

Magnetska svojstva $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristala

Mario Rušec

PMF - Fizički odsjek

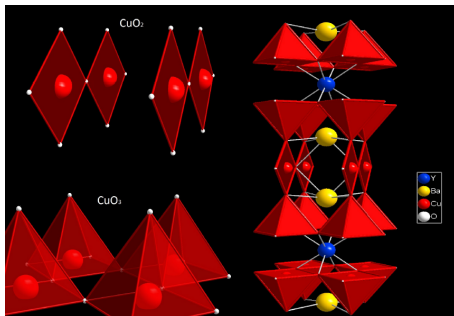
30. siječnja 2020.

¹Mentor: prof. dr. sc. Ivan Kokanović

Sadržaj

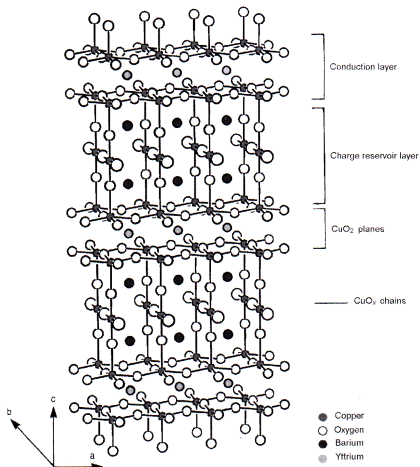
- 1 Uvod
 - Svojstva YBCO monokristala i njegove supravodljivosti
 - Kristalna struktura YBCO monokristala
 - Usmjeravanje vortexa unutar YBCO monokristala
- 2 Lawrance-Doniach model
- 3 Empirijski Loriam model
- 4 Sinteza YBCO monokristala
- 5 Metode izrade magnetskih mjerenja
 - Piezolever metoda
 - SQUID metoda
- 6 Magnetska mjerenja $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristala
 - Mjerenja T_c pri $B = 1\text{mT}$
 - Magnetska mjerenja nakon sinteze
 - Magnetska mjerenja 7 mjeseci nakon sinteze
- 7 Zaključak
- 8 Literatura

Kristalna struktura YBCO monokristala

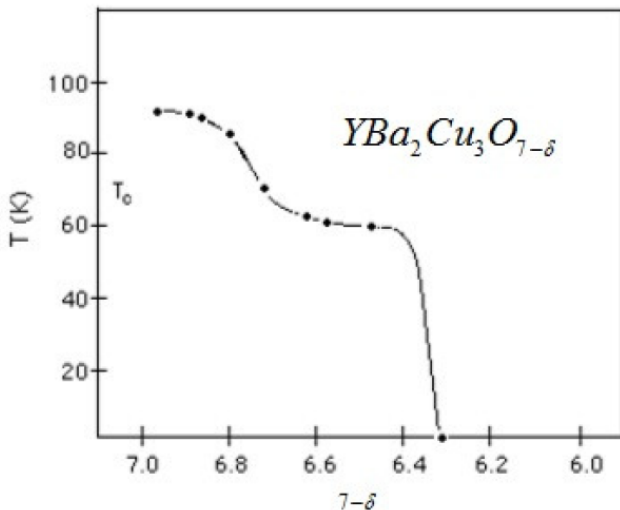


Slika: YBa₂Cu₃O_{6.4} za razliku od drugih visokotemperaturnih keramika (koje imaju perovskitna strukturu) ima defektnu perovskitna strukturu koja se sastoji od predopirane YBa₂Cu₃O₇ koji ima ortorompsku jediničnu ćeliju s parametrima ćelije ($a=0.38189\text{nm}$, $b=0.38849\text{nm}$ i $c=1.16762\text{nm}$), dok nedopirana komponenta YBa₂Cu₃O₆ ima tetragonsku jediničnu ćeliju s dimenzijama ($a=0.38570\text{nm}$ i $c=1.18194\text{nm}$).

Kristalna struktura YBCO monokristala



Slika: Kristalna struktura YBCO monokristala. YBCO se sastoji od dvije supravodljive CuO₂ ravnine koje su međusobno razdvojene atomom ytritija.



Slika: Graf ovisnosti temperature supravodljivog prijelaza o dopiranosti kisikom za $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Svojstva YBCO monokristala i njegove supravodljivosti

YBCO ima velik Ginzburg-Landau parametar κ te je supravodič II. vrste. Supravodljivo stanje nastaje unutar CuO_2 ravnina.

$$\kappa = \lambda(T)/\xi(T)$$

YBCO ima veliku anizotropiju $\gamma \sim 7$.

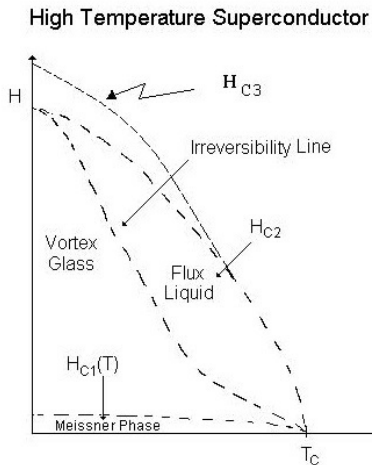
Efektivna masa Cooperovog para je veća u c smjeru nego u supravodljivim CuO_2 ravninama.

$$\gamma = \lambda_c/\lambda_{ab} = \xi_{ab}/\xi_c = (m_c/m_{ab})^{1/2}$$

YBCO pokazuje slabi izotopni efekt.

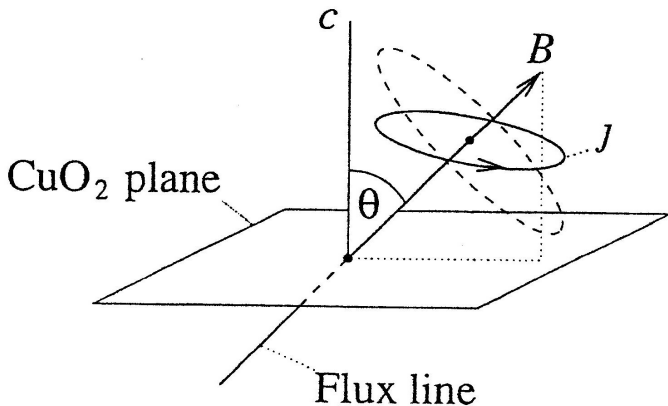
Ukupna pozadina jake veze Cooperovih parova unutar YBCO monokristala je još u diskusiji.

Ovisnost kritičnog magnetskog polja o temperaturi



Slika: Ovisnost kritičnih magnetskih polja H_{c1} , H_{c2} , H_{c3} za visokotemperaturni supravodič.

Usmjeravanje vortexa unutar YBCO monokristala



Slika: Magnetski vrtlog a magnetskom polju pod kutem u odnosu na CuO_2 ravnine.

Lawrance-Doniach model

Lawrance-Doniach model je baziran na Ginzburg-Landau teoriji.

L-D pretpostavlja da je 3d rešetka podijeljena na n slojeva 2d rešetki gdje svaka 2d ploha ima valnu funkciju $\psi_n(x, y)$.

2D Plohe međusobno interagiraju preko Josephson tuneliranja Cooperovih parova.

Slojevi definiraju ab ravninu, te c os okomitu na nju.

$$F = \sum_n \int dA f_n, \quad f_n = \alpha |\psi_n|^2 + \frac{1}{2} \beta |\psi_n|^4 + \left(-\frac{\hbar^2}{2m_{ab}} \psi_n^* \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \psi_n + \frac{\hbar^2}{2m_c s^2} |\psi_n - \psi_{n-1}|^2 \right). \quad (1)$$

Lawrance-Doniach model

Minimizirajući slobodnu energiju (LDF) po varijaciji ψ_n^* dobiva se Lawrence-Doniach jednadžba za ψ_n :

$$\alpha\psi_n + \beta|\psi_n|^2\psi_n - \frac{\hbar^2}{2m_{ab}} \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \psi_n - \frac{\hbar^2}{2m_c s^2} (\psi_{n+1} + \psi_{n-1} - 2\psi_n). \quad (2)$$

Uvedene su različite mase m_{ab} i m_c koje opisuju različite modove vodljivosti naboja u ab i c smjeru.

Definira se prirodna skala varijacija valne funkcije:

$$\xi_i^2(T) = \frac{\hbar^2}{2m_i |\alpha(T)|}, \quad (3)$$

gdje subskript i opisuje specifičnu os. Budući da je $\alpha(T)$ izotropan i proporcionalan sa $(T - T_c)$, ξ je anizotropna, te se skalira sa $1/m_i$ a divergira kao $|T - T_c|^{-1/2}$.

Kritično magnetsko polje H_{c2}

Pomoću L-D modela dobiva se kritično magnetsko polje H_{c2} , koje je određeno sa vortexima struje koje teku u ravnini okomitoj na polje, relevantne vrijednosti ξ_i su od onih osi okomite na smjer polja.

Tako za polja usmjerena u smjeru dvije glavne osi dobiva se

$$H_{c2||c} = \Phi_0 / 2\pi\xi_{ab}^2$$

$$H_{c2||ab} = \Phi_0 / 2\pi\xi_{ab}\xi_c$$

Gdje je $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$ kvant magnetskog toka

-Flukson.

Empirijski Loria model susceptibilnosti YBCO monokristala

Prema [7] magnetska susceptibilnost YBCO monokristala χ_C , χ_{ab} ima nekoliko ovisnosti.

$$\chi(T) = \chi_{PG}(T) + \chi_{FL}(T) + C/T + \chi_{VV} + \chi_{core}, \quad (4)$$

gdje je $\chi_{PG}(T)$ doprinos pseudogapa magnetskoj susceptibilnosti $\chi(T)$, $\chi_{FL}(T)$ je doprinos supravodljivih fluktuacija magnetskoj susceptibilnosti, a $\chi_{VV} + \chi_{core}$ su doprinosi magnetskoj susceptibilnosti koji ne ovise o temperaturi. Curiev doprinos ovisi o spinskom uređenju kristalne rešetke, te za visoke temperature Curieova konstanta iznosi

$$C \approx \frac{N\mu_B^2 g_L^2 J(J+1)}{3}, \quad (5)$$

gdje je N broj atoma, μ_B Bohrov magnetron, g_L giromagnetski faktor, te J ukupni angularni moment.

Empirijski Loriam model susceptibilnosti YBCO monokristala

Prema empirijskom Loriam modelu, unutar gustoće stanja postoji trokustasti usjek širine $2E_G$ u Fermionskoj gustoći stanja centriran na Fermijevoj energiji.

$$E_G = E_0(1 - p/0.19), \text{ za } 0 \leq p \leq 0.19, 0 \text{ inače.}$$

p je broj dodanih šupljina po ravninskom Cu. $E_0 \approx 0.1\text{eV}$ te je jednak energiji razmjene između Cu spinova u antiferomagnetskom stanju $p = 0$.

Za uzorak $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristala $p=0.064$.

Za $T < 240\text{K}$, vrijedi aproksimacija

$$\chi_{PG} \approx A \frac{2k_B T}{E_G} \ln 2, \quad (6)$$

gdje je $A = N_0 \mu_B^2$.

Empirijski Loriam model susceptibilnosti YBCO monokristala

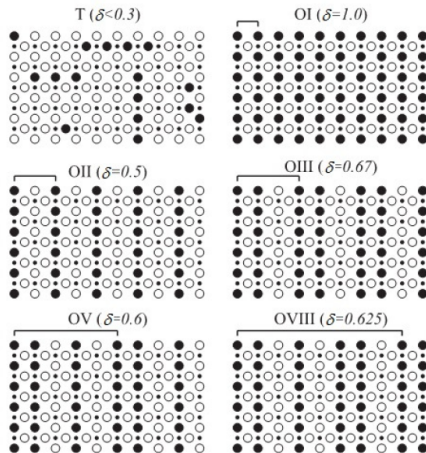
U rasponu temperatura u blizini temperature supravodljivog prijelaza T_c , kada je magnetsko polje H usmjereno paralelno c osi, doprinos Gausijanskih supravodljivih fluktuacija u smjeru c osi iznosi [9]:

$$M_c^{FL} = -\frac{\pi k_B T H}{3\phi_0^2} \frac{\xi_{ab}^2}{s \sqrt{1 + \left(\frac{2\xi_{ab}}{\gamma s}\right)^2}}, \quad (7)$$

gdje je: γ anizotropija, $\xi_{ab}(T) = \xi_{ab}/\sqrt{\epsilon}$ i $\xi_c(T) = \xi_c/\sqrt{\epsilon}$, $\epsilon = \ln(T/T_c)$ su temperaturno ovisne koherentne duljine u ab slojevima i c osi.

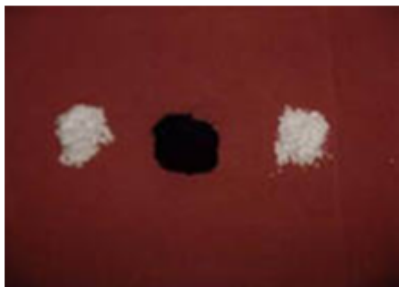
$s = 1.17\text{nm}$ je udaljenost između paralelnih CuO_2 slojeva, ϕ_0 je kvant magnetskog toka Cooperovih parova i k_B Boltzmannova konstanta.

Slaganje CuO lanaca ovisno o dopiranosti



Slika: Slaganje CuO lanaca ovisno o dopiranosti YBCO monokristala kisikom.

Sinteza YBCO monokristala



a)



b)

Slika: Mješanje prikladnog omjera substanci Y_2O_3 , $BaCO_3$ i CuO , za sintezu YBCO monokristala.

Sinteza YBCO monokristala



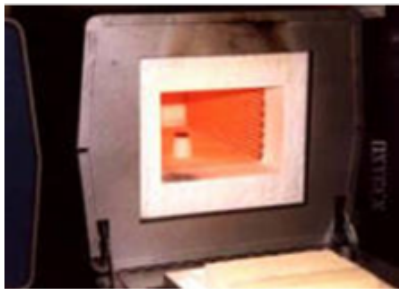
c)



d)

Slika: Sprešan uzorak YBCO monokristala i hidraulička preša.

Sinteza YBCO monokristala



e)

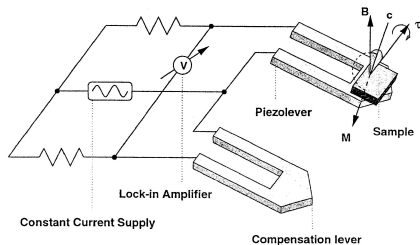


f)

Slika: Peć za sintezu YBCO monokristala i peć za dopiranje.

Postupak sinteze završava kaljenjem. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal je dopiran u atmosferi 1% kisika na temperaturi 620°C , te je kaljen stavljanjem na bakrenu ploču.

Piezolever metoda

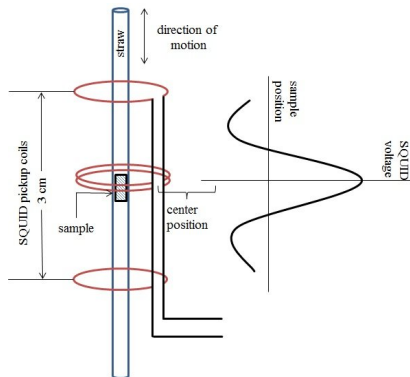


Slika: Shematski spoj Wheatstoneovog mosta sa dva piezolevera. Na jednom od piezolevera je zalijepljen uzorak YBCO monokristala.

Mjerenje piezoleverom daje puno preciznije rezultate za male uzorke (lakše je sintetizirati manji monokristal).

Piezolever tehnika se ne može koristiti za snažna magnetska polja sa velikim uzorcima, jer onda poluga puca.

SQUID metoda izrade magnetskih mjerenja

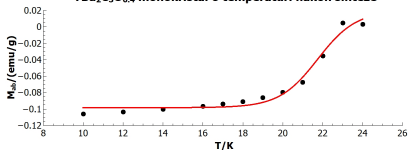


Slika: Shematski prikaz magnetskog mjerenja pomoću SQUID metode.

SQUID metoda, omogućava mjerenje na magnetskim poljima do 7 T, te zahtjeva dobivanje do 10 mg uzorka (velik monokristal) za precizna mjerenja.

Ovisnost magnetizacije o temperaturi nakon sinteze

Graf ovisnosti omjera magnetizacije oko ab ravnine i mase za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal o temperaturi nakon sinteze



Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = a + b/(1 + \exp(-(x - T_c)/c))$, sa koeficijentima:

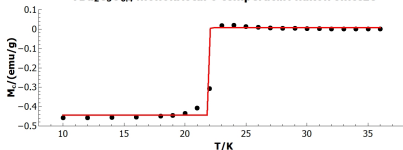
$$a = (-0.098 \pm 0.003)\text{emu/g},$$

$$b = (0.12 \pm 0.01)\text{emu/g},$$

$$c = (1.0 \pm 0.2)\text{K},$$

$$T_c = (21.7 \pm 0.3)\text{K}.$$

Graf ovisnosti omjera magnetizacije oko c osi i mase za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal o temperaturi nakon sinteze



Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = a + b/(1 + \exp(-(x - T_c)/c))$, sa koeficijentima:

$$a = (-0.007 \pm 0.003)\text{emu/g},$$

$$b = (0.451 \pm 0.003)\text{emu/g}, c =$$

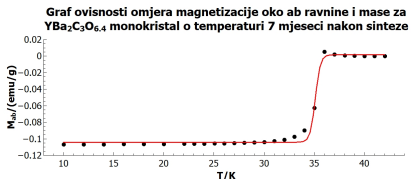
$$(-0.0157425452 \pm 0.0000000001)\text{K},$$

$$T_c = (22.004 \pm 0.002)\text{K}.$$

Srednji T_c za mjerenja izvršena nakon sinteze iznosi:

$$\langle T_c \rangle = (22.004 \pm 0.002)\text{K}. B = 1\text{mT}.$$

Ovisnost magnetizacije o temperaturi 7 mjeseci nakon sinteze



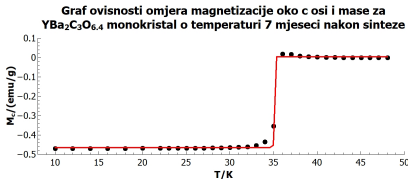
Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = a + b/(1 + \exp(-(x - T_c)/c))$, sa koeficijentima:

$$a = (-0.098 \pm 0.003)\text{emu/g},$$

$$b = (1.058 \pm 0.002)\text{emu/g},$$

$$c = (0.25 \pm 0.08)\text{K},$$

$$T_c = (35.11 \pm 0.05)\text{K}.$$



Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = a + b/(1 + \exp(-(x - T_c)/c))$, sa koeficijentima:

$$a = (-0.464 \pm 0.002)\text{emu/g},$$

$$b = (0.469 \pm 0.03)\text{emu/g},$$

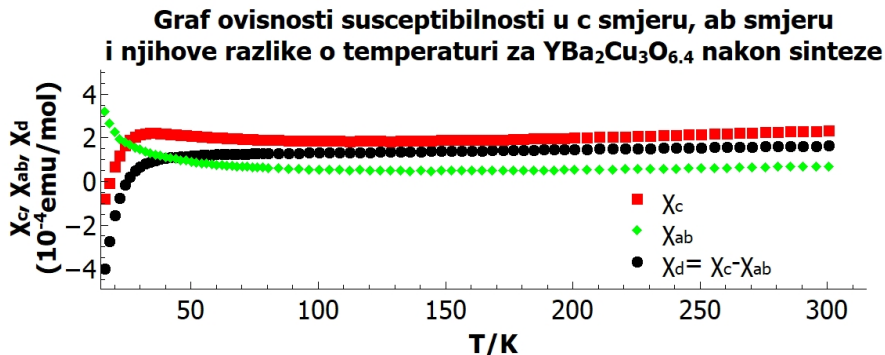
$$c = (0.015 \pm 0.001)\text{K},$$

$$T_c = (35.02703 \pm 0.00005)\text{K}.$$

Srednji T_c za mjerenja izvršena 7 mjeseci nakon sinteze iznosi:

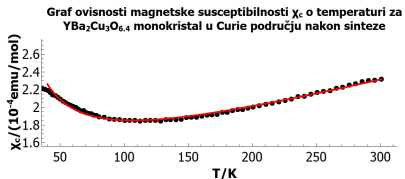
$$T_c = (35.02703 \pm 0.00005)\text{K}. \quad B = 1\text{mT}.$$

Mjerenja ovisnosti magnetskih susceptibilnosti χ_c , χ_{ab} i χ_d o temperaturi

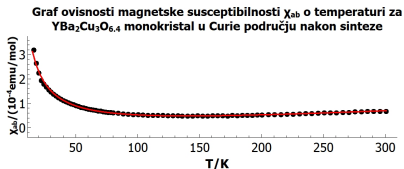


Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5T$ za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal nakon sinteze.

Područja Curieove ovisnosti u mjerenjima ovisnosti magnetizacije o temperaturi



Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = Ax + B + C/x$ sa parametrima
 $A = (3.71 \pm 0.06) \cdot 10^{-7} \text{emu/molK}$
 $B = (1.06 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{emu/mol}$
 $C = (42.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

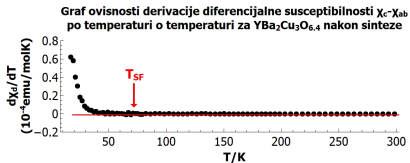


Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = Ax + B + C/x$ sa parametrima
 $A = (2.52 \pm 0.08) \cdot 10^{-7} \text{emu/molK}$
 $B = (-0.22 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{emu/mol}$
 $C = (50 \pm 6) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

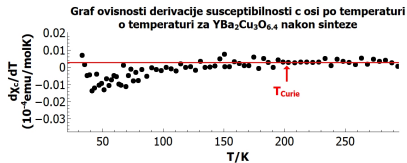
Srednja Curieva konstanta za uzorak YBCO monokristala nakon sinteze, te iznosi $C_0 = (42.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5\text{T}$.

Ovisnosti derivacija magnetskih susceptibilnosti χ_c , χ_d po temperaturi o temperaturi



Slika: Graf ovisnosti derivacije razlike magnetskih susceptibilnosti $\chi_c - \chi_{ab}$ po temperaturi o temperaturi. Na grafu se mogu uočiti supravodljive fluktuacije na temperaturi reda veličine 70K.



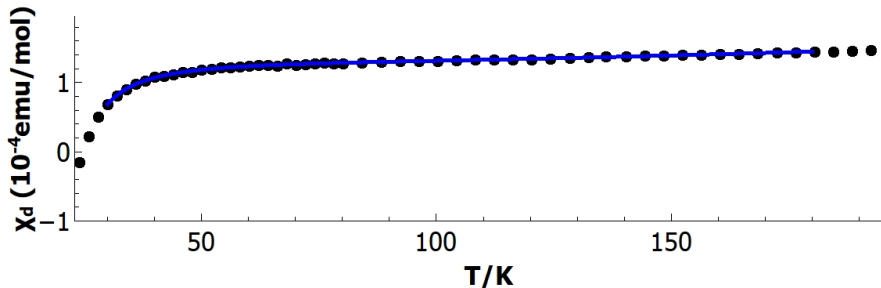
Slika: Graf ovisnosti derivacije magnetske susceptibilnosti χ_c po temperaturi o temperaturi. Na grafu može se uočiti Curieovo ponašanje i Curieova temperatura reda veličine 200K.

Mjerenje je rađeno za uzorak $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristala nakon sinteze.

Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5\text{T}$.

Ovisnost diferencijalne susceptibilnosti o temperaturi

Graf ovisnosti diferencijalne magnetske susceptibilnosti χ_d o temperaturi za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal nakon sinteze



Slika: U rasponu temperatura (30 - 180)K na graf je "fitana" krivulja

— $\frac{A \cdot x}{\sqrt{(\ln(x/T_c))^2 + B \cdot \ln(x/T_c)}} + C \cdot x + D$ sa koeficijentima:

$A = (6.4 \pm 0.9) \mu\text{emu/molK}$, $B = 2.0 \pm 0.3$, $C = (1.6 \pm 0.2) \mu\text{emu/molK}$,
 $D = (250 \pm 10) \mu\text{emu/mol}$, $T_c = (22.2 \pm 0.6) \text{K}$.

Rezultati magnetskih mjerenja za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ nakon sinteze

Mjerenjima u magnetskom polju 5T nakon sinteze određene su:

koherentna duljina $\xi_{ab} = (4.7 \pm 0.3)\text{nm}$ i faktor izotropnosti $\gamma = 5.6 \pm 0.6$.

Izračunato je kritično magnetsko polje

$$H_{c2||c} = (15 \pm 2)\text{T}.$$

Određena je temperatura supravodljivih fluktuacija T_{SF} reda veličine 70K.

Određena je Curieova temperatura reda veličine 200K.

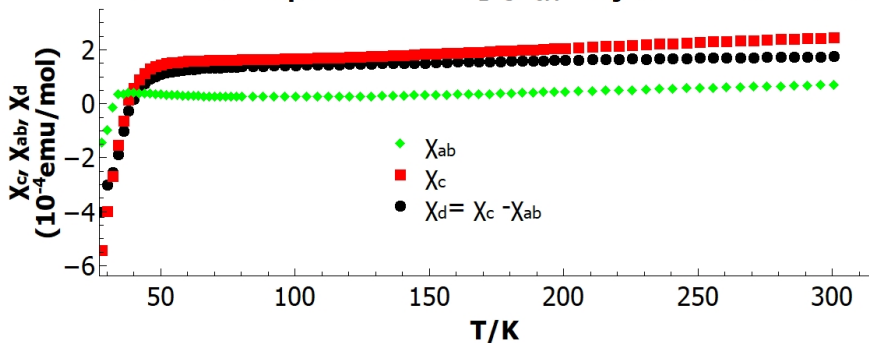
Ranije su određene temperatura supravodljivog prijelaza

$$T_c = (22.004 \pm 0.002)\text{K}$$

i Curieva konstanta $C = (42.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}\text{emuK/mol}$.

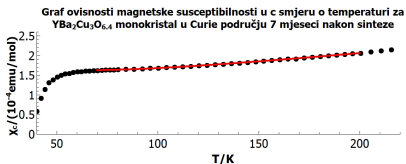
Ovisnosti magnetskih susceptibilnosti χ_c , χ_{ab} i χ_d o temperaturi

Graf ovisnosti susceptibilnosti u c smjeru, ab smjeru i njihove razlike o temperaturi za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ 7 mjeseci nakon sinteze

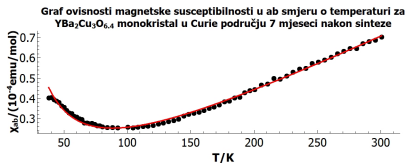


Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5\text{T}$ za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal 7 mjeseci nakon sinteze.

Područja Curieove ovisnosti u mjerenjima ovisnosti magnetizacije o temperaturi



Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = Ax + B + C/x$ sa parametrima
 $A = (-0.283 \pm 0.10) \cdot 10^{-4} \text{emu/molK}$
 $B = (-3.04 \pm 0.05) \cdot 10^{-7} \text{emu/mol}$
 $C = (23.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

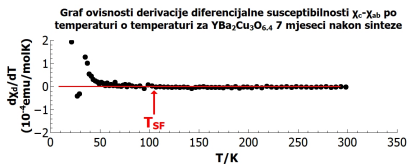


Slika: Na graf je "fitana" funkcija $y = Ax + B + C/x$ sa parametrima
 $A = (4.95 \pm 0.07) \cdot 10^{-7} \text{emu/molK}$
 $B = (0.96 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{emu/mol}$
 $C = (23 \pm 1) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

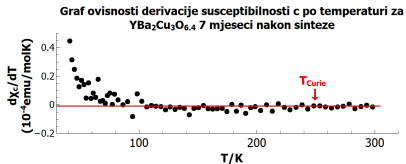
Srednja Curieva konstanta za uzorak YBCO monokristala 7 mjeseci nakon sinteze iznosi $C = (23.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \text{emuK/mol}$.

Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5\text{T}$.

Ovisnosti derivacija magnetskih susceptibilnosti χ_c , χ_d po temperaturi o temperaturi



Slika: Graf ovisnosti derivacije razlike magnetskih susceptibilnosti $\chi_c - \chi_{ab}$ po temperaturi o temperaturi. Na grafu se mogu uočiti supravodljive fluktuacije na temperaturi reda veličine 110K.



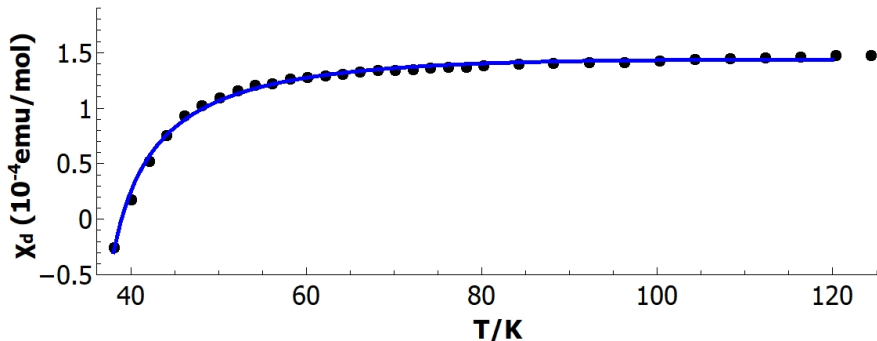
Slika: Graf ovisnosti derivacije magnetske susceptibilnosti χ_c po temperaturi o temperaturi. Na grafu može se uočiti Curieovo ponašanje i Curieova temperatura reda veličine 250K.

Mjerenje je rađeno za uzorak $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristala 7 mjeseci nakon sinteze.

Magnetizacija je mjerena pri vanjskom magnetskom polju $B=5\text{T}$.

Ovisnost diferencijalne susceptibilnosti o temperaturi

Graf ovisnosti diferencijalne magnetske susceptibilnosti χ_d o temperaturi za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ monokristal 7 mjeseci nakon sinteze



Slika: U rasponu temperatura (40 - 120)K na graf je "fitana" krivulja

— $\frac{A \cdot x}{\sqrt{(\ln(x/T_c))^2 + B \cdot \ln(x/T_c)}} + C \cdot x + D$ sa koeficijentima:

$A = (3.6 \pm 0.3) \mu\text{emu/molK}$, $B = 1.5 \pm 0.2$, $C = (794.04 \pm 0.02) \mu\text{emu/molK}$,

$D = (280 \pm 10) \mu\text{emu/mol}$, $T_c = (34.4 \pm 0.3) \text{K}$.

Rezultati magnetskih mjerenja za $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ 7 mjeseci nakon sinteze

Mjerenjima u magnetskom polju 5T 7 mjeseci nakon sinteze određene su: koherentna duljina $\xi_{ab} = (3.6 \pm 0.2)\text{nm}$ i faktor izotropnosti $\gamma = 4.9 \pm 0.4$.

Izračinato je kritično magnetsko polje

$$H_{c2||c} = (26 \pm 2)\text{T}.$$

Određena je temperatura supravodljivih fluktuacija T_{SF} reda veličine 110K.
Određena je Currie temperatura reda veličine 250K.

Ranije su određene temperatura supravodljivog prijelaza

$$T_c = (35.02703 \pm 0.00005)\text{K}$$

i Curieva konstanta $C = (23.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}\text{emuK/mol}$.

Zaključak

Nakon sinteze kisik je nasumično raspoređen unutar YBCO monokristala te se on kroz 7 mjeseci posloži u CuO lance unutar YBCO monokristala što rezultira poboljšanjem supravodljivih svojstava.







Uočen je porast temperature supravodljivog prijelaza T_c , kritičnog magnetskog polja H_{c2} .

Uočen je pad koherentne duljine ξ_{ab} i pad Curieove konstante.

Pokazana je izotropnost Curieovog člana.

Uočen je porast temperature supravodljivih fluktuacija i porast Curieove temperature.

Hvala na pažnji!

-  Introduction to superconductivity, by: Michael Tinkham, second edition
-  Christoph Bergemann, Magnetic Effects in Unconventional Superconductors, PhD Thesis, Trinity College, Cambridge, UK.
-  Filip Orbanić, Kvantni transport i magnetska svojstva odabranih topoloških izolatora i Diracovih polumetala, Doktorski rad, 2018, Sveučilište u Zagrebu, PMF.
-  Ruthenate and Rutheno-Cuprate Materijals, by: C.Noce, A.Vecchione, M.Cuoco, A.Romano (Eds.)
-  Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure, by: M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang Phys. Rev. Lett. 58, 908-910 (1987)
-  Magnetization of underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ above the irreversibility field, by Jing Fei Yu, B. J. Ramshaw, I. Kokanović, K. A. Modic, N. Harrison, James Day, Ruixing Liang, W. N. Hardy, D.A Bonn, A.

McCollam, S.R. Julian, and J.R. Cooper DOI:
10.1103/PhysRevB.92.180509 (2015)



The in- and out-of-plane magnetisation of highly underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ single crystals, by Ivan Kokanović and John R. Cooper DOI: 10.1103/PhysRevB.92.180509 (2015)



J. W. Loriam, J. Luo, J. R. Cooper, W. Y. Liang and J. L. Tallon, J. Phys. Chem. Sol. 62, 59 (2001).




A. Larkin and A. Varlamov, "Theory of Fluctuations in Superconductors", Clarendon Press, Oxford (U.K.) (2005).



Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, by: M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu Phys. Rev. Lett. 58, 908 – Published 2 March 1987: DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908>



R. Liang, D. A. Bonn, and W. N. Hardy, Phys. Rev. B 73, 180505 (2006).

-  Theory of Unconventional Superconductors Cooper-Pairing Mediated by Spin Excitations, by: Dirk Manske
-  Diplomski rad, Supravodljivost YBCO kristalnih materijala, Martina Vuković
-  [http://cesur.en.ankara.edu.tr/
low-high-temperature-superconductivity/](http://cesur.en.ankara.edu.tr/low-high-temperature-superconductivity/)
-  D wave pairing YBCO
<http://cmms.triumf.ca/theses/Sonier/MSc/node17.html>