

# **MÁGNESES JELENSÉGEK NEMEGYENSÚLYI FÉMES RENDSZEREKBE**

**MTA doktori értekezés tézisei**

**Kiss László Ferenc**



**MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Szilárdterfizikai és Optikai Intézet  
Kísérleti Szilárdtestfizika Osztály  
Nemegyensúlyi Anyagok Kutatócsoport**

**Budapest  
2023**

## MÁGNESES JELENSÉGEK NEMEGYENSÚLYI FÉMES RENDSZEREKBEN

A mágnesség jelensége évezredek óta foglalkoztatja az emberek fantáziáját, de intenzív kutatása csak a XIX. század második felében indult el. Első elvekből következő leírását, különösen fémes rendszerek esetén, csak a kvantummechanika törvényszerűségeinek megismerése tette lehetővé. A gyakorlatban azonban már a kezdetektől használtak mágneses anyagokat és ma is a minket körülvevő elektromos és elektronikus eszközök szinte mindegyike tartalmaz ilyeneket. Attól függően, hogy mely tulajdonságaikat optimalizálják, két csoportjukat különböztethetjük meg: lágymágneses anyagok (nagy telítési mágnesezettség és permeabilitás) és keménymágneses anyagok (nagy koercitív tér). Az optimalizáláshoz minél több mágneses anyag kísérleti adatainak ismeretére van szükség. Sokszor azonban az optimális tulajdonságokat adó összetétellel bíró ötvözetek nem léteznek egyensúlyi állapotban. Az elmúlt évtizedekben számos eljárás vált ismertté, mellyel nemegyensúlyi fázisokat lehet előállítani. Ilyenek a fémolvadékból történő gyorshűtés (ennek egyik fajtája az ún. „melt-spinning”, amelynél egy gyorsan forgó fémhenger palástján történik a hűtés), a gyorshűtéssel előállított amorf ötvözetek teljes vagy részleges átkristályosítása, az atomonkénti rétegleválasztás hordozóra (párologtatással, porlasztással, kémiai redukcióval vagy elektrolízissel), a mechanikai őrlés és ötvözés.

### KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK

A doktori értekezésben azt vizsgálom, hogyan befolyásolja a fémes anyagok nemegyensúlyi állapota mágneses tulajdonságaikat. Közöttük vannak gyorshűtéssel előállított amorf ötvözetek (fémüvegek), melyek egyensúlyi rendszerekre is jellemző ferromágneses (FM)-paramágneses (PM) fázisátmenetet mutatnak. Ennek természete régóta kutatás tárgya, de az átmenet hőmérsékletén, a Curie-hőmérsékleten ( $T_C$ ) létrejövő mágneses entrópiaváltozás jelentősége napjainkban felértékelődött. Ez az alapja ugyanis az ún. magnetokalorikus effektusnak, mely az anyag hőmérsékletének hirtelen (adiabatikus) mágnesestér-ugrás hatására bekövetkező változását jelenti. Ez az effektus a FM-PM átalakulás hőmérsékletén a legnagyobb és lehetővé teszi mágneses elven működő hűtőberendezés megvalósítását, mely felválthatja a hagyományos, üvegházhatást fokozó anyagokat tartalmazó, gáz-folyadék átalakuláson alapuló hűtőrendszereket. A gyakorlati hasznosíthatáshoz olyan anyagokra van szükség, melyek egyrészt nagy entrópiaváltozást mutatnak, másrészt a FM-PM fázisátmenet hőmérséklete szobahőmérséklet közelébe esik. Itt jut nagy szerep a nemegyensúlyi anyagoknak, melyek tulajdonságai (pl.  $T_C$ ) folyamatosan változtathatók az összetétel függvényében. A disszertációban elsősorban amorf ötvözetek összetételének és entrópiaváltozásának kapcsolatát és az e mögött rejlő fizikai összefüggéseket vizsgálom.

A nemegyensúlyi rendszerekben a fenti szokványos mágneses viselkedés mellett anomális mágneses jelenségekkel is találkozunk. A doktori értekezésben három nemegyensúlyi anyagcsalád anomális mágneses tulajdonságaival foglalkozom. Az kapcsolja őket össze, hogy mindegyikben mágneses inhomogenitások jelennek meg, melyek hasonló mágneses viselkedést eredményeznek. Az egyes rendszerek az inhomogenitás térbeli kiterjedésében (skálájában) különböznek egymástól.

A hosszútávú kristálytani rend nélküli, ún. amorf ötvözetek (más néven fémüvegek vagy üvegfémek) anyagcsaládján belül a vas-korai átmenetifém (pl. Fe-Zr, Fe-Y) rendszerek mágneses inhomogenitásának méretskálája atomi szintű. Az utóbbi csoportba tartozó Fe-Zr összetételű fémüvegek hiperfinomtér-eloszlásának összetétel- és hőmérsékletfüggéséből az a következtetés vonható le, hogy a vasatomok dominánsan kétféle környezetben fordulnak elő.

Vannak kis atomi térfogatú, kis mágneses momentumú, csak Fe-szomszédú vasatomok 1-1,5  $\mu_B$  körüli atomi mágneses momentummal és nagyobb atomi térfogatú, Zr-szomszédú vasatomok, melyek momentuma tipikusan 2  $\mu_B$ . Felmerül a kérdés, hogy a két különböző környezettel rendelkező vasatom jelenléte kapcsolatban lehet-e a vasban dús Fe-Zr fémüvegekben szobahőmérséklet alatt megfigyelhető anomális mágneses viselkedéssel. Az anomália egyrészt szuperparamágneses-jellegű viselkedésben mutatkozik meg a  $T_g$  spinüveg-átalakulási hőmérséklet, ill. a  $T_C$  Curie-hőmérséklet fölött, másrészt a dc-szuszeptibilitás erőteljes csökkenésében  $T_g$ , ill.  $T_f$ , az ún. reentráns spinüveg-átalakulási (spinbefagyási) hőmérséklet alatt. További anomália, hogy a koercitív tér meredeken nő  $T_g$ , ill.  $T_f$  alatt és ebben a hőmérséklet-tartományban mágneses relaxáció (a minta adott hőmérsékleten és mágneses térben mért mágnesezettségének időfüggése) figyelhető meg. A mágneses relaxáció függ a minta mágneses előéletétől. A mágneses anomáliákat az irodalom eleinte antiferromágneses kölcsönhatások jelenlétével magyarázta, de erre a mi vizsgálataink nem utaltak. Ehelyett a kétféle vasmomentum által indukált mágneses inhomogenitásokkal magyaráztam a jelenséget.

A részleges kristályosítás révén előállított ún. nanokristályos ötvözetekben atominál nagyobb méretű mágneses inhomogenitások jelennek meg. Ezek is nemegyensúlyi anyagok, akárcsak az amorf ötvözetek, de itt az atomi szerkezet szempontjából két jól elkülöníthető fázisról van szó. A dolgozat egyrészt ún. Finemet-típusú ötvözetekkel foglalkozik, melyek domináns komponense (több mint 60 at.% vas) mellett kis mennyiségű átmenetifém adalék (esetünkben Mo, Cr) van és ezen kívül a további összetevői: Si, B, Nb és Cu. Másrészt ún. Nanoperm-típusú ötvözeteket is vizsgáltunk, melyek nem tartalmaznak Si-ot. A két jól elkülöníthető két fázis egyike a kezdeti amorf ötvözet részleges kristályosodásának első lépcsőjében kiváló, 10 nm nagyságrendű Fe-Si összetételű (Finemet), ill. csaknem tiszta vashól álló (Nanoperm) szemcsékből áll, melyek a másik fázist képező, visszamaradó amorf mátrixba vannak beágyazva. Mindkét ötvözetcsalád az amorf mátrix Curie-hőmérséklete alatt nagy permeabilitású, kis koercitív terű anyagként viselkednek, aminek oka a ferromágneses amorf mátrix által a mágneses szemcsék között létrehozott csatolásban keresendő. Az amorf mátrix Curie-pontja felett azonban a szemcsék szétcsatolódnak és szuperparamágneses rendszerként kezdenek viselkedni.

A néhány nanométeres vastagságú rétegeket tartalmazó, nagyvákuumban történő párologtatással előállított (pl. Fe-Ag) multirétegekben is létrejöhet atominál nagyobb skálájú mágneses inhomogenitás. Mivel a vas és az ezüst egyensúlyi állapotban nem keverednek, érdekes kérdés volt, hogy a nemegyensúlyi fázisok előállítására alkalmas párologtatással milyen szerkezetek jönnek létre. Hamar kiderült, hogy kis nominális vasvastagságnál (tipikusan  $\sim 10$  Å alatt) a Fe-rétegek nem folytonosak az Ag-rétegek között, hanem mágneses vasklaszterek jönnek létre, melyeket ezüstmátrix vesz körbe. Ismét szuperparamágneses viselkedést mutató fémes rendszer állt elő, melynek a mágneses tulajdonságai alapvetően a három fő előállítási paramétertől (nominális vas-, ill. ezüstvastagság és a rétegpárok száma) függenek.

A fenti anyagcsaládokban közös, hogy mindenütt megjelennek nanométeres vagy néhányszor 10 nanométeres mágneses inhomogenitások (klaszterek), melyek a kis részecskékre jellemző szuperparamágneses-jellegű viselkedést mutatnak. Néel 1949-ben megjelent úttörő munkái óta a kis részecskék mágneses tulajdonságait egyre növekvő érdeklődés övezi mind tudományos, mind technológiai szempontból (pl. mágneses elven működő információtárolás). Ebben az esetben a mágneses klaszter ún. egydomén-állapotban van, melyhez az atomi mágneses momentumoknál nagyságrendekkel nagyobb ( $\sim 1000 \mu_B$ ) momentum (szuperspin)

rendelhető. Mivel a ferromágneses nanorészecske mindig rendelkezik valamilyen mágneses anizotrópiával (pl. kristály- vagy alakanizotrópia), amit az egyszerűség kedvéért egytengelyűnek tekintünk, ezért elegendően alacsony hőmérsékleten a részecske mágnesezettsége a könnyű irányú tengely két irányának valamelyikébe mutat. Egy ilyen ferromágneses nanorészecske akkor viselkedik szuperparamágnesesen, ha a mérés hőmérsékletének megfelelő termikus energia ( $k_B T$ , ahol  $k_B$  a Boltzmann-állandó és  $T$  a hőmérséklet) összemérhető vagy nagyobb, mint a mágnesezettsége megfordításához szükséges energiáját ( $E_B$ ). Ilyenkor a szuperspin iránya egy karakterisztikus relaxációs idővel fluktuál ( $\tau$ ), melyet a Néel–Brown-kifejezés ad meg:  $\tau = \tau_0 \exp(E_B/kT)$ , ahol  $\tau_0 = 10^{-9}$ - $10^{-10}$  s az ún. próbálkozási frekvencia inverze. Amennyiben egy részecske momentuma ún. koherens rotációval fordul meg (azaz az atomi spinek fordulás közben egymással párhuzamosan maradnak), az energiagátat a részecske mágneses anizotrópiája hozza létre ( $E_a = KV$ , ahol  $K$  az anizotrópia-állandó és  $V$  a részecske térfogata). Más átmágnesezési mechanizmus esetén az energiagátat más fizikai folyamat határozza meg (pl. az ún. curling-típusú átmágnesezési módnál az anizotrópia a kicserélődési kölcsönhatásból származik). A kis részecskék mágneses viselkedését az ún. blokkolási hőmérséklet jellemzi ( $T_B$ ), amely alatt a részecskemomentum mozdulatlanok tűnik (szaknyelven blokkolva van) a mérés időskáláján ( $\tau_m$ ). Ekkor  $\tau_m \approx \tau$ , így  $T_B \approx E_a/[k_B \ln(\tau_m/\tau_0)]$ .

Az előbb vázolt szuperparamágneses viselkedés a nem kölcsönható mágneses részecskék tulajdonsága, ami azt jelenti, hogy az egyes részecskék momentumainak irányai között nincs semmilyen korreláció, azaz egy adott részecske momentumának a fluktuációját kizárólag a saját energiagátja határozza meg. A részecskék közötti kölcsönhatás (pl. a leggyakoribb dipólus-dipólus kölcsönhatás) módosítja az egyes részecskék energiagátjait, így azok már nem lesznek többé függetlenek egymástól. Ha a kölcsönhatás nem túl nagy a termikus energiához viszonyítva (azaz egy adott részecske relaxációját alapvetően a saját energiagátja szabja meg, melyet csak kissé módosít a kölcsönhatás), a rendszer továbbra is leírható módosított energiagátú, kölcsönhatás nélküli szuperparamágneses (SPM) klaszterek együtteseként (átlagtérelmélet). A kölcsönhatás növekedésével azonban a véletlen irányítottságú szuperspinekből egy spinüvegszerű állapot, az ún. szuperspinüveg-állapot (superspin-glass state) alakul ki. A kollektív állapot kialakulását egyértelműen jelzi az ún. mágneses memóriaeffektus megjelenése.

## CÉLKITŰZÉSEK

A magnetokalorikus effektus gyakorlati hűtésre való felhasználásához olyan anyagra van szükség, melynek Curie-hőmérséklete szobahőmérséklet környékére esik és nagy a telítési mágnesezettsége (azaz a fázisátmenet nagy mágnesezettség-változással jár). Ezért természetesnek tűnt, hogy alkalmas anyagot keresvén a csoportunkban korábban vizsgált vasdús (12-20 at.% B-tartalmú) Fe-B összetételű fémüvegekből indultunk ki. Ezen anyagokban a vas atomi mágneses momentuma monoton csökken a B-tartalom növekedésével, míg a szobahőmérséklet feletti tartományba eső Curie-pont ezzel ellentétesen viselkedik, azaz növekszik a B növekvő koncentrációjával. A vas megfelelő lecserélése kis d-elektronszámú, ún. korai átmenetifémekkel (ETM = pl. Zr, Mn, Mo) viszont szobahőmérséklet közelébe viheti le a Curie-hőmérsékletet, a nemegyensúlyi amorf szerkezet pedig lehetővé teszi  $T_C$  finomhangolását az összetétel változtatásával. Ezért célunk a Fe-ETM-B összetételű fémüvegek mágneses entrópiaváltozásának tanulmányozása volt az ETM- és a B-tartalom függvényében. Az eredményeket a disszertáció 3. fejezetében tárgyalom.

Az vasdús amorf Fe-Zr ötvözetek vizsgálata során az volt a fő kérdés, hogyan egyeztethető össze a kétfajta vaskörnyezethez kapcsolható nagy, ill. kis vasmomentum, valamint az antiferromágneses kölcsönhatás hiánya a szobahőmérséklet alatt kísérletileg megfigyelhető anomális mágneses tulajdonságokkal. Ezen jelenségek megmagyarázásához nem csak a tömbi mágnesezettséget mértem a hőmérséklet és a mágneses tér függvényében, hanem célul tűztem ki a mágneses relaxáció tanulmányozását a mágneses viszkozitás mérésével, valamint az alacsony-hőmérsékleti anomáliák nyomásfüggésének vizsgálatát. Utóbbit annak felismerése motiválta, hogy a mágneses viselkedés egyik legfontosabb paramétere az atomi térfogat, melynek befolyásolására a (hidrosztatikus) nyomás változtatása ad lehetőséget. A mágneses méréseken túl nemzetközi együttműködés révén szinkrotron-röntgendiffrakció alkalmazásával széles nyomástartományban vált elérhetővé az atomi térfogat ellenőrzése. Ezáltal mód nyílt a mágneses tulajdonságok és az atomtér fogat összekapcsolására. Az eredményeket a disszertáció 4. fejezetében és a Függelék I-ben ismertetem.

A Fe-Cr alapú FINEMET-típusú nanokristályos ötvözetek esetében a cél a ~10 nm méretű, superparamágneses (Fe,Si) részecskék hiszterézisgörbéinek leírása volt az amorf mátrix Curie-hőmérséklete felett, amikor a mágneses klaszterek közötti kicserélődési kölcsönhatás megszűnik ugyan, de a dipólus-dipólus kölcsönhatás továbbra is megmarad közöttük. Egy adott összetételű kiindulási amorf ötvözetben különböző hőmérsékleteken végzett részleges kristályosítással változtattuk a kivált részecskék méretét, a hőmérséklet változtatásával pedig módosítottuk a termikus energia és a dipólus-dipólus kölcsönhatási energia viszonyát. Az összetétel megfelelő változtatásával növelni tudtuk azt a hőmérséklet-tartományt, ahol a mágneses részecskék superparamágneses viselkedését tanulmányozni lehetett. Mindez azt a célt szolgálta, hogy a hiszterézisgörbék leírására használt modellt széles részecskeméret- és hőmérséklet-tartományban tesztelni lehessen. Az eredményeket a disszertáció 5. fejezetében taglalom.

A különböző vas- ( $t_{Fe}$ ), ill. ezüstvastagsággal ( $t_{Ag}$ ) és rétegpárosszámmal ( $n$ ) előállított Fe-Ag multirétegek változatos mágneses tulajdonságokat mutatnak: megfigyelhetünk superparamágneses (SPM), SPM + ferromágneses (FM) és FM-viselkedést is. Szisztematikusan változtatva a fenti három paramétert, törvényszerűségeket figyelhettünk meg a kialakult mágneses tulajdonságokban. Kezdetben sem az irodalom, sem mi nem tulajdonítottunk jelentőséget a rétegpárosszámtól való függésnek. Azt gondoltuk, hogy  $n$  növelése csak a mágneses jelet sokszorozza meg, de a minta kvalitatív viselkedését nem változtatja meg. Amikor felismertük, hogy ez nem feltétlenül van így, szisztematikusan multiréteg-sorozatokat készítettünk, hogy tisztázzuk ezt a kérdést. Felmerült az a kérdés is, hogyan lehetne közvetlen kísérleti módszerrel kimutatni a mágneses vasklaszterek közötti kölcsönhatást. Erre alkalmas az ún. mágneses memóriaeffektus. Az eredményeket a disszertáció 6. fejezetében és a Függelék II-ben részletezem.

## VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A tömbi mágneses mérések egy részét egy  $10^{-4}$  emu érzékenységgű, Foner-típusú rezgőmintás magnetométerrel végeztem, melyhez a mágneses teret egy 18 kOe maximális terű elektromágnes szolgáltatja. A minta hőmérsékletét 15-300 K között tudtam változtatni. Később beszereztünk egy Quantum Design-gyártmányú,  $10^{-8}$ - $10^{-7}$  emu érzékenységgű SQUID-magnetométert (Superconducting Quantum Interference Device), melynek szupravezető mágnes 50 kOe maximális mágneses teret képes létrehozni. Alapkiépítésben 1,8-400 K között lehet változtatni a hőmérsékletet, de egy magas-hőmérsékleti kályhabetéttel 300-800 K között is dolgozhatunk. Továbbá ac-szuszeptibilitást is lehet mérni 0,01-1000 Hz frekvencia-

tartományban. A SQUID-magnetométerbe behelyezhető egy Cu-Be ötvözetből készült nyomáscella, mellyel kb. 1 GPa (10 kbar) értékig tudunk hidrosztatikai nyomás alá helyezni szilárd halmazállapotú mintákat olaj közvetítő közeg segítségével. A SQUID-magnetométerrel sokkal pontosabban tudunk mágnesezettséget mérni tömbi mintákon, a nagyon kicsi mágneses momentumú multiréteg-minták mágneses vizsgálatát pedig csak ez a berendezés tette lehetővé. A nanokristályos anyagok méréseinek egy részét a sevillai egyetemmel folytatott együttműködés keretében spanyol kollégák végezték egy Lake Shore-gyártmányú rezgőmintás magnetométerrel.

Az amorf és multiréteg-mintákat munkatársaim állították elő a saját csoportunkon belül. Az amorf minták fémolvadékból forgó rézhengerre történő gyors hűtéssel ( $\sim 10^6$  K/s) vákuumban, míg a multiréteg-minták nagyvákuumban végzett párologtatással készültek. A (részben) nanokristályos minták kiinduló amorf ötvözeit Sevillában spanyol kollégák állították elő és a hőkezelések is ott történtek halogén-lámpás kályhával, ill. differenciális pásztázó kaloriméterrel (DSC).

Nemzetközi együttműködéssel a DESY-ben (Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg) szinkrotron-röntgendiffrakciós méréseket végeztem 35 GPa maximális nyomásig vasdús Fe-Zr fémüvegek atomtérfogatai nyomásfüggésének meghatározása céljából.

## ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### Fe-ETM-B(-Cu) fémüvegek magnetokalorikus tulajdonságai

1. Megmutattam, hogy a Fe-ETM-B(-Cu) fémüvegekben (ETM = Cr, Mn, Mo korai átmenetifémek) a  $T_C$  környezetében mért mágneses entrópiaváltozás összemérhető egyes kristályos Gd-alapú ötvözetekben mért értékekkel és az irodalomból ismert magnetokalorikus anyagokkal összehasonlítva jelentősnek tekinthető. Kimutattam, hogy a mért entrópiaváltozás arányos az ötvözet telítési mágnesezettségével (az egy átmenetifém-atomra jutó átlagos mágneses momentummal) [T1,T2,T4]. B-dús Fe-ETM-B(-Cu) fémüvegekben (ETM = Zr, Cr, Mo) a vasatomok mágneses entrópiaváltozáshoz való járulékanak anomális növekedését figyeltem meg a B-tartalom növekedésével (15 at.% felett), amely korrelál a vas átlagos atomi mágneses momentumának ugyanebben az összetétel-tartományban megfigyelt anomális növekedésével. A jelenséget részletesen a  $Fe_{92-x}Zr_7B_xCu_1$  ( $x > 15$  at.%) fémüvegrendszerben vizsgáltam és a vas átlagos atomi momentumának  $x = 15$  at.% felett tapasztalt anomális növekedését azzal magyaráztam, hogy a B- és Zr-atomok közötti nagy vonzó kölcsönhatás megrövidíti a B-Zr távolságot, mely megnöveli a vasatomok átlagos atomi térfogatát és így az átlagos atomi momentumát is [T2,T3,T5].

### Vasban dús Fe-Zr fémüvegek alacsony-hőmérsékleti mágneses tulajdonságai

2. Megmutattam, hogy a gyorsított amorf  $Fe_{1-x}Zr_x$  ( $x = 7, 8, 9, 10$  és  $12$ ) ötvözetek mágnesen inhomogének, azaz véges mágneses klaszterekből állnak, melyek mérete növekszik a Zr-tartalommal. Ezzel a granuláris mágneses szerkezettel értelmezhető az ötvözetek szuperparamágneses viselkedése  $T_g$  ( $x = 7$ ), illetve  $T_C$  ( $x = 8, 9, 10$  és  $12$ ) fölött és a dc-szuszeptibilitás alacsony hőmérsékleteken megfigyelhető anomáliája  $T_g$  ( $x = 7$ ), illetve  $T_f$  ( $x = 8, 9$  és  $10$ ) alatt. A magyarázat Néel kis részecskékre vonatkozó elméletén alapszik, melyben a részecskékre méreteloszlást tételezek fel és a köztük lévő mágneses kölcsönhatást átlagtérrel veszem figyelembe. Megmutattam, hogy a mért  $M(H)$ -görbék (ahol  $M$  a mágnesezettség és  $H$  az alkalmazott mágneses tér)  $T_g$  ( $x = 7$ ), illetve  $T_C$  ( $x = 8$  és  $12$ ) fölött

univerzális görbéké transzformálhatóak, melyek illeszkednek a modell elméleti görbéihez [T6]. Amorf  $\text{Fe}_{1-x}\text{Zr}_x$  ( $7 \leq x \leq 9$ ) ötvözetek spinüvegállapotában megmutattam, hogy a redukált koercitív tér,  $h_c = H_c/2\pi M_s$  (ahol  $H_c$  a mért koercitív tér és  $M_s$  a telítési mágnesezettség) az egyszerre forduló (nukleálódó) spinek (klaszterek) méretére jellemző karakterisztikus méret ( $D_a$ ) függvényében  $h_c \sim (1/D_a)^{2.0 \pm 0.2}$  szerint csökken. A koercitív tér fenti méretfüggése arra utal, hogy a vasban dús amorf Fe-Zr ötvözetek spinüvegállapotában a klaszterek curling-típusú nukleációs mechanizmussal fordulnak meg [T8].

3. Megmutattam, hogy a spinüvegszerű amorf  $\text{Fe}_{93}\text{Zr}_7$  ötvözetben nincs kimutatható kicserélődési (egyirányú) anizotrópia. A térhűtési effektus hiánya arra utal, hogy az ötvözetben nincsenek jelentős antiferromágneses kölcsönhatások [T7,T9]. Megmutattam, hogy a gyorsított amorf  $\text{Fe}_{1-x}\text{Zr}_x$  ( $x = 7$  és  $9$ ) ötvözetekben  $T_g$  ( $x = 7$ ) csökken,  $T_f$  ( $x = 9$ ) nő a (hidrosztatikai) nyomás növekedésével. Az 2. tézispontban vázolt granuláris (klaszter-) modellt kiegészítettem a klaszteranizotrópia új értelmezésével, mely képes megmagyarázni nem csak  $T_g$  és  $T_f$  ellentétes nyomásfüggését, de értelmezni tudja a szuszceptibilitás és a 4. tézispontban tárgyalt koercitív tér hőmérséklet- és összetétel-függését is a spinüvegállapotban, valamint a szuperparamágneses viselkedést  $T_C$  felett. Kiszámoltam egy  $R$  sugarú, mágnesezettségét curling-típusú mechanizmussal megfordító részecske termikus blokkolásának energiagátját ( $\Delta E \sim AR$ , ahol  $A$  a kicserélődési állandó), mely a hagyományos klaszteranizotrópiából eredő energiagát ( $\Delta E \sim KV$ ) analóg kifejezése. A klaszterek egymás közötti és a ferromágneses (FM) mátrixszal való kölcsönhatását átlagtérrel vettem figyelembe. A fent levezetett energiagát kifejezése független a vasdús Fe-Zr fémüvegekre alkalmazott konkrét modelltől, ez általánosan érvényes a curling-típusú átmágnesezés mechanizmusára [T9].

### **Fe-Cr alapú FINEMET-típusú amorf-nanokristályos kompozitok mágneses tulajdonságai**

4. Megmutattam, hogy Fe-Cr alapú FINEMET-típusú nanokristályos ötvözetekben a paramágneses (PM) amorf mátrixba ágyazott (Fe,Si) összetételű, nanoméretű részecskék hiszterézisének részecskeméret- és hőmérsékletfüggése leírható dipolárisan kölcsönható SPM-részecskerendszerként. Ennek alapja egy irodalmi modell, mely a dipólus-kölcsönhatást egy effektív térrel és hőmérséklettel veszi figyelembe (átlagtéremlélet). A modell kibővítésével megmutattam, hogy a hiszterézis hőmérsékletfüggésének leírása csak úgy lehetséges, ha az effektív tér és hőmérséklet között összefüggést engedünk meg [T11,T12]. Konzisztens, kétlépcsős illesztési eljárást fejlesztettem ki, mely fizikailag értelmes értékeket adott a részecskék mágneses momentumának hőmérsékletfüggésére. A kibővített modellt általánosítottam arra az esetre, ha a részecskék méreteloszlást mutatnak és megmutattam, hogy két részecskeméretet feltételezve bizonyos nanokristályos ötvözetekben (összetételről, az amorf mátrix és a kristályos részecskék Curie-hőmérséklete közötti különbségtől függően) pontosabb leírást kapok [T13,T14]. Igazoltam, hogy a szuperparamágnesség az előbbi ötvözetekhez hasonló szerkezetű, Cr-mentes Finemet-típusú nanokristályos anyagoknak is általános tulajdonsága, de ennek kimutatása csak kis kristályostérfogat-hányadnál lehetséges [T10].

### **Fe-Ag összetételű granuláris multirétegek és granuláris ötvözetek mágneses tulajdonságai**

5. Megmutattam, hogy a Fe-Ag multirétegeket jellemző három paraméter széleskörű változtatásával ( $1 \text{ \AA} \leq t_{\text{Fe}} \leq 826 \text{ \AA}$ ,  $0 \text{ \AA} \leq t_{\text{Ag}} \leq 104 \text{ \AA}$ ,  $1 \leq n \leq 324$ ) előállított minták

mágneses viselkedése jól felismerhető mintázatba rendeződik a három paraméter háromdimenziós terében. Az SPM-viselkedésű multirétegeket határozott felület választja el a tiszta FM-jellegű és a köztük lévő vegyes SPM–FM-tulajdonságú zónától. Kimutattam, hogy az SPM-viselkedésű multirétegekben a vas nem képez folytonos réteget, hanem  $D \sim 18\text{-}20 \text{ \AA}$  karakterisztikus méretű részecskéket (klasztereket) alkot. Megmutattam, hogy a Fe-Ag multirétegek mágneses tulajdonságai nem csak a vas- és az ezüstréteg vastagságától, hanem a rétegpárok számától is függenek, utóbbi növelése nem csak megsokszorozza a mérendő mágneses választ, ahogy korábban az irodalomban gondolták, hanem minőségileg eltérő mágneses viselkedést eredményez. Megmutattam, hogy a klaszterméret növekszik a multiréteg növekedésének irányában és ez hozzájárul ahhoz, hogy  $T_B$  nő a rétegpárok számának növelésével. Rávilágítottam arra, hogy a hordozó és az arra rápárologtatott puffer-(alsó) réteg felületi tulajdonságai jelentős szerepet játszanak a mágneses tulajdonságok kialakításában, ami arra utal, hogy a felületi jellemzők jelentősen befolyásolhatják a szemcsenövekedési folyamatot. A három előállítási paraméter ( $t_{Fe}$ ,  $t_{Ag}$ ,  $n$ ) terében megalkotott mágneses „fázisdiagram” lehetővé teszi, hogy előre megjósoljuk a paraméterek tetszőleges értékeivel készített multirétegek várható alacsony-hőmérsékleti mágneses tulajdonságait [T15,T16,T17].

6. Megmutattam, hogy a Fe-Ag granuláris multirétegekben létezik ún. memóriaeffektus, ami a mágneses vasklaszterek közötti dipólus-dipólus kölcsönhatásból eredeztethető. Kétszintű rendszerek relaxációján alapuló modell segítségével tetszőleges hőkezelési folyamatra kiszámoltam a kölcsönhatásmentes SPM-részecskék szuszeptibilitásának hőmérsékleti és időfejlődését [T18].

-----  
A téziszűzetben bemutatott kutatási eredmények többsége alap kutatás-jellegű. A nemegyensúlyi mágneses rendszerekben gyakran megjelenő, különböző mérettartományhoz kapcsolódó granuláris viselkedést illusztrálják három ötvözetrendszerben. A kutatás célja az volt, hogy alapvető kísérleti összefüggéseket, trendeket állapítson meg a mágneses tulajdonságok és a különböző minta-előállítási paraméterek között egyszerű modellek felállításával, irodalmi modellek továbbfejlesztésével. Az eredmények gyakorlati alkalmazásokhoz is kapcsolódnak. A magnetokalorikus effektuson alapuló hűtőrendszereknek már léteznek prototípusai. A FINEMET-típusú, nanoszerkezetű lágymágneses anyagok nagy telítési mágnessétséggel és rendkívül kis kezdőpermeabilitással tűnnek ki. Ígéretesen alkalmazhatók pl. mágneses szenzorként és speciális transzformátorok magjaként. Az optimális összetételek megtalálásához ismerni kell a fenti paramétereket meghatározó fizikai folyamatokat, amihez a fenti kutatás is hozzájárult. A multirétegek tulajdonságainak megismerése a spintronikai alkalmazások szempontjából fontos.

## A TÉZISEK ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ SAJÁT KÖZLEMÉNYEK

- T1. V. Franco, C.F. Conde, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Enhanced magnetocaloric response in Cr/Mo containing Nanoperm-type amorphous alloys*  
Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 052509/1-3.  
IF (impaktfaktor) = 3,596; FH (független hivatkozások száma) = 66



- T2. V. Franco, C.F. Conde, J.S. Blázquez, A. Conde, P. Švec, D. Janičkovič and **L.F. Kiss**:  
*A constant magnetocaloric response in FeMoCuB amorphous alloys with different Fe/B ratios*  
 J. Appl. Phys. **101** (2007) 093903/1-5.  
 IF = 2,171; FH = 81
- T3. V. Franco, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Magnetocaloric response of FeCrB amorphous alloys: Predicting the magnetic entropy change from the Arrott-Noakes equation of state*  
 J. Appl. Phys. **104** (2008) 033903/1-5.  
 IF = 2,201; FH = 39
- T4. R. Caballero-Flores, V. Franco, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Influence of Mn on the magnetocaloric effect of nanoperm-type alloys*  
 J. Appl. Phys. **108** (2010) 073921/1-5.  
 IF = 2,064; FH = 23
- T5. **L.F. Kiss**, T. Kemény, V. Franco and A. Conde:  
*Enhancement of magnetocaloric effect in B-rich FeZrBCu amorphous alloys*  
 J. Alloys Comp. **622** (2015) 756-760.  
 IF = 3,426; FH = 18
- T6. **L.F. Kiss**, T. Kemény, I. Vincze and L. Gránásy:  
*Cluster spin-glass model for amorphous Fe-Zr alloys near the critical concentration: a magnetization study*  
 J. Magn. Magn. Mater. **135** (1994) 161-170.  
 IF = 1,063; FH = 31
- T7. **L.F. Kiss**, D. Kaptás and N. Hegman:  
*Absence of field cooling effect on the hysteresis loop in amorphous Fe<sub>93</sub>Zr<sub>7</sub>*  
 In: *Magnetic hysteresis in novel magnetic materials*, NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, Vol. 338, ed. G. C. Hadjipanayis (Kluwer Academic Publishers, London, 1997) pp. 755-759.  
 IF = -; FH = 1
- T8. **L.F. Kiss**, T. Kemény and I. Vincze:  
*Study of the magnetic viscosity of amorphous Fe-Zr alloys in the spin-glass state*  
 J. Phys.: Condens. Matter **9** (1997) 10501-10508.  
 IF = 1,48; FH = 4
- T9. **L.F. Kiss**, T. Kemény, J. Bednarčík, J. Gamcová and H.-P. Liermann:  
*Influence of the critical Fe atomic volume on the magnetism of Fe-rich metallic glasses evidenced by pressure-dependent measurements*  
 Phys. Rev. B **93** (2016) 214424/1-14.  
 IF = 3,933; FH = 7

- T10. V. Franco, C.F. Conde, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Superparamagnetic behaviour in an  $Fe_{76}Cu_1Nb_3Si_{10.5}B_{9.5}$  alloy*  
 J. Magn. Magn. Mater. **215-216** (2000) 400-403.  
 IF = 1; FH = 17
- T11. V. Franco, C.F. Conde, A. Conde, **L.F. Kiss**, D. Kaptás, T. Kemény, I. Vincze:  
*Dipole-dipole interaction in superparamagnetic nanocrystalline  $Fe_{63.5}Cr_{10}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$*   
 J. Appl. Phys. **90** (2001) 1558-1563.  
 IF = 2,13; FH = 14
- T12. V. Franco, C.F. Conde, A. Conde, **L.F. Kiss** and T. Kemény:  
*Transition to superparamagnetism in a Cr-containing FINEMET-type alloy*  
 IEEE Trans. Magn. **38** (2002) 3069-3074.  
 IF = 1,02; FH = 7
- T13. V. Franco, **L.F. Kiss**, T. Kemény, I. Vincze, C.F. Conde and A. Conde:  
*High-temperature evolution of coercivity in nanocrystalline alloys*  
 Phys. Rev. B **66** (2002) 224418/1-8.  
 IF = 3,33; FH = 6
- T14. V. Franco, C.F. Conde, A. Conde, **L.F. Kiss**:  
*Relationship between coercivity and magnetic moment of superparamagnetic particles with dipolar interaction*  
 Phys. Rev. B **72** (2005) 174424/1-10.  
 IF = 3,185; FH = 30
- T15. **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Bujdosó, D. Kaptás, T. Kemény, T. Pusztai, I. Vincze:  
*Cluster size from X-ray diffraction and magnetic measurements in FeAg multilayers and FeZrCuB nanocrystals*  
 Mater. Sci. Forum **360-362** (2001) 505-512., J. Metastable Nanocryst. Mater. **10** (2001) 505-512.  
 IF = 0,461; FH = 0
- T16. J. Balogh, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, T. Pusztai, E. Szilágyi, Á. Tunyogi, J. Swerts, S. Vandezande, K. Temst, C. Van Haesendonck:  
*Tailoring Fe/Ag superparamagnetic composites by multilayer deposition*  
 Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 102501/1-3.  
 IF = 4,127; FH = 2
- T17. **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Bujdosó, D. Kaptás:  
*Magnetic properties of Fe-Ag multilayers with varying layer thickness and bilayer number*  
 Phys. Rev. B **98** (2018) 144423/1-10.  
 IF = 3,77; FH = 1
- T18. **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Bujdosó and D. Kaptás:  
*Memory effect in Fe-Ag granular multilayers*  
 Mater. Res. Express **8** (2021) 106101/1-17.  
 IF = 1,62 (2020); FH = 0

## AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ EGYÉB PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG

### Magnetokalorikus effektus

1. L. Gránásy, A. Lovas, **L. Kiss**, T. Kemény and É. Kisdi-Koszó:  
*Investigation of magnetic properties and thermal stability of Fe-TM-B metallic glasses*  
J. Magn. Magn. Mater. **26** (1982) 109-111.
2. R. Caballero-Flores, V. Franco, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Influence of the demagnetizing field on the determination of the magnetocaloric effect from magnetization curve*  
J. Appl. Phys. **105** (2009) 07A919/1-3.
3. J.J. Ipus, J.S. Blázquez, V. Franco, A. Conde and **L.F. Kiss**:  
*Magnetocaloric response of Fe<sub>75</sub>Nb<sub>10</sub>B<sub>15</sub> powders partially amorphized by ball milling*  
J. Appl. Phys. **105** (2009) 123922/1-6.
4. R. Caballero-Flores, V. Franco, A. Conde, **L.F. Kiss**, L. Péter and I. Bakonyi:  
*Magnetic multilayers as a way to increase the magnetic field responsiveness of magnetocaloric materials*  
J. Nanosci. Nanotechnol. **12** (2012) 7432-7436.
5. **L.F. Kiss**, T. Kemény, J. Bednarčík, J. Kamarád, Z. Arnold, Z. Konôpková and H.-P. Liermann:  
*Pressure dependence of magnetic properties in Fe-Mn-B amorphous alloys: evidence for inhomogeneous ferromagnetism*  
J. Phys.: Condens. Matter **25** (2013) 346002/1-8.
6. J.S. Blázquez, L.M. Moreno-Ramírez, J.J. Ipus, **L.F. Kiss**, D. Kaptás, T. Kemény, V. Franco and A. Conde:  
*Effect of  $\alpha$ -Fe impurities on the field dependence of magnetocaloric response in LaFe<sub>11.5</sub>Si<sub>1.5</sub>*  
J. Alloys Comp. **646** (2015) 101-105.

### Fe-Zr amorf ötvözetek

7. D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Gránásy and I. Vincze:  
*Magnetic cluster relaxation in amorphous Fe-Zr alloys*  
Phys. Rev. B **46** (1992) 6600-6602.
8. D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss**, L. Gránásy, J. Balogh and I. Vincze:  
*Magnetic disorder in amorphous Fe-rich Fe-Zr alloys*  
J. Non.Cryst. Solids **156-158** (1993) 336-339.
9. I. Vincze, D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss** and J. Balogh:  
*Field induced magnetic moments in amorphous Fe-Zr spin-glass-like alloys*  
Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 496-499. Errata: Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 1735.

10. N. Hegman, **L.F. Kiss** and T. Kemény:  
*Broad peak of the non-linear susceptibility at the spin-glass temperature of amorphous Fe<sub>93</sub>Zr<sub>7</sub>*  
J. Phys.: Condens. Matter **6** (1994) L427-L430.
11. D. Kaptás, T. Kemény, J. Balogh, **L.F. Kiss**, L. Gránásy and I. Vincze:  
*Temperature dependence of the iron hyperfine field distribution in amorphous Fe-rich Fe-Zr alloys*  
Hyperfine Int. **94** (1994) 1861-1865.
12. **L.F. Kiss** and N. Hegman:  
*Frequency dependence of ac susceptibility of amorphous Fe<sub>93</sub>Zr<sub>7</sub> alloy*  
J. Magn. Magn. Mater. **140-144** (1995) 293-294.
13. I. Vincze, D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss** and J. Balogh:  
*Temperature and external magnetic field dependence of the spin freezing in amorphous Fe<sub>93</sub>Zr<sub>7</sub>*  
J. Magn. Magn. Mater. **140-144** (1995) 297-298.
14. D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss**, J. Balogh and I. Vincze:  
*Mesoscopic aspects of the spin glass behaviour*  
In: *Proc. First Polish-Korean Seminar on Structural and Physical Properties of Magnetic Materials*, CheongJu, Korea, 1995, pp.49-62.
15. **L.F. Kiss**, G. Huhn, T. Kemény, J. Balogh and D. Kaptás:  
*Magnetic properties of Fe-Zr metastable phases*  
J. Magn. Magn. Mater. **160** (1996) 229-232.
16. I. Vincze, T. Kemény, D. Kaptás, **L.F. Kiss** and J. Balogh:  
*Nanostructures, disordered ferromagnetism and spin glasses*  
Hyperfine Int. **113** (1998) 123-134.
17. D. Kaptás, **L.F. Kiss**, J. Balogh and I. Vincze:  
*Comment on „Field dependence of the transverse spin freezing transition”*  
Phys. Rev. B **65** (2002) 176401/1-2.
18. A.R. Wildes, N. Cowlam, S. Al-Heniti, **L.F. Kiss** and T. Kemény:  
*A polarised neutron scattering study of two samples of Fe<sub>90</sub>Zr<sub>10</sub>*  
Physica B **276-278** (2000) 712-713.
19. A.R. Wildes, N. Cowlam, S. Al-Heniti, **L.F. Kiss** and T. Kemény:  
*Non-collinear ferromagnetism in Fe-Zr metallic glasses*  
J. Magn. Magn. Mater. **226-230** (2001) 1470-1472.
20. A.R. Wildes, J.R. Stewart, N. Cowlam, S. Al-Heniti, **L.F. Kiss** and T. Kemény:  
*The magnetic structures of some Fe<sub>100-x</sub>Zr<sub>x</sub> metallic glasses*  
J. Phys.: Condens. Matter **15** (2003) 675-691.

## Amorf-nanokristályosított kompozitok

21. V. Franco, J.S. Blázquez, C.F. Conde, A. Conde, **L.F. Kiss**, T. Kemény and A.D. Hillier:  
*Frequency dependence of the superparamagnetic transition in a Finemet-type nanocrystalline alloy*  
Phys. Stat. Sol. (a) **201** (2004) 3314-3318.
22. **L.F. Kiss**, T. Kemény, L. Bujdosó, I. Bakonyi, S. Baskoutas, P. Pouloupoulos, V. Kapaklis and C. Politis:  
*Heterogeneous magnetism in Fe-doped bulk-amorphous and nanostructured Pd-based alloys*  
J. Phys.: Condens. Matter **20** (2008) 015211/1-8.
23. **L.F. Kiss**, V. Franco, M. Csontos, L. Péter, C.F. Conde, A. Conde, T. Kemény, J. Tóth, L.K. Varga and I. Bakonyi:  
*Analysis of the magnetoresistance contributions in a nanocrystallized Cr-doped FINEMET alloy*  
J. Magn. Magn. Mater. **323** (2011) 699-707.
24. D. Kaptás, **L.F. Kiss**, J. Balogh, J. Gubicza, T. Kemény and I. Vincze:  
*Superparamagnetic relaxation in nanocrystalline  $Fe_{80}Zr_7B_{12}Cu_1$  alloys*  
Hyperfine Int. **141-142** (2002) 175-179.
25. **L.F. Kiss**, T. Kemény, I. Vincze and V. Franco:  
*Low-temperature spin freezing in soft magnetic nanocrystalline alloys*  
J. Magn. Magn. Mater. **254-255** (2003) 483-485.
26. **L.F. Kiss**, D. Kaptás, J. Balogh, J. Gubicza, T. Kemény and I. Vincze:  
*Study of the unusual increase in the Curie temperature of the residual amorphous phase in nanocrystalline  $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$*   
J. Magn. Magn. Mater. **272-276** (2004) 1410-2.
27. T. Kemény, **L.F. Kiss**, D. Kaptás, J. Balogh, L. Bujdosó, J. Gubicza and I. Vincze:  
*Superparamagnetic behaviour of  $Fe_{80}B_{12}Zr_7Cu$  alloys with different fractions of primary nanocrystalline phase*  
Mater. Sci. Eng. A **375-377** (2004) 219-222.
28. J. Balogh, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, T. Kemény, K. Temst, C. Van Haesendonck and I. Vincze:  
*Mössbauer effect study of Fe grains in nanocomposites*  
In: *Properties and Applications of Nanocrystalline Alloys from Amorphous Precursors*, NATO Science Series II., Vol. **18**; Eds.: B. Idzikowski, P. Švec and M. Miglierini (Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2005) pp. 385-94.

## Fe-Ag granuláris multirétegek és granuláris ötvözetek

29. J. Balogh, A. Gábor, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, M. Csontos, A. Halbritter, I. Kézsmárki, G. Mihály:  
*Giant Magnetoresistance of a Single Interface*  
In: *Kondo Effect and Dephasing in Low-Dimensional Metallic Systems*; Eds.: V. Chandrasekhar et al. (Conf. Proc.) (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2001) pp. 181-184.
30. J. Balogh, I. Vincze, D. Kaptás, T. Kemény, T. Pusztai, **L.F. Kiss**, E. Szilágyi, Z. Zolnai, I. Kézsmárki, A. Halbritter, G. Mihály:  
*Interface Magnetoresistance of Fe/Ag Multilayers*  
Phys. Stat. Sol. (a) **189** (2002) 621-624.
31. J. Balogh, D. Kaptás, T. Kemény, **L.F. Kiss**, T. Pusztai and I. Vincze:  
*Atomic and magnetic structure of the interface in multilayers*  
Hyperfine Int. **141-142** (2002) 13-20.
32. J. Balogh, **L.F. Kiss**, A. Halbritter, I. Kézsmárki, G. Mihály:  
*Magnetoresistance of Ag/Fe/Ag and Cr/Fe/Cr trilayers*  
Solid State Commun. **122** (2002) 59-63.
33. J. Balogh, M. Csontos, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, T. Pusztai, J. Swerts, S. Vandezande, K. Temst, C. Van Haesendonck and G. Mihály:  
*Magnetic properties of superparamagnet/ferromagnet heterostructures*  
Phys. Stat. Sol. (c) **1** (2004) 3235-3238.
34. J. Balogh, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, T. Kemény, I. Vincze, K. Temst and C. Van Haesendonck:  
*Fe-Ag granular multilayers and heterostructures studied in applied magnetic field*  
Hyperfine Int. **165** (2005) 49-53.
35. M. Csontos, J. Balogh, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, A. Kovács and G. Mihály:  
*Magnetic and transport properties of Fe-Ag granular multilayers*  
Phys. Rev. B **73** (2006) 184412/1-9.
36. J. Balogh, Cs. Fetzter, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, I.S. Szűcs, I. Dézsi and I. Vincze:  
*Perpendicular anisotropy in Fe/Ag multilayers*  
Phys. Status Solidi (a) **205** (2008) 1828-1830.
37. **L.F. Kiss**, D. Kaptás, J. Balogh, F. Tanczikó, M. Major and I. Vincze:  
*Magnetic properties of Fe-Ag granular alloys*  
J. Alloys Comp. **483** (2009) 620-622.
38. **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Bujdosó, D. Kaptás, F. Tanczikó, I. Vincze:  
*Temperature dependence of the high-field magnetization in Fe-Ag granular alloys and discontinuous multilayers*  
J. Phys.: Conf. Series **200** (2010) 072050/1-4.

39. J. Balogh, L. Bujdosó, D. Kaptás, **L.F. Kiss**, T. Kemény and I. Vincze:  
*Interfaces in sequence permutated multilayers*  
J. Phys.: Conf. Series **217** (2010) 012089/1-6.
40. **L.F. Kiss**, J. Balogh, L. Bujdosó, D. Kaptás, T. Kemény, A. Kovács and I. Vincze:  
*Amorphous Fe-B alloys in B-Fe-Ag multilayers studied by magnetization and Mössbauer measurements*  
J. Alloys Comp. **509S** (2011) S188-S192.

**Kiss László Ferenc** publikációs tevékenységének szcientometriai adatai az MTMT alapján (2023. április 27-ig):

Téziscikkek összesített impaktfaktora: 40.577 (IF/folyóiratcikk: 2,39)  
Téziscikkekre kapott független hivatkozások száma: 346 (FH/publikáció: 19,2)

Összes nemzetközi folyóiratcikk: 188 (összesített impaktfaktor: kb. 300)  
Összes független hivatkozás száma: 1802 (FH/publikáció: 9,6)  
Hirsch-index (az összes független + függő hivatkozásból számolva): 28