstavljene kritične temperature nekih Cu-O keramika. Zajedničko za sva ova jedinjenja je da imaju dvodimenzionu ili slojevitu strukturu (elementarna ćelija im je tetragona ili ortorombična – slika 6) i da imaju više zajedničkih osobina: postojanje Kuperovih parova; izotopski efekat je slabo izražen; superprovodne osobine izrazito zavise od defekata strukture; za ova jedinjenja je karakteristična strukturna nestabilnost i velika anizotropija (slika 7).

Tabela 1. Kritične temperature nekih Cu-O keramika

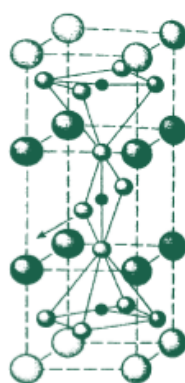
Superprovodnik	T_C [K]
$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$	30 – 40
$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{4-y}$	≤ 70
$\text{Y}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{4-y}$	≤ 90
$\text{Re}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_{2+m}\text{O}_{6+m}$	≤ 95
$\text{Bi}_2\text{Sr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$	≤ 110
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$	≤ 120
$\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$	≤ 100
$\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_y$	≤ 125
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_{m-1}\text{Cu}_m\text{O}_{2m+2}$	≤ 135
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+y}$	≤ 140



a) LaCuO_3
perovskit

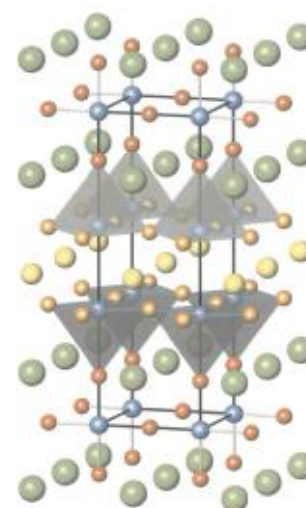


b) La_2CuO_4
slojeviti perovskit



c) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$
slojeviti perovskit sa
deformisanim kiseonikom

Slika 6. Kristalna struktura oksidnih keramika

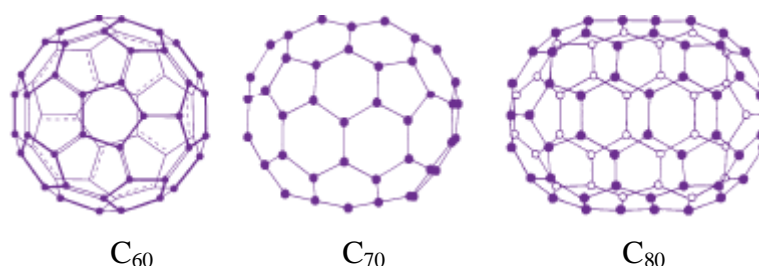


Slika 7. Anizotropija strukture
bakar-oksidnih keramika

Prostor između dvije susjedne Cu-O ravni zajedno sa ortogonalnim ravnima čine jednu specifičnu kristalnu film-strukturu sa dvije paralelne granične površine. Na taj način, na jedan specifičan

film (u okviru visokotemperaturnog superprovodnog uzorka) „nadovezuje“ se sledeći, pa sledeći, ... itd., tako da struktura ovog materijala čini posebnu slojevitou strukturu, zbog malih dimenzija, tačnije – slojevitou nanostrukturu.

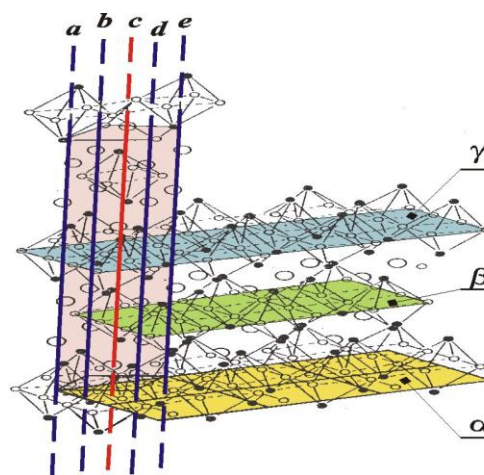
Poslednju deceniju značajan interes istraživača ponovo pobuđuju organski superprovodnici. Na osnovu hipoteze Litla, kojom se predviđa visokotemperaturna superprovodnost u linearnim organskim lancima sa polarizovanim bočnim grupama, efektivno privlačenje elektrona nastaje usljed pomjeranja valentnih elektrona u bočnim ugljovodoničnim grupama. Novija istraživanja na fulerenima, odnosno makro-molekulu (C_{60} , C_{70} i C_{80}) dala su zadivljujuće rezultate. Naime, ispostavilo se da jedan ovakav molekul (slika 8) koji je inače dielektrik na sobnoj temperaturi, postaje superprovodan kada se dopira nekim alkalnim i nekim drugim metalima (K, Rb, Cs, Tl,...). Superprovodnici na bazi fularena za sada drže rekord u kritičnoj temperaturi za organske superprovodnike, a pogotovo sa inkapsuliranim fulerenima postignute su kritične temperature i do 80 K.



Slika 8. Struktura fulerena

Nano-problematika

Otkriće visokotemperaturne superprovodnosti, njihova egzotična struktura – dopirani perovskiti i anizotropija fizičkih karakteristika, zajedno sa našim istraživanjem uticaja ovih sistema na mikroskopske osobine materijala dale su nam novu nadu i volju da temeljno radimo na konsekvencama ekstremne podjele u slojeve (npr. 2D – to su površine α , β i γ ili 1D – linije a , b , c , d i e , pokazane na slici 9), nedostatak izotropije, translatorna invarijantnost, ...



Slika 9. 2D površi i 1D lanci Y-Ba-Cu-O keramika

Ubijedeni da možemo pomoći u rješavanju i razumijevanju mehanizama superprovodnosti visokotemperaturnih bakar-oksida keramika, mi smo aktuelizirali naša istraživanja i fokusirali ih na pripremu modela – tanki filmovi, i korištenje novije matematike – kvazidiskretna analiza, jer smo primjetili promjenljive kristalne slojeve (ograničene sa 2D površinom). Ovi slojevi – tanki filmovi diktiraju karakteristike cijelog uzorka. Čak i tokom perioda između 1987-1993. pa do sada, imali smo seriju veoma značajnih rezultata koji zadržavaju dokazani BCS prilaz sa Kuperovim parovima elektrona ili šupljina, jako vezanih sa fononima optičkog tipa, ali u kristalnim sistemima, koji su prostorno izuzetno ograničeni i translatorno invarijantni.

Dimenziono kvantovanje

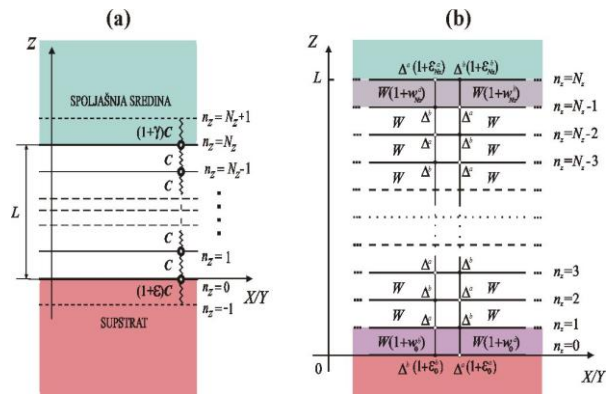
Ovaj naziv je rezultat savremenih istraživanja i odnosi se na pojavu kvantnih efekata na makroskopskom nivou kao posljedica drastičnog smanjivanja dimenzija u analiziranim uzorcima.

Teorijsko tretiranje ovih problema je adekvatno samo ukoliko se koristi specifičan matematički račun: diskretna analiza, sa uvođenjem diferencnih i antidiferencnih (Δ i Δ^{-1}), umjesto diferencijalnih računa i integrala (d , tj. δ i ζ). Eksperimentalni i teorijski rezultati direktno ukazuju na odsutnost klasičnih principa kauzalnosti i suprotno od toga oni pokazuju ogromnu promjenu fizičkih karakteristika.

Kako bi se povinovali takvim uskim zahtjevima mi smo adaptirali metod Grinovih funkcija. Njihovo određivanje je rezultat sistema konačnog broja diferencijalnih jednačina, sa korelacijom između njih u određenim graničnim uslovima. Odstojanje rješenja ovog problema definiše energiju spektra i moguća stanje elementarnog pobuđenja, a ona definišu termodinamiku i ostala makroskopska ponašanja.

Ultra-tanki filmovi

Obilježavajući dvodimenzionalnost kristalnih struktura (tj. površina α, β i γ pokazanih na slici 9), u početku smo napravili model ultra-tankih filmova sa primitivnom ćelijom (mono-atomski, tj. mono-molekularni ili mono-jonski film, slika 10a – za fononski film), a kasnije smo definisali model sa podrešetkom (biatomski-molekularni-jonski film, slika 10b – za elektronski film). Osnovna karakteristika modela ultra-tankog filma je da on ima dve paralelne granične površi sa do desetak paralelnih kristalografskih kristalnih površina između njih. Fizičke karakteristike gore navedenih graničnih površina ne moraju biti jednake jer one mogu dodjeljivati dvije različite vrste materijala (supstrat i vanjsko okruženje). Osim toga, fizičke karakteristike graničnih spojeva (one između graničnih površina i njihovih susjednih kristalografskih površina) mogu se značajno razlikovati od unutrašnjih slojeva filma.

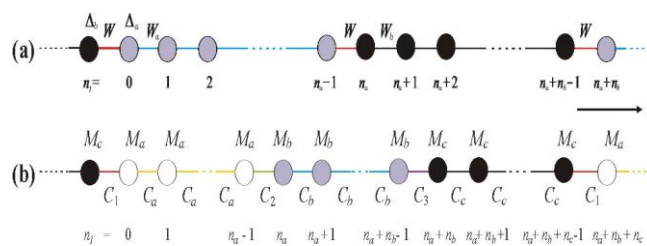


Slika 10. Model ultratankog kristalnog film

Superrešetke

Spefičan model kristalnih struktura koji predstavlja niz slijepljenih ultratankih filmova se naziva superrešetka. Njihova osnovna osobina je da ona ima makroskopsku ćeliju – motiv koji se beskonačno ponavlja. Motiv se sastoji od različitih ultratankih kristalnih filmova. Važno je pronaći fizičke karakteristike motiva i njegovog ponašanja.

Slika 9 pokazuje kristalni film smješten između graničnih površina α i β , i drugih između β i γ . Ukoliko možemo reprodukovati model čitave strukture kristalnog uzorka prikazanog gore sa permanentnim “lijepljenjem” tako uparenih filmova (α - β + β - γ) sa ovim postojećim, onda ovaj par filmova čini osnovni model superrešetke. a cijeli uzorak tačno određuje superrešetku.



Slika 12. Model kristalne superrešetke

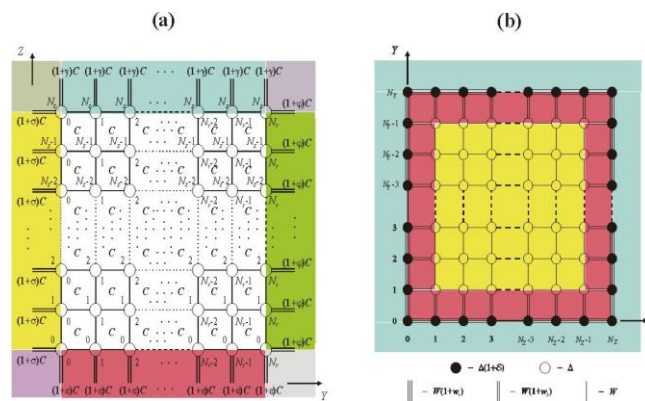
Formirali smo i analizirali dvije vrste superrešetki: sa dva filma ($A_n B_m C_l$, slika 12b). U njima n , m i l su jednocifrene cjelobrojne vrijednosti – brojevi atoma, jona, molekula tipa A, B i C respektivno oni grade kristalnu rešetku ovih filmova. Svaki film ima svoju graničnu karakteristiku, tj. postoje specifični granični uslovi na filmu i granici motiva.

Kvantne žice

Model kristalnih struktura koji je ograničen duž dva pravca i malih je dimenzija duž ta dva pravca u literature se naziva kvantna žica ili nano-zraka. Ovakve strukture su prikazane na slici 1: njegovi rubovi su označeni sa a , b , d i e . Njihova izotropija je komplikovana postojanjem lanaca atoma lokalizovanih unutar ove kvantne žice duž označenog pravca c .

One su kvazi-jednodimenzionalne i u opštem slučaju imaju četiri granične površi (a - b , b - d , d - e i e - a .) sa promijenjenim parametrima na tim površima i graničnim slojevima. One se takođe nazivaju kvantni zraci. Slika 13 pokazuje model fononske (a) i elektronske (b) kvantne žice.

Specijalni oblik kvantnih žica ima cilindrična kvantna žica ili nanotuba, koja se pojavljuje u dva različita oblika: kao pun ili prazan cilindar.



Slika 13. Model kristalne kvantne žice

Kvantna tačka

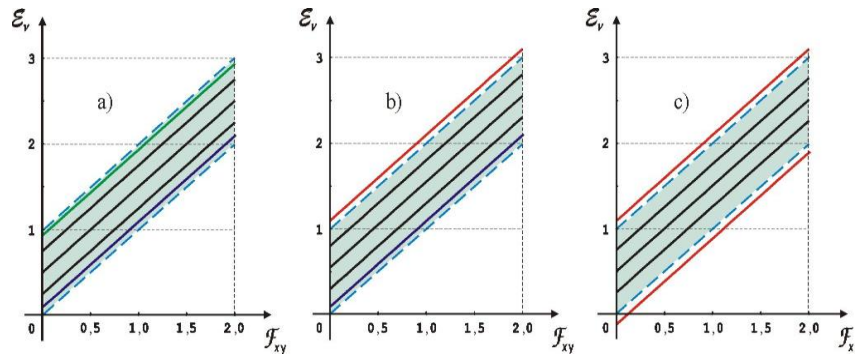
Model kristalnih struktura koje su ograničene duž sva tri pravca i malih su dimenzija u literature su nazvane kvantne tačke. One mogu biti različitih oblika, ali u istraživanju se obično uzimaju pravougani ili u obliku diska (puni ili prazni diskovi).

Mikro-(nano)-skopske osobine

Fundamentalne karakteristike elementarnih kvazičestica koje se pojavljuju i koje mogu biti tretirane kao specijalni podsystemi unutar okvira ispitivanog modela – mikroskopske osobine su: spektar energetskih stanja (zakon disperzije) i distribucija ovih stanja. Zbog činjenice da ove karakteristike definišu ponašanje makroskopskih osobina, najvažnija činjenica je uočavanje osnovnih različitosti ovih karakteristika u poređenju sa istim karakteristikama njihovih korespondiranih neograničenih struktura.

2. SPEKTRI ELEMENTARNIHI POBUĐENJA

Područja dozvoljenih i zabranjenih energija elementarnih pobuđenja (fonona i elektrona) su prvo definisane, kao i njihove glavne mikroteorijske karakteristike (slika 14).

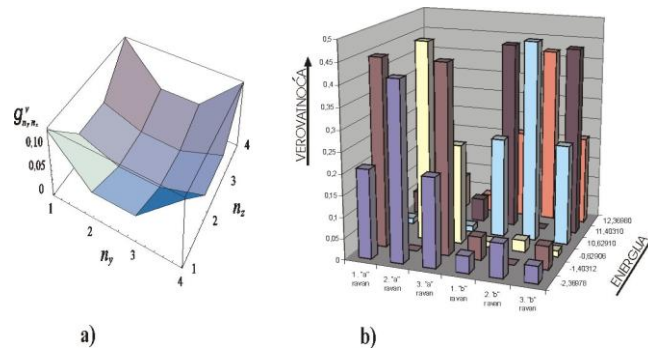


Slika 14. Zakon disperzije elementarnih pobuđenja ultra-tankog filma

U suprotnosti sa kontinualnom zonom dozvoljenih energija posmatranih eksitacija u balk strukturama, u ekstremno limitiranih (nano) strukturama dozvoljene energetska zona postaje “izrezana” u tačno definisani broj diskretnih podzona. Širina ovih zona i njihov položaj dozvoljenih (ekstremno diskretnih) energija veoma limitiranih (nano) struktura se mogu drastično razlikovati od balk struktura. Neka moguća stanja su ilustrovana na slici 14 za model ultra-tankog filma: sužavanje dozvoljene energetske zone (a), pomjeranje ove zone i pojava jakih lokalizovanih stanja (b) kao i širenje zone izvan balkovskih granica i pojava dva lokalizovana stanja (c). Direktna posljedica promjene širine dozvoljene energetske zone je moguća pojava lokalizovanih odvojenih energetske stanja / ili pojava dodatnih energetske gepova. Pojava nižih energetske gepova je opisana neophodnom aktivacionom toplotom – energijom koja se mora uvesti da bi imali elementarna pobuđenja u posmatranom podsistemu.

Stanja elementarnih eksitacija

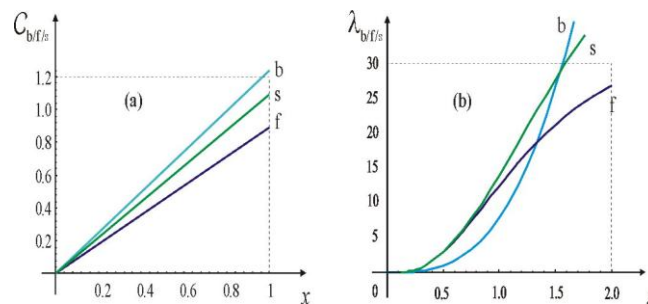
Pored mogućnosti da mijenjamo energetske spektar kao i mogućnosti pojave ili promjene lokalizovanih stanja ključno pitanje je koliko je velika vjerovatnoća pojave ovih stanja i posebno je vrlo važno pitanje njihove spektralne raspodjele. Gornje slike pokazuju gustinu i spektralnu raspodjelu energetske stanja u bi-filmskom motive elektronske superrešetke. Slika 15a i 15b pokazuje spektralnu raspodjelu energetske nivoa fononske kvantne žice i elektronskog filma respektivno sa vidljivim površinskim efektima.



Slika 15. Distribucija stanje elementarnih eksitacija

Termodinamička funkcija i transportne veličine

Poznavanje ponašanja termodinamičke funkcije i distribucije transportnih veličina omogućuju određivanje makroskopskih karakteristika posmatrane nano-kristalne strukture. Fononski i elektronski udio u toplotnom kapacitetu film-struktura i superrešetki je dobro poznat i opisan, dok je istraživanje transportnih veličina još u toku. Slika 16 pokazuje temperaturno ponašanje elektronskog udjela u toplom kapacitetu (a) i fononski udio u toplotnoj provodljivosti (b) kod film-struktura i superrešetki. Ovi rezultati su poređeni s odgovarajućim rezultatima u balku. Vidljivo je da su efekti granica filma „ispeglani” tj. pokvareni kod superrešetki.



Slika 16. Toplotne karakteristike ultra-tankih filmova i superrešetki

3. POSTIGNUTI REZULTATI I PERSPEKTIVE

Bazirana na formiranim modelima ultra-tankih filmova, superrešetki, kvantnih žica i tačaka, kao i posmatranih mikroskopskih i makroskopskih osobina ovih kristalnih sistema, pokazali smo veoma velik uticaj smanjenja dimenzija i graničnih uslova na promjenu fizičkih relevantnih (termodinamičkih i električno-transportnih) osobina kristalnih supstanci. Kritične temperature do 100 K su ovdje objašnjene, mada efekti elektronsko-fononske interakcije (kao u BSC-teoriji) još nisu uračunate. Ovdje su predstavljeni rezultati teorijskih istraživanja u zadnjih petnaest godina [21-42].

LITERATURA

- [1] D.Esteve, et.al; Europhysics Lett. 3, 1237 (1987).
- [2] C.W.Chu, et.al; Phys.Rev.Lett. 58, 1891 (1987).
- [3] P.W.Anderson; Science 235, 1196 (1987).
- [4] J.G.Bednorz and K.H.Üller; Rev.Mod.Phys. 60, 585 (1988).
- [5] V.V.Schmidt: The Physics of Superconductors, Springer, Berlin 1997.
- [6] S.D.Stojanović, J.P.Šetrajčić, M.J.Škrinjar and B.S.Tošić; FZKAAA 8, 111 (1976).
- [7] D.V.Kapor, K.R.Surla, D.I.Surla, J.P.Šetrajčić and M.J.Škrinjar; Phys.Stat.Sol.(b) 117, 9 (1983).
- [8] M.J.Škrinjar, D.V.Kapor and J.P.Šetrajčić; Phys.Stat.Sol.(b) 122, 125 (1984).
- [9] D.Lj.Mirjanić, Z.Bundalo, B.S.Tošić and J.P.Šetrajčić; Phys.Stat.Sol.(b) 128, 151 (1985).
- [10] U.F.Kozmidis-Luburić, D.Lj.Mirjanić, J.P.Šetrajčić, B.S.Tošić; Phys.Stat.Sol.(b) 128, K53 (1985).
- [11] B.S.Tošić, J.P.Šetrajčić, R.P.-Dajić, D.Lj.Mirjanić, Phys.Rev.B 36, 9094 (1987).
- [12] J.P.Šetrajčić, B.S.Tošić and D.Lj.Mirjanić; Physica 144A, 353 (1987).
- [13] B.S.Tošić, J.P.Šetrajčić, U.-D.Timitić, R.P.-Dajić and D.Lj.Mirjanić, Int.J.Mod.Phys.B 1, 919 (1988).
- [14] B.S.Tošić, J.P.Šetrajčić, D.Lj.Mirjanić, R.P.-Dajić, Ferroelectrics Lett. 8, 121 (1988).
- [15] D.Lj.Mirjanić, R.P.-Dajić, B.S.Tošić, U.-D.Timitić and J.P.Šetrajčić, FZKAAA 21, 303 (1989).
- [16] J.P.Šetrajčić, R.P.-Dajić, D.Lj.Mirjanić and B.S.Tošić, Physica Scripta 42, 732 (1990).
- [17] R.P.-Dajić, B.S.Tošić, J.P.Šetrajčić, D.Lj.Mirjanić, Physica C 185, 713 (1991).
- [18] D.Lj.Mirjanić, V.D.Sajfert, J.P.Šetrajčić and B.S.Tošić, Ferroelectrics Lett. 14, 15 (1992).
- [19] B.S.Tošić, J.P.Šetrajčić, D.Lj.Mirjanić and Z.V.Bundalo, Physica A 184, 354 (1992).
- [20] B.S.Tošić, V.D.Sajfert, D.Lj.Mirjanić and J.P.Šetrajčić, J.Phys.Chem.Solids 53, 1031 (1992).
- [21] S.Lazarev, D.Lj.Mirjanić, B.S.Tošić and J.P.Šetrajčić, Zbornik Matice srpske (pr.nauke) 85, 47 (1993).
- [22] J.P.Šetrajčić and M.Pantić, Phys.Lett.A 192, 292 (1994).
- [23] D.Lj.Mirjanić, J.P.Šetrajčić, M.Pantić and S.Lazarev, Zbornik Matice srpske (pr.nauke) 85, 97 (1994).
- [24] B.S.Tošić, D.Lj.Mirjanić i J.P.Šetrajčić: Spektri elementarnih pobudjenja u anizotropnoj film-strukturi – model superprovodnih keramika, Društvo fizičara Republike Srpske, Banja Luka 1995.
- [25] J.P.Šetrajčić, M.Pantić, B.S.Tošić and D.Lj.Mirjanić, Bal.Phys.Lett. 2, 734 (1995).
- [26] D.Lj.Mirjanić, S.M.Stojković, J.P.Šetrajčić and S.K.Jačimovski, IEEE: Proceedings 20th MIEL 1, 177-179 (1995).

- [27] J.P.Šetrajčić, S.M.Stojković, S.Lazarev, D.Lj.Mirjanić and M.Budinčević, Zbornik radova 10. PriM, 73 (1996).
- [28] S.B.Lazarev, S.D.Markoski, D.Lj.Mirjanić, M.Pantić and J.P.Šetrajčić, IEEE: Proceedings 21st MIEL 1, 125 (1997).
- [29] S.Lazarev, Ž.M.Škrbić, J.P.Šetrajčić, D.Lj.Mirjanić and Lj.Ristovski, J.Phys.Chem.Sol. 58, 793 (1997).
- [30] J.P.Šetrajčić, Materials Science Forum 282-283, 71 (1998).
- [31] J.P.Šetrajčić, S.M.Stojković, B.Abramović, S.Lazarev, Bal.Phys.Lett. 5, 414 (1998).
- [32] S.Lazarev, D.Lj.Mirjanić, M.Pantić, B.S.Tošić and J.P.Šetrajčić; J.Phys.Chem.Sol. 60, 849 (1999).
- [33] J.P.Šetrajčić, S.M.Stojković, S.B.Lazarev, I.D.Vragović and D.Lj.Mirjanić, SPIE-PL, Proc.5th International Conference on Dielectric and Related Phenomena (DRP), 37DP, 162 (1999).
- [34] S.M.Stojković, J.P.Šetrajčić, I.D.Vragović, Materials Science Forum 352, 129 (2000).
- [35] J.P.Šetrajčić: Superprovodnost, Zmaj, Novi Sad 2001.
- [36] S.M.Stojković, D.Lj.Mirjanić, J.P.Šetrajčić, D.Šijačić, I.K.Junger; Surface Science 477, 235 (2001).
- [37] J.P.Šetrajčić, S.M.Stojković, D.Lj.Mirjanić, S.M.Vučenović and D.Popov, Materials Science Forum 413, 33 (2003).
- [38] S.M.Vučenović, J.P.Šetrajčić, S.S.Pelemiš, B.S.Tošić, D.Lj.Mirjanić, IEEE: Proceedings 24th MIEL 1, 279 (2004).
- [38] D.Lj.Mirjanić, B.Škundrić, M.Davidović, S.Sređić, J.P.Šetrajčić i S.M. Vučenović: Teorijska i eksperimentalna istraživanja u nanomaterijalima, Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske, Banja Luka 2005.
- [40] J.P.Šetrajčić, S.M.Vučenović, D.Lj.Mirjanić, V.D.Sajfert and S.K.Jaćimovski, Materials Science Forum 494, 49 (2005).
- [41] B. S. Markoski, J. P. Šetrajčić, Lj. Džambas, D. Lj. Mirjanić, S. M. Vučenović, *Electron thermodynamics of nanofilm-structures*, Modern Physics Letters B (2009) 23(2):129-135.
- [42] J. P. Šetrajčić, D. Lj. Mirjanić, S. M. Vučenović, D. I. Ilić, B. Markoski, S. K. Jaćimovski, V. D. Sajfert, V. M. Zorić, Phonon Contribution in Thermodynamics of Nano-Crystalline Films and Wires, Acta Physica Polonica A, Vol. 114, No 4 (2009) 778-782.