

Utjecaj nanočestica bakrova ferita na supravodljiva svojstva magnezijevog diborida

Emil Babić¹, Damir Pajić¹, Mislav Mustapić¹, Nikolina Novosel¹, Željko Skoko¹, Krešo Zadro¹, Josip Horvat², Andrey Shcherbakov²

¹ PMF, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska

<http://www.phy.hr/~mgb2>

<http://www.ukf.hr>

UNITY THROUGH
KNOWLEDGE FUND

² ISEM, Sveučilište u Wollongongu, Australija



Projekt "Enhancement of electromagnetic properties of MgB₂ superconductor by magnetic nanoparticle doping" (1B 01/07) financira "Fond jedinstvo uz pomoć znanja" Republike Hrvatske.

1. Uvod

Interes

MgB₂ je jedinstveni primjer supravodiča s dva energijska procjepa, što je omogućilo da se po prvi put prouče intrinzična i ekstrinzična svojstva takvih supravodiča.

Razmjerno visoka kritična temperatura $T_c \approx 39\text{K}$ i druga povoljna svojstva (jednostavan spoj lako dostupnih elemenata, dobra povezanost zrna u polikristalu, jednostavna priprema žica ...) čine MgB₂ zanimljivim za široke primjene (magneti za MRI koji ne koriste tekući helij itd.).

Problem

Čist MgB₂ (masivni uzorci, monokristali, žice) ima nisko gornje kritično polje H_{c2} i slabo zapinjanje magnetskih vrtloga MV (što vodi do niskog ireverzibilnog polja $B_{irr}(T)$ i jakog smanjenja kritične struje J_c u magnetskom polju).

Masivni uzorci i žice dobiveni sinteriranjem praška vrlo su porozni (~45% idealne gustoće) što ograničava iznos J_c i potencira utjecaj nehomogenosti na povezanost kristalnih zrna.

Ovi problemi zasada onemogućuju primjenu čistog MgB₂.

Rješenje

Tijekom zadnjih šest godina učinjen je velik napredak u poboljšanju zapinjanja MV (dopiranjem nanočesticama [1,2]) i smanjenja poroznosti [3] MgB₂, no potreban je daljnji napredak da se ostvare primjene.

Teorijska [4] i eksperimentalna istraživanja na tankim filmovima [5] ukazuju da magnetske nanočestice uzrokuju jače zapinjanje MV u supravodiču nego nemagnetske. Utjecaj magnetskih nanočestica na masivne uzorke MgB₂ je manje jasan: brojna magnetska mjerenja J_c (J_{cm}) ukazuju na pojačanje zapinjanja MV (npr. [6,7]) no postoje i suprotna opažanja [8].

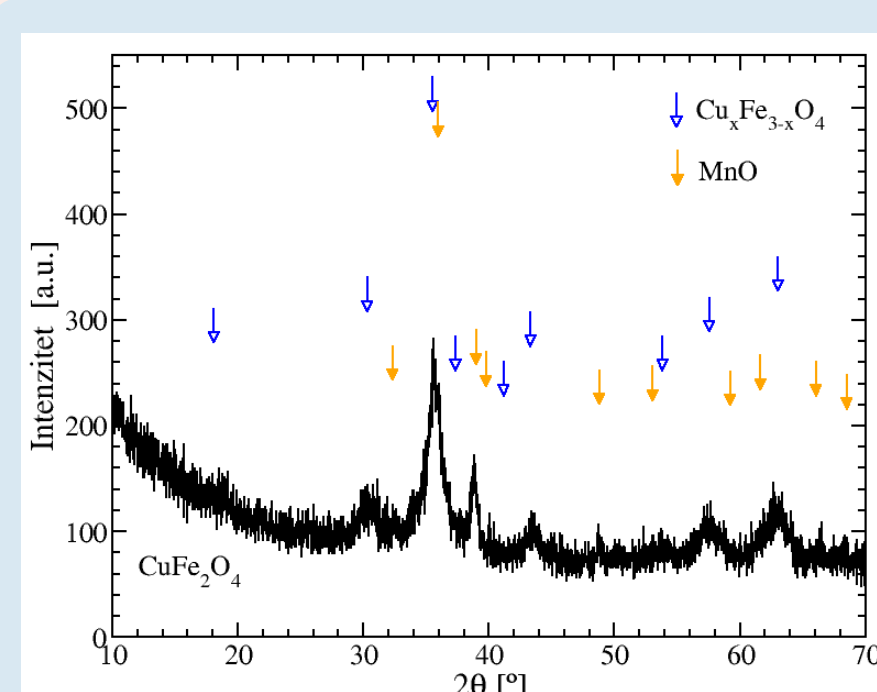
Pitanje

Da li magnetske nanočestice pojačavaju zapinjanje MV u žicama MgB₂?

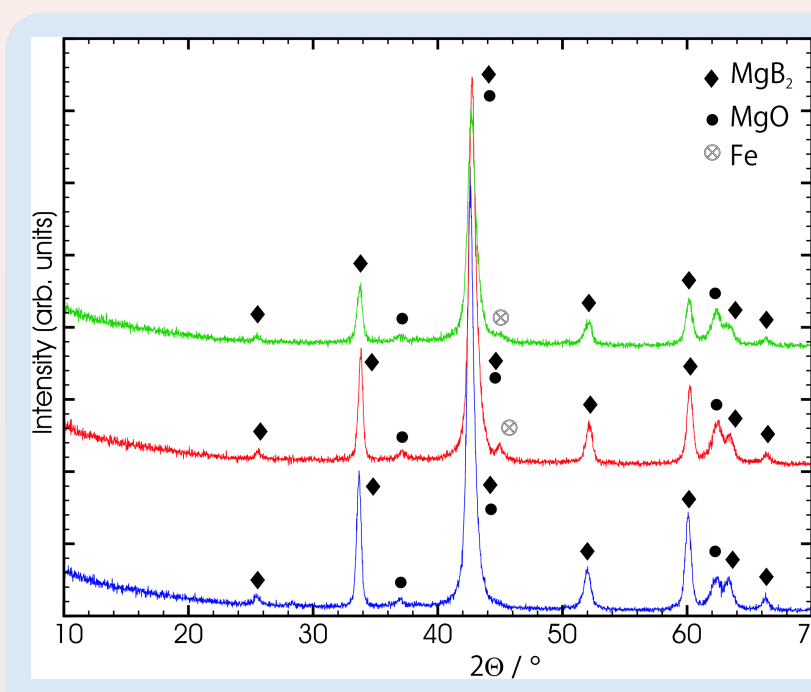
2. Eksperimentalni postupci

Uzorci

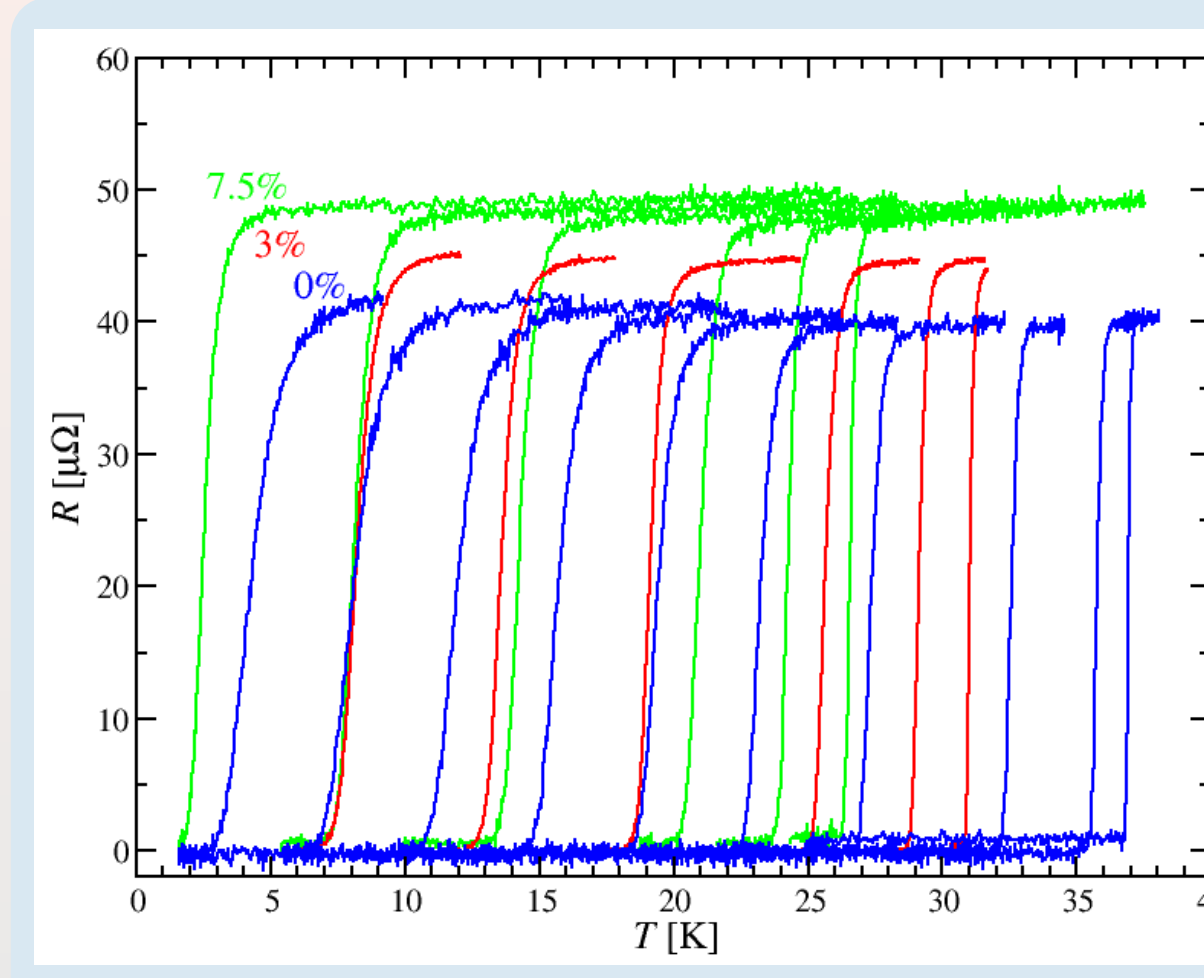
Dva niza nedopiranih i dopiranih s 3 i 7,5 tež% nanočestica CuFe₂O₄ MgB₂/Fe žica napravljene su metodom praška u cijevi sinteriranjem na 650°C odnosno 750°C u atmosferi čistog Ar tijekom 1 sata. CuFe₂O₄ čestice veličine (6.5±1)nm (sl.1) su izabrane jer su superparamagnetske [9] (što bi trebalo smanjiti njihovu aglomeraciju) te zato što bi njihovom reakcijom s Mg i B mogli nastati brojni centri zapinjanja MV (MgCu₂, Fe₂B, FeB, MgO) i time dodatno pojačanje zapinjanja u odnosu na dopiranje s Fe₃O₄ [7]. Žice su imale unutrašnji promjer oko 0,8mm.



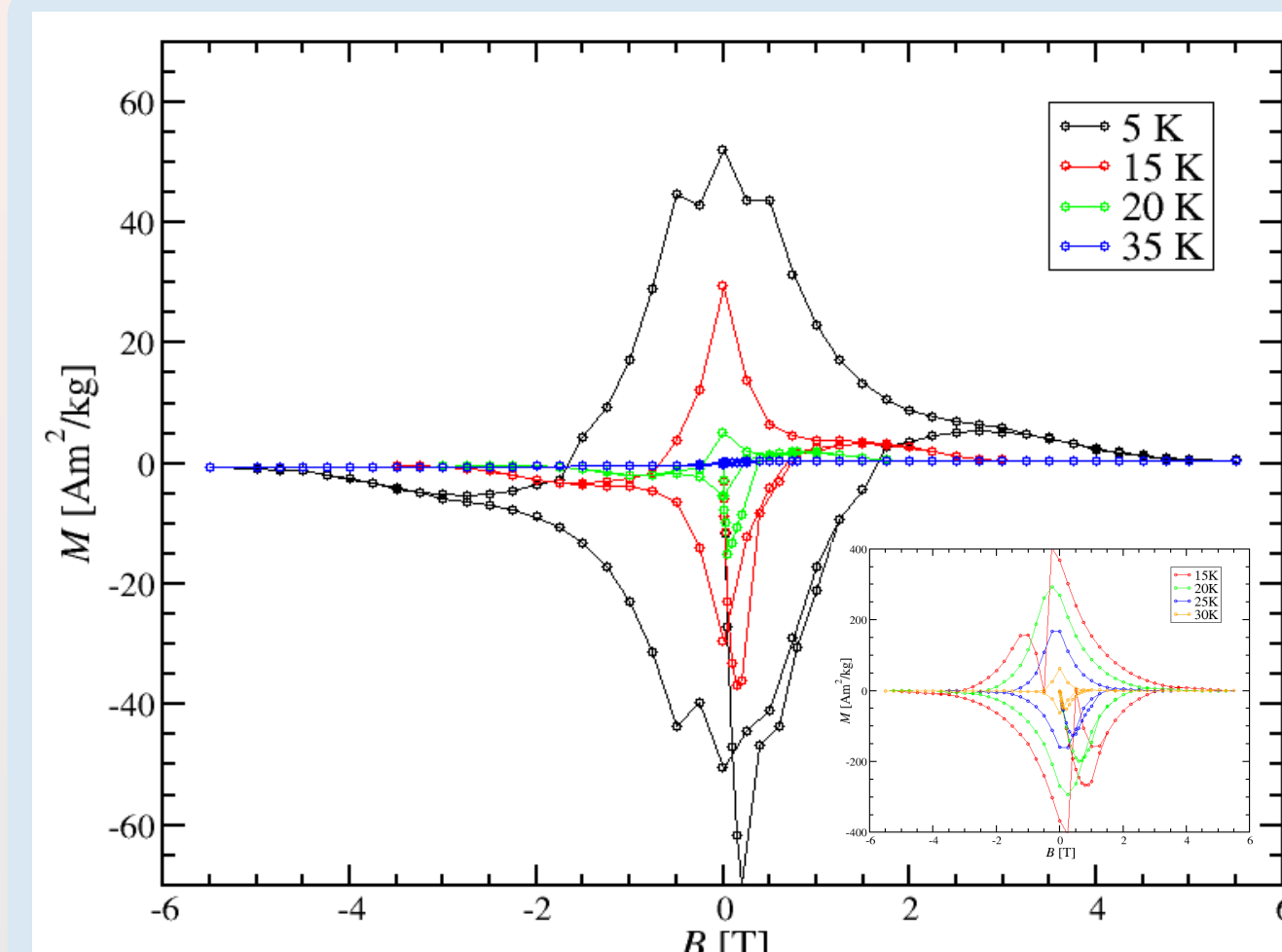
Sl.1 Difraktogram nanočestica CuFe₂O₄



Sl.2 Difraktogram sinteriranih uzoraka čistog MgB₂ (dolje) te dopiranog s CuFe₂O₄ u udjelu 3tež% (sredina) i 7,5tež% (gore).



Sl.3 Magnetoopori žica čistog MgB₂ u poljima 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16T (plavo) te MgB₂ dopiranog s CuFe₂O₄ u udjelu 3tež% u poljima 0, 1, 2, 4, 6, 8T (crveno) i 7,5tež% u poljima 0, 1, 2, 4, 6, 8T (zeleno).



Sl.4 Magnetska histereza jezgre žice MgB₂ dopirane s 3tež% CuFe₂O₄. Umetak: Histereza jezgre žice čistog MgB₂.

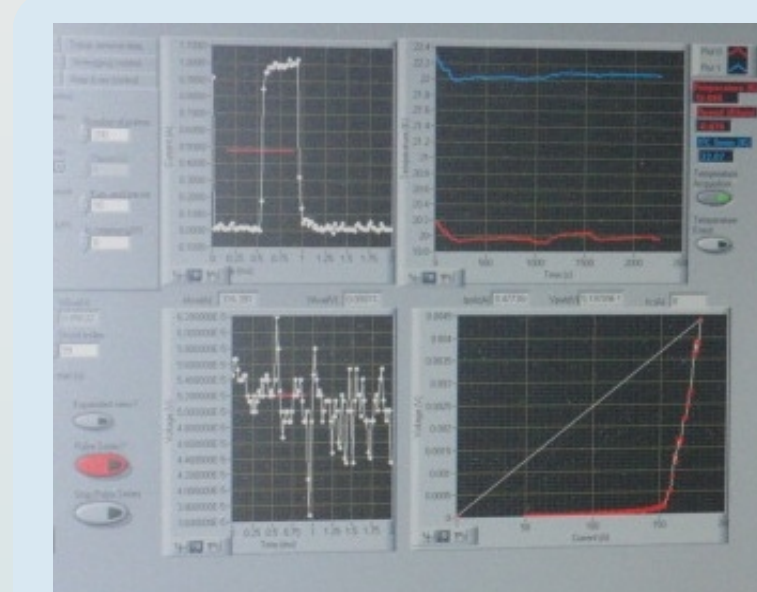
Mjerenja

Struktorna analiza uzoraka izvršena je raspršenjem CuK α rendgenskih zraka (sl.2) korištenjem PW1820 difraktometra. Elektromagnetska mjerenja (magnetizacija, električna otpornost i naponsko strujne V-I krivulje) izvršena su korištenjem SQUID magnetometra MPMS5 i Oxford Instruments magneta [10] u području temperatura 3-42K i polja B do 5.5T (MPMS) odnosno 16T (magnet).

Otpori su mjereni na žicama duljine oko 1.5cm [10], a otporni prijelazi (sl.3) su korišteni za određivanje T_c i $B_{irr}(T)$ (sl.6).

Iz ireverzibilne magnetizacije (mjerene na ogoljenim jezgrama žica, sl.4) izračunata je kritična struja korištenjem modela kritičnog stanja: $J_{cm} = 20\Delta M / (a - a^2/3b)$, $a < b$ su poprečne dimenzije uzorka.

Kritične struje su također mjerene direktno iz V-I krivulja dobivenih korištenjem pulsne metode (sl.5) [10] na temperaturama 5 i 20K te poljima $B \leq 16\text{T}$.



Sl.5 Naponsko strujna V-I krivulja izmjerena pulsnom metodom. [10]

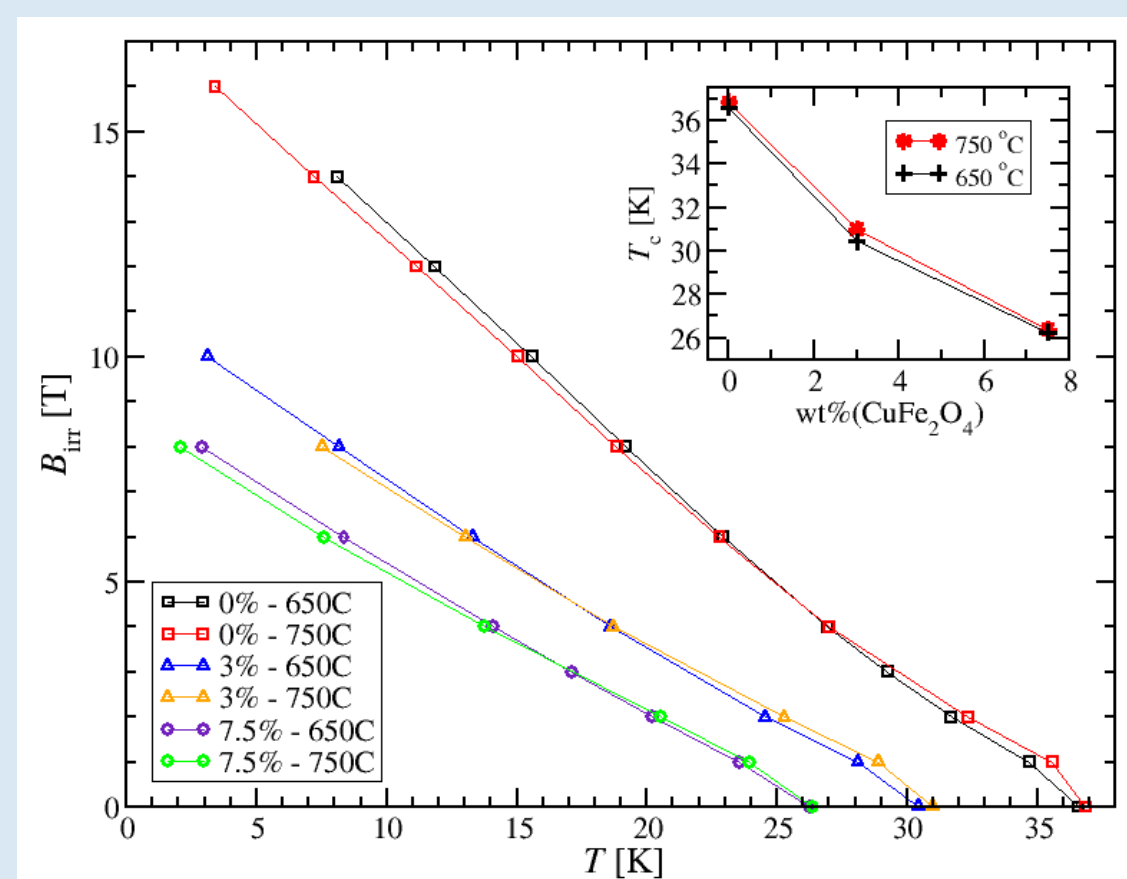
3. Rezultati i rasprava

Difraktogrami svih uzoraka (sl.2 uzorci sinterirani na 750°C) pokazuju glavnu, dobro razvijenu fazu MgB₂ sa kristalitima veličine oko 20nm i znatno prisustvo MgO faze. Udio MgO raste s dopiranjem, a dopiranjem se javlja i koljeno/vrh oko $2\theta = 45^\circ$, što bi moglo ukazivati na pojavu Fe₂B ili Mg₂Cu faze. Ostale linije Fe₂B faze kao i one CuFe₂O₄ (=Fe₃O₄) se pretežito preklapaju s onim MgO faze [7] (osim vrha oko $35,4^\circ$) pa ih se ne može pouzdano utvrditi. Međutim porast učešća MgO faze dopiranjem i pojava koljena vrha oko 45° jasno ukazuje na određenu reakciju čestica CuFe₂O₄ sa Mg i B tijekom sinteze.

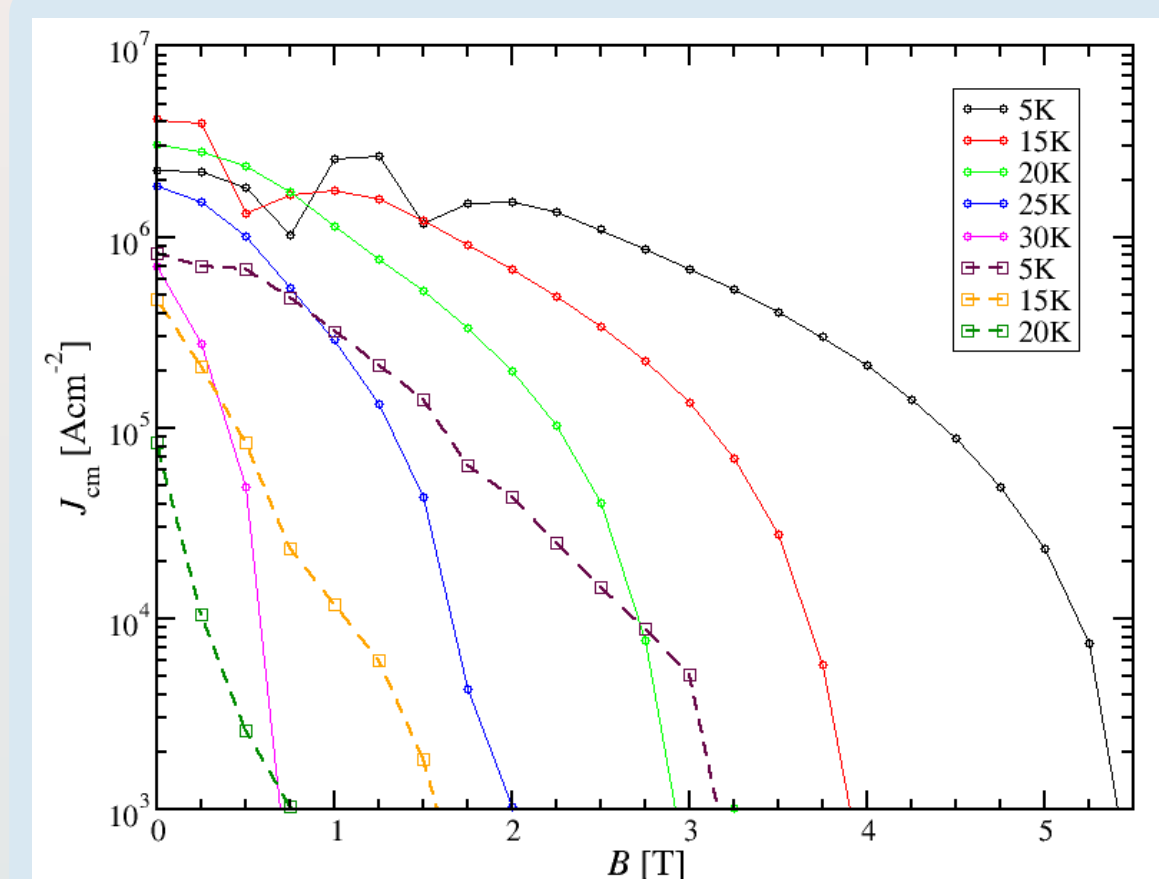
Magnetoopori i ireverzibilna polja

Jači pomak prema nižim temperaturama; jače širenje prijelaza porastom polja B u dopiranim žicama u odnosu na nedopiranu (sl.3) ukazuje da nije postignuto pojačanje zapinjanja MV dopiranjem. Istovremeno, temperature prijelaza T_c brzo opadaju s koncentracijom Cu-Fe-O, $\Delta T_c / \Delta \text{tež\%} = 2\text{K/tež\%}$, što ukazuje na jako (magnetsko) razbijanje Cooperovih parova (umetak sl.6). (Posebno, T_c žice sa 7,5tež% Cu-Fe-O je ispod 30K, što je u neskladu s konačnom J_{cm} uzoraka s 5 i 10 tež% Fe₃O₄ na 30 i 35K u ref. [7].

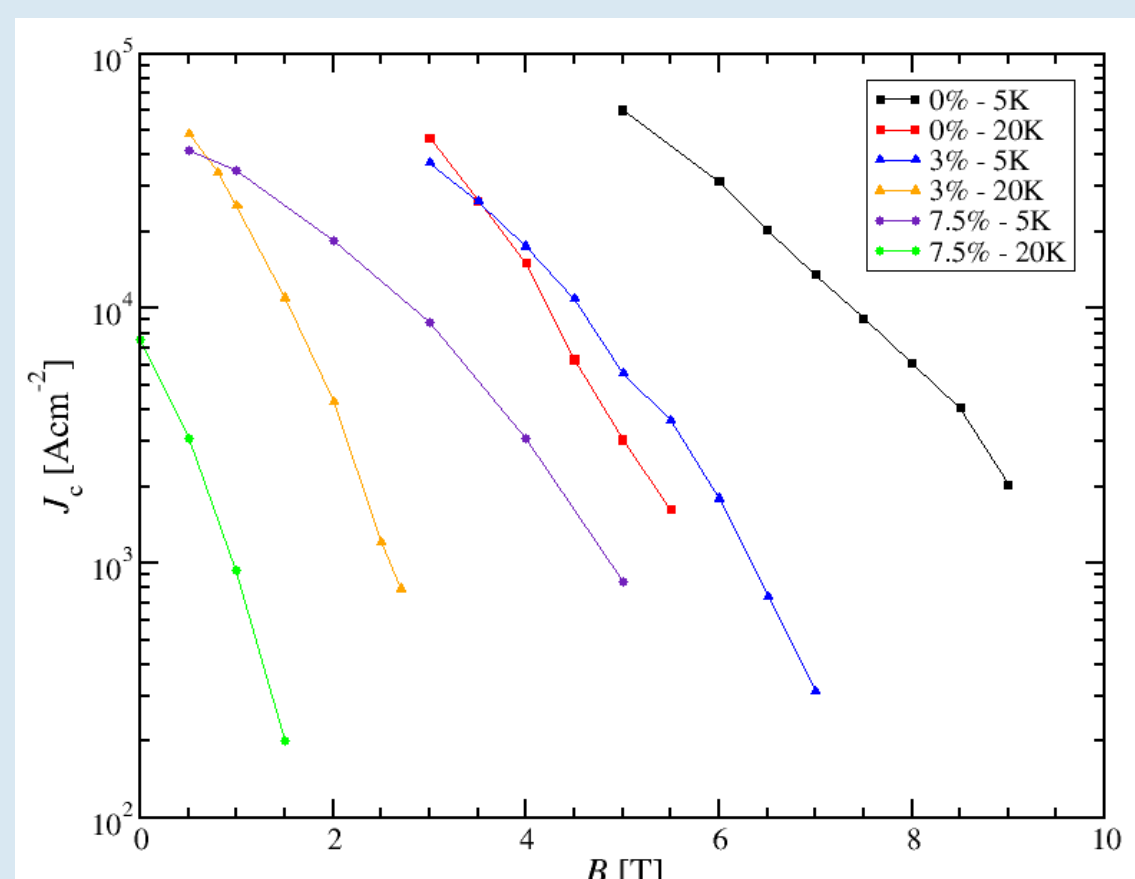
Linije ireverzibilnosti $B_{irr}(T)$ dopiranih uzoraka su niže i sporije rastu opadanjem temperature od one čiste žice (sl.6), što je u skladu sa slabijim zapinjanjem MV. Posebno, B_{irr} žica sa 0, 3 i 7,5tež% CuFe₂O₄ su na 5/20K redom 16/7,6T, 9,2/3,6T i 7,2/2,2T.



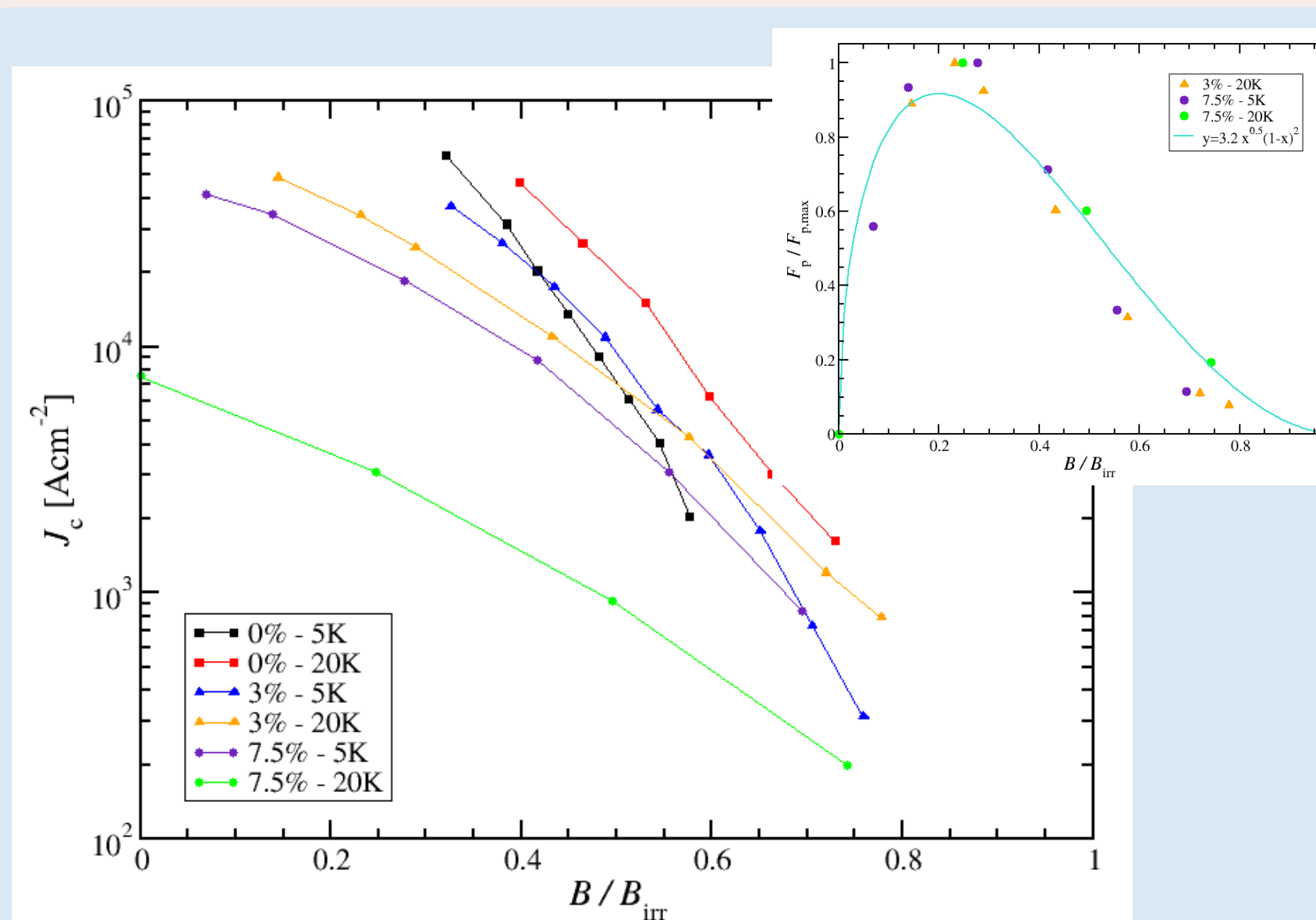
Sl.6 Temperaturna ovisnost ireverzibilnog polja. Umetak: Promjena temperature prijelaza s udjelom dopiranja.



Sl.7 Magnetske gustoće kritičnih struja J_{cm} u ovisnosti o polju B za jezgre žica čistog MgB₂ (pune linije) i dopiranog s 3tež% CuFe₂O₄ (iscrtkane linije).



Sl.8 Transportne gustoće kritičnih struja J_c u ovisnosti o polju B za žice čistog MgB₂ te dopiranog s 3 i 7,5tež% CuFe₂O₄.



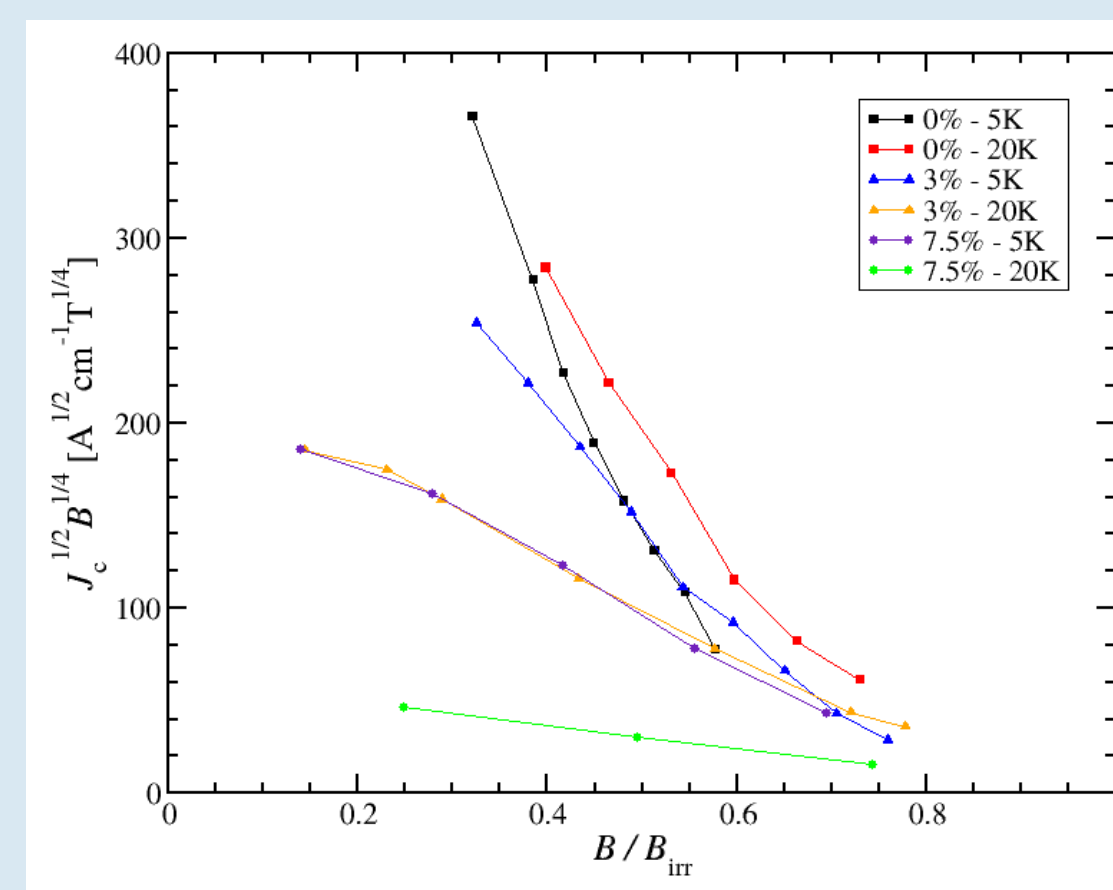
Sl.9 Transportne gustoće kritičnih struja J_c u ovisnosti o reduciranom polju B/B_{irr} . Umetak: Normirana sila zapinjanja MV u ovisnosti o reduciranom polju. Linija je funkcija prilagodbe.

4. Zaključci

Naše sustavno istraživanje ireverzibilnih polja $B_{irr}(T)$ i kritičnih struja $J_c(B)$ (magnetskih i transportnih) MgB₂ žica dopiranih s 0, 3 i 7.5 tež% CuFe₂O₄ magnetskih nanočestica (6.5nm) ne pokazuje pojačanje zapinjanja MV povezano s magnetskim međudjelovanjem MV i čestica. Štoviše, dopiranje jako snižava T_c , $B_{irr}(T)$ i $J_c(B)$ što ukazuje da prevladava učinak magnetskog razbijanja parova i slabljenja kontakata između supravodljivih zrna. Ti loši utjecaji magnetskih nanočestica su još pojačani njihovom nejednolikom raspodjelom, na što upućuju jako zakrivljeni Kramerovi prikazi.

To pokazuje da će očekivano pojačanje zapinjanja MV [4] pomoću magnetskih nanočestica biti teže ostvariti u masivnim uzorcima MgB₂ [8] nego što je slučaj u tankim filmovima.

Sl.10 Kramerov prikaz gustoće kritičnih struja J_c u ovisnosti o polju B.



Literatura

- [1] S.X. Dou ... O. Husnjak and E. Babić, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 097002
- [2] E.W. Collings et al., Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 103001
- [3] R. Flukiger et al., Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 085002
- [4] I.F. Lyuksyutov and V.I. Pokrovsky, Adv. Phys. **54** (2005) 241
- [5] M. Vélez et al., J. Magn. Magn. Mater. **320** (2008) 2547
- [6] A. Snezhko et al., Phys. Rev. B **71** (2005) 024527
- [7] B. Qu et al., Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 015027
- [8] T. Kuroda et al., Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 1152
- [9] D. Pajić et al., J. Magn. Magn. Matter. **281** (2004) 353
- [10] O. Husnjak, E. Babić, I. Kušević et al., Solid State Commun. **143** (2007) 412
- [11] J. Horvat et al., Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 065003