

Oznaka poročila: ARRS-RPROG-ZP-2015/133



## ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH RAZISKOVALNEGA PROGRAMA

(za obdobje 1. 1. 2009 - 31. 12. 2014)

### A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROGRAMU

#### 1. Osnovni podatki o raziskovalnem programu

<b>Šifra programa</b>	P2-0089
<b>Naslov programa</b>	Sodobni anorganski magnetni in polprevodni materiali (Advanced inorganic magnetic and semiconducting materials )
<b>Vodja programa</b>	10372 Darko Makovec
<b>Obseg raziskovalnih ur (vključno s povečanjem financiranja v letu 2014)</b>	35538
<b>Cenovni razred</b>	C
<b>Trajanje programa</b>	01.2009 - 12.2014
<b>Izvajalci raziskovalnega programa (javne raziskovalne organizacije - JRO in/ali RO s koncesijo)</b>	106 Institut "Jožef Stefan"
<b>Raziskovalno področje po šifrantu ARRS</b>	2 TEHNIKA 2.04 Materiali
<b>Družbeno-ekonomski cilj</b>	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija
<b>Raziskovalno področje po šifrantu FOS</b>	2 Tehniške in tehnološke vede 2.05 Materiali

### B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROGRAMA

#### 2. Povzetek raziskovalnega programa<sup>1</sup>

SLO

Raziskovalno delo znotraj programa P2-0089 je bilo nadaljevanje raziskav iz prejšnjega programskega obdobja in predstavlja za Slovenijo prodor na področje nanotehnologije. Razvijali smo materiale na osnovi magnetnih

nanodelcev, predvsem za uporabo v biomedicini, magnetne feritne materiale za visokofrekvenčno uporabo ter polprevodne feroelektrične keramike.

Pri sintezi nanodelcev smo se osredotočili na zahtevnejše magnetne materiale, kot so Co ferit in Ba/Sr heksaferit,  $\text{LaSrMnO}_3$  in zlitine Ni-Cu, Ni-Cr. Študirali smo lastnosti nanodelcev, predvsem vpliv končne dimenzije na njihove strukturne in magnetne lastnosti. S sintezo, funkcionalizacijo in karakterizacijo nanodelcev smo se vključevali tudi v raziskave nanotoksikologije.

Največja pozornost raziskav je bila usmerjena v obvladovanje površinskih lastnosti nanodelcev z vezavo različnih molekul na njihovo površino v procesu t.i. funkcionalizacije. Superparamagnetne maghemitne nanodelce smo funkcionalizirali predvsem z vezavo različnih organosilanskih molekul neposredno ali preko tanke vmesne silikatne plasti. Raziskovali smo konjugacije različnih molekul na nanodelce ter vpliv površinskih lastnosti nanodelcev in vezave tarčnih ligandov (monoklonska protitelesa, epidermalni rastni dejavnik) na njihovo privzem v različne vrste celic in vitro.

Obvladovanje površinskih lastnosti nanodelcev je ključno tudi za njihovo nadaljnje spajanje v kompleksne nanomateriale. S spajanjem superparamagnetnih nanodelcev v suspenzijah lahko pripravimo nanoskupke kontrolirane velikosti. Nanoskupki so optimalni za uporabo, ki temelji na izrabi magnetne sile v magnetnem polju, na primer v magnetni separaciji. S spajanjem magnetnih nanodelcev z nanodelci drugih materialov smo pripravili različne kompozitne (nano)delce, na primer, superparamagnetne fotokatalizatorje za čiščenje vode. Razvili smo tudi novo metodo za nanos plasti magnetnih spinelnih feritov na površino jedrnih nanodelcev iz različnih materialov v vodnih suspenzijah. S prevlečenjem nanodelcev trdo magnetnega heksaferita s plastjo mehko magnetnega maghemita smo tako pripravili kompozitne nanodelce, ki so imeli za več kot dvakrat povečan energijski produkt v primerjavi z eno od obeh vrst nanodelcev. Obvladovanje površinskih lastnosti nanodelcev nam je omogočilo tudi njihovo disperzijo v monomerih, kot sta stiren ali metil metakrilat. Naknadna polimerizacija je omogočila sintezo nanokompozitov z visoko vsebnostjo nanodelcev v polimerni matrici.

Na področju mikrovalovnih magnetnih materialov so bile raziskave usmerjene v pripravo magnetno orientiranih debelih plasti za neregulirane mikrovalovne naprave. Razvili smo postopek priprave magnetno usmerjenih plasti z nanosom nanoploščic Ba heksaferita iz suspenzij v električnem polju in/ali magnetnem polju. Z magnetno usmerjenim nanašanjem nanodelcev Co ferita iz suspenzij smo pripravili anizotropne stolpičaste 3D strukture in jih uporabili za nadaljnjo sintezo magnetoelektričnih kompozitov.

ANG

The research in the framework of the program P2-0089 is a continuation of the previous program. It represents a breakthrough in the field of nanotechnology in Slovenia. We studied materials based on magnetic nanoparticles, especially for their biomedical applications, magnetic ferrites for high-frequency applications, and semiconducting ceramics.

The synthesis of nanoparticles (NPs) was focused on complex magnetic materials, such as Co ferrite, Ba or Sr hexaferrite,  $\text{LaSrMnO}_3$ , or Ni-Cu and Ni-Cr alloys. The properties of NPs, especially the influence of a finite size on their structural and magnetic properties, were also studied. We also participated in nanotoxicology research, as experts for the synthesis, functionalization and characterization of nanoparticles.

The main research efforts were directed to the control of the NPs' surface properties by bonding different molecules onto their surfaces, i.e., functionalization. Superparamagnetic maghemite NPs were functionalized, mainly using different bonding organosilane molecules directly to the surfaces or after they were coated with a thin silica layer. The influence of the NPs' surface properties, e.g., the ability to control the NPs' surface properties is also crucial for their assembly into complex nanomaterials. By the fusion of several superparamagnetic NPs in their suspensions, nanoclusters of a certain size can be prepared. The nanoclusters are optimal for applications that require a large magnetic force acting on them in a magnetic field, e.g., in magnetic separation. By combining the magnetic NPs with the NPs of other functional materials, different composite (nano) particles were synthesized, for example, superparamagnetic photocatalysts for water remediation. A new method was also developed for coating a spinel-ferrite magnetic shell onto different core NPs. By coating soft magnetic maghemite shells onto hard-magnetic hexaferrite cores, the

composite NPs were synthesized and displayed a more than doubled energy product. The control of the NPs' surface properties also enabled the preparation of stable suspensions of nanoparticles in monomers, such as styrene and methyl methacrylate. The subsequent polymerization resulted in the synthesis of nanocomposites containing high concentrations of nanoparticles dispersed in a polymer matrix.

In the field of microwave magnetic materials the research was focused on the preparation of magnetically oriented thick films for non-reciprocal microwave devices. We have developed methods for the fabrication of magnetically aligned films based on the deposition of Ba-hexaferrite nanoplatelets from their suspensions in an electric and/or a magnetic field. Anisotropic, columnar 3D structures were prepared using the magnetically assisted deposition of Co-ferrite NPs from the suspension, which were used for further synthesis of magneto-electric composites.

### **3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem programu, (vključno s predloženim dopolnjenim programom dela v primeru povečanja financiranja raziskovalnega programa v letu 2014)<sup>2</sup>**

SLO

Raziskovalno delo znotraj programa P2-0089 je bilo nadaljevanje raziskav iz prejšnjega programskega obdobja in predstavlja za Slovenijo prodor na področje nanotehnologije. Razvijali smo materiale na osnovi magnetnih nanodelcev, predvsem za uporabo v biomedicini, magnetne feritne materiale za visokofrekvenčno uporabo ter polprevodne feroelektrične keramike.

Pri sintezi nanodelcev smo se osredotočili na zahtevnejše magnetne materiale, kot so Co ferit in Ba ali Sr heksaferit. Na področju sinteze nanodelcev heksaferitov smo vodilna skupina v svetu. Heksaferitni nanodelci so zanimivi zaradi anizotropne, ploščate oblike, ki mogoča sintezo novih kompleksnih materialov. Tako smo sodelovali pri razvoju feromagnetnih tekočin s spontano magnetno urejenostjo, ki so bile prvič sintetizirane z dispergiranjem heksaferitnih nanoploščic v tekočem kristalu (objava v reviji Nature s sodelavci Odseka za fiziko kompleksnih snovi Inštituta »Jožef Stefan«). Ukvarjali smo se tudi s sintezo nanodelcev magnetnih materialov s prilagodljivo Curie-vo temperaturo za uporabo v zdravljenju raka z magnetno hipertermijo, kot so magnetni perovskit LaSrMnO<sub>3</sub> ali zlitine Ni-Cu in Ni-Cr (sodelovanje z Univerzo v Mariboru). Študirali smo tudi lastnosti nanodelcev, predvsem vpliv končne dimenzije na njihove strukturne in magnetne lastnosti. S sintezo, funkcionalizacijo in karakterizacijo nanodelcev smo se vključevali tudi v raziskave nanotoksikologije v sodelovanju z Biotehniško fakulteto Univerze v Ljubljani.

Največja pozornost raziskav je bila usmerjena v obvladovanje površinskih lastnosti nanodelcev z vezavo različnih molekul na njihovo površino v procesu t.i. funkcionalizacije. Pri tem uvedemo na površino nanodelcev specifične funkcionalne skupine, ki omogočijo nadaljnjo (bio)konjugacijo (bio)molekul, potrebnih za različne uporabe, predvsem v medicini. Superparamagnetne nanodelce magnetnega železovega oksida maghemita smo funkcionalizirali predvsem z vezavo različnih organosilanskih molekul neposredno ali preko tanke vmesne silikatne plasti. Raziskovali smo konjugacije različnih molekul na nanodelce, kot so fluorescentne molekule, zdravilne učinkovine, molekule plazmidne DNK in tarčni ligandi. Tarčni proteini, kot so monoklonska protitelesa in epidermalni rasni dejavnik prepoznajo specifične receptorje, ki so v večjem obsegu izraženi na rakavih celicah in tako omogočajo ciljno dostavo nanodelcev. V sodelovanju s raziskovalci s Fakultete za farmacijo Univerze v Ljubljani smo raziskovali vpliv površinskih lastnosti nanodelce in vezave tarčnih ligandov na njihovo internalizacijo v različne vrste celic in vitro.

Obvladovanje površinske lastnosti nanodelcev je ključno tudi za njihovo nadaljnje spajanje v kompleksne nanomateriale. S spajanjem superparamagnetnih nanodelcev v suspenzijah lahko pripravimo nanoskupke kontrolirane velikosti, ki so zaradi velikega magnetnega momenta primerni v uporabah, ki temeljijo na izrabi magnetne sile v gradientu magnetnega polja. Taka uporaba je v magnetni separaciji, na primer za izločanje težkih kovin iz vode. Nanoskupke smo sintetizirali s heteroaglomeracijo (samourejanjem)

nanodelcev v vodnih suspenzijah, ali v emulzijah nepolarne suspenzije nanodelcev v vodi. S spajanjem magnetnih nanodelcev z nanodelci drugih materialov smo pripravili različne kompozitne (nano)delce, na primer, superparamagnetne fotokatalizatorje s spajanjem z nanodelci in prevlekami iz anatasnega  $\text{TiO}_2$ . Patentiran material in postopek njegove sinteze bo omogočil razvoja nove tehnologije čiščenja vode. Razvili smo tudi novo metodo za nanos plasti magnetnih spinelnih feritov na površino jedrnih nanodelcev iz različnih materialov v vodnih suspenzijah. S prevlečenjem nanodelcev trdo magnetnega heksaferita s plastjo mehko magnetnega maghemita smo tako pripravili kompozitne nanodelce, ki so imeli za več kot 2-krat povečan energijski produkt.

Obvladovanje površinskih lastnosti nanodelcev nam je omogočilo tudi njihovo dispergiranje v monomerih, kot sta stiren ali metil metakrilat. Naknadna polimerizacija je omogočila sintezo nanokompozitov, ki vsebujejo visoke vsebnosti (magnetnih) nanodelcev v polimerni matrici. V sodelovanju s EPFL, Švica, smo razvili postopek hidrotermalne sinteze nanodelcev maghemita in priprave polimernih nanokompozitov, ki so primerni za stabilizacijo poškodovanih vretenc hrbtnice ob rakavem obolenju in omogočajo dodatno zdravljenje s pomočjo magnetne hipertermije.

Na področju mikrovalovnih magnetnih materialov so bile raziskave usmerjene v pripravo magnetno orientiranih debelih plasti za nerezipročne mikrovalovne naprave brez dodatnega zunanega magneta. Razvili smo pripravo plasti z nanosom nanoploščic Ba heksaferita iz suspenzij v električnem polju in/ali magnetnem polju. Osnova razvitih metod je obvladovanje interakcij med nanodelci, ki omogoča pripravo stabilnih suspenzij, kljub ferimagnetni naravi delcev, in posledično pripravo plasti z magnetno usmerjenostjo več kot 90%.

Z magnetno usmerjenim nanašanjem nanodelcev iz suspenzij smo pripravili tudi anizotropne stolpičaste 3D strukture iz nanodelcev Co ferita in jih uporabili za sintezo magneto-elektrikov s strukturo tipa 1-3. Na stolpičaste strukture iz ferita smo elektroforetsko nanесли feroelektrične delce  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ . S sočasnim sintranjem obeh komponent smo pripravili magneto-električno keramiko, katere magnetne lastnosti lahko spreminjamo z električnim poljem.

Na področju polprevodnih keramik s pozitivnim temperaturnim koeficientom upornosti (PTKU) smo raziskovali procese redukcije in reoksidacije, ki so povezani z nastankom temperaturno odvisnih potencialnih zapor na mejah med zrni v feroelektričnih keramikah. Na osnovi sistema  $\text{BaTiO}_3 - \text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$  nam je uspelo pripraviti PTK-upore za uporabo pri visokih temperaturah, ki ne vsebujejo strupenega svinca.

Dodatno financiranje ob povečanju programa v letu 2014 smo namenili za začetek raziskav na področju magnetnih katalizatorjev. Razvili smo novo sintezno metodo za nanos nanodelcev katalizatorja rutenija na superparamagnetne nanoskupke. Kovinski rutenij smo nanесли na površino nanoskupkov s heterogeno nukleacijo rutenija na površini nanoskupkov med redukcijo rutenijevega acetil acetonata v suspenziji v 2-propanolu. Katalizator testiramo v sodelovanju z raziskovalci s Kemijskega inštituta za uporabo pri reakciji »transfer« hidrogeniranja levulinske kisline v 2-propanolu in hidrogeniranju levulinske kisline z molekularnim vodikom.

#### 4. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem programu in zastavljenih raziskovalnih ciljev<sup>3</sup>

SLO

Realizirali smo vse cilje, ki jih je predvidel program. Naše znanje o keramičnih magnetnih materialih smo nadgradili z obširnimi znanjem o sintezi nanodelcev, obvladovanju njihovih površinskih lastnosti, njihovem nanosu v plasti in spajanju v nove nanokompozitne materiale. Medtem ko smo v predhodnem obdobju že osvojili sintezo nanodelcev preprostih magnetnih materialov, so bili v sedanjem obdobju v ospredju materiali, ki zahtevajo za nastanek višje temperature in jih je zato težko sintetizirati v obliki nanodelcev. Zelo uspešni smo bili pri sintezi heksaferitov ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  in  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) in tudi pri materialih s prilagodljivo Curievo temperaturo za uporabo v magnetni hipertermiji ( $\text{LaSrMnO}_3$ , zlitine Cu-Ni, Cr-Ni). Obvladovanje metod za uravnavanje površinskih lastnosti nanodelcev nam omogoča, na eni strani pripravo stabilnih

suspenzij (magnetnih tekočin) ter njihovo direktno uporabo v biomedicini in v specifičnih področjih tehnike, kot so biotehnologija ali okoljske tehnologije, in na drugi strani sintezo novih materialov z nanosom v plasti ali z njihovim spajanjem v nanokompozite. Magnetne nanodelce smo spajali med seboj v nanoskupke za uporabo v magnetni separaciji ali z nanodelci in plastmi drugih uporabnih materialov, kot so, na primer, fotokatalitski nanodelci za sintezo magnetnih fotokatalizatorjev. Razvili smo tudi metodo za nanos magnetnih feritnih plasti na različne jedrne nanodelce, ki je osnova za sintezo različnih novih kompozitnih nanodelcev tipa jedro-lupina. Znanje o sami sintezi in funkcionalizaciji magnetnih nanodelcev smo začeli sistematično nadgrajevati s specifičnimi znanji, potrebnimi za njihovo uporabo. Na področju uporabe nanodelcev v medicini smo se posvetili predvsem magnetni hipertermiji. Prav tako smo razvili znanja potrebna za uporabo naših materialov v magnetni separaciji, na primer pri izločanju težkih kovin iz onesnažene vode, ali v biotehnologiji, pri izločanju izrabljene biomase iz penečih vin. Razvili smo nove metode priprave magnetno-usmerjenih in anizotropnih nanostrukturiranih plasti z nanosom nanodelcev iz suspenzij s pomočjo magnetnega in/ali električnega polja. S tem znanjem smo se vključevali v številne mednarodne aplikativne projekte. Priprava plasti je omogočila sintezo novih magneto-električnih in magneto-optičnih materialov. Program se je uveljavil kot podpora v znanju s področja nanodelcev za druge komplementarne raziskovalne skupine, predvsem s področja nanotoksikologije in fotonike, kjer se vključujemo v raziskave kot strokovnjaki za sintezo, karakterizacijo in obnašanje nanodelcev. Svoje znanje o nanodelcih smo razširjali tudi v slovensko industrijo (Lek, Cinkarna Celje, Optacore). Na področju obvladovanja nanodelcev smo postali vodilna skupina v Sloveniji in širše.

#### 5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega programa oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave programske skupine v letu 2014<sup>4</sup>

SLO

Program programa se ni spreminjal.

#### 6. Najpomembnejši znanstveni rezultati programske skupine<sup>5</sup>

Znanstveni dosežek														
1.	<table border="1"> <tr> <td>COBISS ID</td> <td>27304231</td> <td>Vir: COBISS.SI</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Naslov</td> <td>SLO</td> <td>Feromagnetizem v suspenzijah magnetnih ploščic v tekočem kristalu</td> </tr> <tr> <td>ANG</td> <td>Ferromagnetism in suspensions of magnetic platelets in liquid crystal</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Opis</td> <td>SLO</td> <td>Obstoj feromagnetnih tekočih kristalov sta napovedala že Brochard in de Gennes pred več kot 40-imi leti, vendar je šele to delo prvi eksperimentalni dokaz njune teorije. Osnova feromagnetnega tekočega kristala so feromagnetne nanoploščice BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, katerih sintezo smo razvili v okviru programa P2-0089. Pomembna je ploščata oblika nanodelcev, ki jo pogojuje kristalna struktura BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, ter primerna velikost in magnetne lastnosti. To smo dosegli z obširno študijo hidrotermalne sinteze BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> v kombinaciji z delno kemijsko substitucijo Fe<sup>3+</sup> s Sc<sup>3+</sup>. Specifična kontrola površinskih lastnosti nanodelcev pa je omogočila njihovo homogeno vgradnjo v tekoči kristal. V kristalu se sklopita električni direktor kristala in magnetni moment nanodelca, zaradi česar lahko optične lastnosti feromagnetnega tekočega kristala kontroliramo z električnim ali z magnetnim poljem.</td> </tr> <tr> <td>ANG</td> <td>Ferromagnetic liquid crystals were predicted more than 40 years ago by Brochard in de Gennes. This work is the first experimental proof of their theory. Ferrimagnetic BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nanoplates are the basis of the ferromagnetic liquid crystal. Their synthesis was developed within the research program P2-0089. The crucial property of the incorporated magnetic nanoparticles is their plate-like shape that originates from their crystal structure, in addition to their size and magnetic properties. The synthesis of the applicable nanoparticles was developed under hydrothermal conditions in a combination with partial chemical substitution of Fe<sup>3+</sup> with Sc<sup>3+</sup>. The final incorporation of the nanoparticles into a liquid</td> </tr> </table>	COBISS ID	27304231	Vir: COBISS.SI	Naslov	SLO	Feromagnetizem v suspenzijah magnetnih ploščic v tekočem kristalu	ANG	Ferromagnetism in suspensions of magnetic platelets in liquid crystal	Opis	SLO	Obstoj feromagnetnih tekočih kristalov sta napovedala že Brochard in de Gennes pred več kot 40-imi leti, vendar je šele to delo prvi eksperimentalni dokaz njune teorije. Osnova feromagnetnega tekočega kristala so feromagnetne nanoploščice BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , katerih sintezo smo razvili v okviru programa P2-0089. Pomembna je ploščata oblika nanodelcev, ki jo pogojuje kristalna struktura BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , ter primerna velikost in magnetne lastnosti. To smo dosegli z obširno študijo hidrotermalne sinteze BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> v kombinaciji z delno kemijsko substitucijo Fe <sup>3+</sup> s Sc <sup>3+</sup> . Specifična kontrola površinskih lastnosti nanodelcev pa je omogočila njihovo homogeno vgradnjo v tekoči kristal. V kristalu se sklopita električni direktor kristala in magnetni moment nanodelca, zaradi česar lahko optične lastnosti feromagnetnega tekočega kristala kontroliramo z električnim ali z magnetnim poljem.	ANG	Ferromagnetic liquid crystals were predicted more than 40 years ago by Brochard in de Gennes. This work is the first experimental proof of their theory. Ferrimagnetic BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> nanoplates are the basis of the ferromagnetic liquid crystal. Their synthesis was developed within the research program P2-0089. The crucial property of the incorporated magnetic nanoparticles is their plate-like shape that originates from their crystal structure, in addition to their size and magnetic properties. The synthesis of the applicable nanoparticles was developed under hydrothermal conditions in a combination with partial chemical substitution of Fe <sup>3+</sup> with Sc <sup>3+</sup> . The final incorporation of the nanoparticles into a liquid
COBISS ID	27304231	Vir: COBISS.SI												
Naslov	SLO	Feromagnetizem v suspenzijah magnetnih ploščic v tekočem kristalu												
	ANG	Ferromagnetism in suspensions of magnetic platelets in liquid crystal												
Opis	SLO	Obstoj feromagnetnih tekočih kristalov sta napovedala že Brochard in de Gennes pred več kot 40-imi leti, vendar je šele to delo prvi eksperimentalni dokaz njune teorije. Osnova feromagnetnega tekočega kristala so feromagnetne nanoploščice BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , katerih sintezo smo razvili v okviru programa P2-0089. Pomembna je ploščata oblika nanodelcev, ki jo pogojuje kristalna struktura BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , ter primerna velikost in magnetne lastnosti. To smo dosegli z obširno študijo hidrotermalne sinteze BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> v kombinaciji z delno kemijsko substitucijo Fe <sup>3+</sup> s Sc <sup>3+</sup> . Specifična kontrola površinskih lastnosti nanodelcev pa je omogočila njihovo homogeno vgradnjo v tekoči kristal. V kristalu se sklopita električni direktor kristala in magnetni moment nanodelca, zaradi česar lahko optične lastnosti feromagnetnega tekočega kristala kontroliramo z električnim ali z magnetnim poljem.												
	ANG	Ferromagnetic liquid crystals were predicted more than 40 years ago by Brochard in de Gennes. This work is the first experimental proof of their theory. Ferrimagnetic BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> nanoplates are the basis of the ferromagnetic liquid crystal. Their synthesis was developed within the research program P2-0089. The crucial property of the incorporated magnetic nanoparticles is their plate-like shape that originates from their crystal structure, in addition to their size and magnetic properties. The synthesis of the applicable nanoparticles was developed under hydrothermal conditions in a combination with partial chemical substitution of Fe <sup>3+</sup> with Sc <sup>3+</sup> . The final incorporation of the nanoparticles into a liquid												

		crystal was made possible by the specific control of their surface properties. Due to the coupling between the liquid-crystal director and the magnetic moments of the nanoplates the optical properties of ferromagnetic liquid crystals can be tuned with electric or magnetic field.
	Objavljeno v	Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers; Nature; 2013; Vol. 504, no. 7479; str. 237-241; Impact Factor: 42.351; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.663; A': 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Mertelj Alenka, Lisjak Darja, Drofenik Mihael, Čopič Martin
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	26704935 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Aktivno ciljanje tarčnih celic s povečano izraženostjo receptorjev za EGF z nanodelci označenimi z EGF <i>ANG</i> Specific targeting EGFR-overexpressed cells with EGF-labeled nanoparticles.
	Opis	<i>SLO</i> Humani receptor za epidermalni rastni dejavnik predstavlja zelo preučevano tarčo v študijah terapije raka. V naši raziskavi smo fluorescentne magnetne nanodelce funkcionalizirane s prostimi amino ali karboksi funkcionalnimi skupinam konjugirali z epidermalnim rastnim dejavnikom s pomočjo različnih kemijskih pristopov. Učinkovitost vezave rastnega dejavnika na površino nanodelcev smo spremljali s pretočno citometrijo pri čemer smo uporabili specifična protitelesa tega rastnega dejavnika. Sposobnost ciljanja receptorjev rastnega dejavnika na površini tarčnih celic A431 s konjugati nanodelec-rastni dejavnik smo preverjali s primerjavo obsega privzema konjugatov v ne tarčne celice HeLa, ki imajo bistveno slabše izražene receptorje rastnega dejavnika. Rezultati so pokazali najučinkovitejšo specifično ciljanje tarčnih celic v primeru, kjer je bila za vezavo rastnega dejavnika na površino nanodelca uporabljena kemija aktivacije s karbodiimidom. <i>ANG</i> Human epidermal growth factor receptor (EGFR) has emerged as an attractive target for cancer therapy. In this study, fluorescent, labeled magnetic, amino- or carboxyl-functionalized silica-coated maghemite nanoparticles were conjugated with epidermal growth factor (EGF) using different binding modes. The binding efficiency of EGF to the nanoparticles was measured by flow cytometry using specific anti-EGF antibody. The ability of EGF bioconjugates to target the EGFR receptors was tested using EGFR over-expressing A431 cells in comparison to EGFR negative HeLa cells. Our results showed that bioconjugates where EGF was bonded by carbodiimide chemistry are the most effective for specific targeting of EGFR-expressing cells in vitro.
	Objavljeno v	Kluwer Academic Publishers; Journal of nanoparticle research; 2013; Vol. 15, no. 5; str.1666-1-1666-11; Impact Factor: 2.278; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.554; A': 1; WoS: DY, NS, PM; Avtorji / Authors: Kralj Slavko, Rojnik Matija, Kos Janko, Makovec Darko
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	28332071 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Kompozitne nanoploščice sestavljene iz mehko magnetnega železovega oksida in trdo magnetnega barijevega heksaferita <i>ANG</i> Composite nanoplatelets combining soft-magnetic iron oxide with hard-magnetic barium hexaferrite
		V delu smo prvič predstavili nanodelce, ki so sestavljeni iz ploščatega jedra iz trdo magnetnega Ba heksaferita (BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> ) med dvema plastema mehko magnetnega železovega oksida maghemita (γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). Nanodelce smo sintetizirali z uporabo nove, preproste in cenene metode, ki temelji na

	Opis	SLO	soobarjanju Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> ionov v koloidno stabilni suspenziji heksaferitnih jedrnih nanodelcev. Heksaferit izkazuje najvišjo magneto-kristalno anizotropijo od vseh oksidov, vendar pa ima relativno nizko nasičeno magnetizacijo. S tem ko smo heksaferitna jedra povezali z mehko magnetno prevleko znotraj posameznega nanodelca, smo močno izboljšali njegovo nasičeno magnetizacijo. Topotaktične rasti maghemitne prevleke na heksaferitnem jedru omogoča direktno magnetno sklopitev med obema fazama, ki privede do ogromnega povečanju v energijskem produktu BH <sub>max</sub> , količini, ki je merilo kvalitete magnetov, za več kot 2-krat.
		ANG	Bi-magnetic, platelet nanoparticles combining a hard-magnetic Ba-hexaferrite (BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> ) platelet core in between two soft-magnetic iron oxide maghemite (γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) layers were presented for the first time. The nanoparticles were synthesized using a new, simple and inexpensive method based on the co-precipitation of Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> ions in a colloidal aqueous suspension of the hexaferrite core nanoparticles. The hexaferrite displays the highest magnetocrystalline anisotropy from all magnetic oxides, however, modest saturation magnetization. By combining the hexaferrite core with the soft magnetic shell in single nano-unit, the saturation magnetization can be strongly increased. Moreover, the topotactic growth of the maghemite shell on the hexaferrite core supported the direct magnetic coupling between the core and the shell, resulting in a large increase of the remanence and, as a result, of the energy product BH <sub>max</sub> , a figure of merit for the quality of permanent magnets (for more than twice compared to the core alone).
	Objavljeno v	RSC Publishing; Nanoscale; 2015; Vol. 7, no. 6; str. 2688-2697; Impact Factor: 6.739; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.554; A <sup>''</sup> : 1; A <sup>'</sup> : 1; WoS: DY, NS, PM, UB; Avtorji / Authors: Primc Darinka, Makovec Darko	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	22768167	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Uravnavanje velikosti nanodelcev barijevega heksaferita med hidrotermalno sintezo z dodatkom surfaktanta oleinske kisline in priprava magnetnih tekočin
		ANG	Control of the particle size during the hydrothermal synthesis of barium hexaferrite using the addition of oleic acid, and the preparation of ferrofluids
	Opis	SLO	Eden pomembnih problemov pri hidrotermalni sintezi nanodelcev je pojav sekundarne rekristalizacije. Ta povzroči, da posamezni nanodelci po nastanku hitro zrastejo na račun ostalih. Proces onemogoča kontrolo velikosti nanodelcev. V članku smo objavili postopek, kjer z dodatkom oleinske kisline popolnoma preprečimo sekundarno rekristalizacijo. Nanodelci hidrotermalno sintetizirani v prisotnosti oleinske kisline so hidrofobni in jih lahko dispergiramo v nepolarnih tekočinah in tako pripravimo magnetne tekočine. Metoda je omogočila pripravo prvih magnetnih tekočin na osnovi Ba heksaferita.
		ANG	Secondary re-crystallization is one of the most important processes in hydrothermal synthesis. In this process individual nanoparticles rapidly grow at the expense of the other particles. The process makes the control of the particle size very difficult. In the article, the new procedure was published. The procedure is based on the complete blocking of the secondary re-crystallization using the addition of oleic acid. The synthesized nanoparticles were hydrophobic and can be dispersed in nonpolar carrier liquids to prepare hexaferrite-based ferrofluids for the first time.
	Objavljeno v	IOP Publishing; Nanotechnology; 2009; Vol. 20, no. 31; str. 315605-1-315605-9; Impact Factor: 3.137; Srednja vrednost revije / Medium	

		Category Impact Factor: 0.918; A'': 1;A': 1; WoS: IF, NS, PM, UB; Avtorji / Authors: Primc Darinka, Makovec Darko, Lisjak Darja, Drofenik Mihael	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	26308391	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Kemijska substitucija – alternativna strategija za kontrolo velikosti delcev barijevega ferita
		ANG	Chemical substitution - an alternative strategy for controlling the particle size of barium ferrite
	Opis	SLO	Pri sintezi nanodelcev njihovo velikost običajno uravnavamo s sintezni pogoji in/ali z dodatkom površinsko aktivnih snovi. Pri tem se pogosto srečamo s problemom sinteze nanodelcev ravno primerne velikosti: nano dimenzij, ki pa že izkazujejo uporabne fizikalne lastnosti. V tem prispevku predstavljamo alternativen način uravnavanje velikosti nanoploščic barijevega ferita in sicer z delno substitucijo železovih ionov z večjimi ioni skandija ali indija. Pokazali smo, da na ta način, pod hidrotermalnimi pogoji, spremenimo hitrost nukleacije in preprečimo sekundarno rekristalizacijo, ki je vzrok za pretirano rast delcev barijevega ferita. Tako smo sintetizirali ploščice s premerom okrog 50-100 nm in debeline 3-5 nm, ki izkazujejo magnetne lastnosti, primerne za nadaljnjo uporabo.
		ANG	The size of nanoparticles is usually controlled with synthesis conditions and/or with the addition of surfactants. However, the synthesis of the exactly optimal particles with nano size showing, at the same time, applicable physical properties, still remains a challenge for many compounds. In this contribution we represent an alternative route for the particle-size control that is based on partial substitution of iron ions with the larger ions of scandium or indium. We showed that such substitutions, using hydrothermal synthesis, affects the nucleation rate and prevents secondary recrystallization of particles. Namely, the later results in exaggerated particle growth of barium ferrite. This procedure enables synthesis of nanoplates with diameters of 50-100 nm and thicknesses of 3-5 nm, which show applicable magnetic properties.
	Objavljeno v	American Chemical Society; Crystal growth & design; 2012; Vol. 12, no. 11; str. 5174-5179; Impact Factor: 4.689;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.402; A'': 1;A': 1; WoS: DY, FI, PM; Avtorji / Authors: Lisjak Darja, Drofenik Mihael	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

## 7.Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati programske skupine

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID		Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO	Ustanovitev odcepljenega podjetja
		ANG	Spin-out company.
	Opis	SLO	Ustanovili smo odcepljeno visokotehnološko podjetje IJS Nanos Scientifical d.o.o. ( <a href="http://nanos-sci.com/">http://nanos-sci.com/</a> ). Podjetje je bilo ustanovljeno z namenom, da bi okrepilo prenos raziskovalnih rezultatov programa P2-0089-0106 v prakso. Podjetje je sklenilo pogodbo z Institutom »Jožef Stefan« za prevzem pravic nad uporabo znanj in spretnosti pri pripravi superparamagnetnih nanodelcev razvitih na IJS v sklopu programske skupine. Podjetje bo tržilo znanje na področju sinteze in funkcionalizacije nanodelcev, predvsem za uporabo v medicini in fotoniki.
			Spin-out high-tech Nanos Scientifical d.o.o. company ( <a href="http://nanos-">http://nanos-</a>



		sci.com/) was established to facilitate transfer of research results of the Research Program P2-0089 to praxis. The company contracts from the Jožef Stefan Institute the rights to use knowledge and skills for preparation of superparamagnetic nanoparticles developed at JSI in the framework of the Program. The company will market the knowledge related to synthesis and functionalization of nanoparticles, especially in biomedicine and photonics.
	Šifra	F.20 Ustanovitev novega podjetja ("spin off")
	Objavljeno v	AJPES Agencija Republike Slovenije za javnopravne evidence in storitve
	Tipologija	2.14 Projektna dokumentacija (idejni projekt, izvedbeni projekt)
2.	COBISS ID	23140391 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Patentna zaščita fotokatalitskega materiala, ki temelji na nanosih TiO <sub>2</sub> na aglomeratih superparamagnetnih nanodelcev, ter postopka njegove priprave.
		ANG Patent for a photocatalytic material that is based on TiO <sub>2</sub> coatings on agglomerates of superparamagnetic nanoparticles and the procedure of its preparation
	Opis	SLO Patentna prijava ščiti tako sam izdelek, fotokatalitske delce za čiščenje vode z dispergiranjem in z magnetno separacijo, kot tudi postopek priprave. Pri razvitem materialu smo kot magnetni nosilec uporabili aglomerate superparamagnetnih nanodelcev, medtem ko pri znanih materialih kot nosilec služijo posamezni nanodelci ali pa večji, ferimagnetni delci. Uporaba aglomeratov omogoči veliko učinkovitost pri magnetni separaciji. Postopek, ki temelji na pripravi nanosov TiO <sub>2</sub> na trdnem nosilcu s hidrolizo vodne raztopine TiOSO <sub>4</sub> , je primeren za pripravo vrste materialov za različne uporabe. Razvoj novih produktov na osnovi patenta se nadaljuje v financiranju Cinkarne. Dosežek je bil zbran med izjemne dosežke na področju tehnike v letu 2011.
		ANG The patent application legally protects the product – a photocatalyst for water purification in suspensions, which is magnetically retractable, as well as the procedure for its preparation. The developed material differs from already known materials in the application of magnetic carriers in the form of agglomerates of superparamagnetic nanoparticles. The application of the agglomerates enables good efficiency in the magnetic separation. The patented procedure for the coating of TiO <sub>2</sub> layers on solid substrates using the hydrolysis of TiOSO <sub>4</sub> is appropriate for the preparation of different materials for various applications. New products are being development based on this patent in the Cinkarna Celje company.
	Šifra	D.01 Vodenje/koordiniranje (mednarodnih in domačih) projektov
	Objavljeno v	Urad Republike Slovenije za intelektualno lastnino; 2011; 14 str.; Avtorji / Authors: Makovec Darko, Verhovšek Dejan, Sajko Marjan
	Tipologija	2.24 Patent
3.	COBISS ID	24285223 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Postopek magnetnega izločanja kvasne biomase iz penečega vina
		ANG The method for magnetic separation of used yeast biomass from sparkling wines.
	Opis	SLO S patentom smo zaščitili postopek magnetne separacije kvasne biomase iz penečih vin, ki temelji na adsorpciji magnetnih nanodelcev na kvasovke in njihovi magnetni separaciji iz vina. Postopek mednarodne patentne zaščite je v teku. Za podjetniško idejo osnovano na izumu smo prejeli 2. nagrada za inovativnost na 4. Mednarodni konferenci o prenosu tehnologij, Ljubljana. Postopek je bil predstavljen v več tujih strokovnih revijah s

		področja vinarstva (VigneVini (Italija), Vineyard&Winery Management (Kalifornija)).
	ANG	The method for magnetic separation of yeast biomass from sparkling wines was patented. The method is based on the adsorption of the magnetic nanoparticles at the yeast cells followed by magnetic separation of the biomass from the wine. The procedure for international patent protection is in progress. We received 2nd award at 4th International Conference of Technology Transfer in Ljubljana for this innovation. The procedure has been presented in several professional publications dedicated to winery abroad (VigneVini (Italy), Vineyard&Winery Management (California)).
	Šifra	F.09 Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije
	Objavljeno v	Urad RS za intelektualno lastnino; 2012; Avtorji / Authors: Berovič Marin, Makovec Darko, Bošković Suzana
	Tipologija	2.24 Patent
4.	COBISS ID	27331367 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Vodenje aplikativnih projektov.
		ANG Leading of applied projects
	Opis	SLO Zaključili smo več projektov v podporo razvoju zdravila temelječega na nanodelcih železovega oksida in metod karakterizacije zdravila v direktnem financiranju tovarne Lek Pharmaceuticals d.d. V okviru projektov smo razvili in validirali metode za karakterizacijo magnetnih lastnosti nanodelcev in meritve velikosti anorganskega jedra nanodelcev z metodo preseвне elektronske mikroskopije.
		ANG Applied projects in support of development of new drug and methods for its characterization in direct financing of Lek Pharmaceuticals d.d. (Sandoz) were successfully finished in 2013. The drug is based on iron oxide nanoparticles. In the framework of the projects new characterization methods were developed and validated for magnetic measurements and measurements of the nanoparticles' inorganic cores.
	Šifra	F.06 Razvoj novega izdelka
	Objavljeno v	2013; Avtorji / Authors: Makovec Darko, Anželak Bernarda, Jenuš Petra, Rozman Peterka Tanja
	Tipologija	2.13 Elaborat, predštudija, študija
5.	COBISS ID	27366439 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Vabljen predavanje.
		ANG Invited lecture
	Opis	SLO V vabljenem predavanju na konferenci Materials Science& Technology 2013 je bil predstavljen nov postopek sinteze kompozitnih nanodelcev, ki temelji na nanašanju plasti magnetnega spinelnega ferita, kot je železov oksid maghemit, na jedrne nanodelce iz različnih funkcionalnih materialov v stabilni vodni suspenziji. Postopek temelji na kontroli prenasičenja med soobarjanjem ionov, ki omogoči izključno heterogeno nukleacijo produktov in rast feritne plasti na jedrnih nanodelcih.
		ANG The new synthesis method of composite nanoparticles was presented in the invited lecture at the Materials Science & Technology 2013 Conference. The method is based on coating magnetic spinel ferrite shell, such as iron oxide maghemite, onto the core nanoparticles of different functional materials in their aqueous suspensions. The key is in control of the supersaturation during co-precipitation of metal ions, which enables exclusively heterogeneous nucleation of the product and growth of the ferrite shell on the core nanoparticles.

Šifra	B.04	Vabljen predavanje
Objavljeno v	The American Ceramic Society; MS&T'13; 2013; Avtorji / Authors: Makovec Darko, Primc Darinka	
Tipologija	1.10	Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci (vabljen predavanje)

## 8. Drugi pomembni rezultati programske skupine<sup>2</sup>

Pedagoška dejavnost, metorska dejavnost, popularizacija znanosti.

## 9. Pomen raziskovalnih rezultatov programske skupine<sup>8</sup>

### 9.1. Pomen za razvoj znanosti<sup>9</sup>

SLO

Program P2-0089 je posvečen predvsem raziskavam sinteze novih materialov. Pogosto je prav možnost sinteze ustreznega materiala ovira pri razvoju nekega znanstvenega ali tehnološkega področja. Poznamo primere, kjer so znani osnovni principi razvoja nekega znanstvenega področja, pa ni na voljo zahtevanega materiala. V teh primerih lahko znanje o sintezi ustreznih materialov omogoči pravo eksplozijo raziskav, novih izdelkov in tehnologij. Tak primer so na primer feromagnetni tekoči kristali, katerih obstoj sta Brochard in de Gennes napovedala že pred več kot štirimi desetletji, vendar pa je šele naš razvoj sinteze magnetnih nanoplošč  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  omogočila prvi eksperimentalni dokaz njune teorije in bo, kar je še pomembneje, lahko omogočil nadaljnji znanstveni razvoj na področju in razvoj povsem novih tehnologij. Pozornost raziskav je bila posvečena predvsem kontrolirani sintezi nanodelcev, uravnavanju njihovih površinskih lastnosti, ter njihovemu spajanju v nove nanokompozitne materiale. Razvijali smo materiale na osnovi magnetnih nanodelcev, predvsem za uporabo v biomedicini, magnetne feritne materiale za visokofrekvenčno uporabo ter polprevodne feroelektrične keramike. Izpostavim lahko, da smo kot prvi uspeli sintetizirati zelo majhne nanodelcev heksaferitov. To je že omogočilo razvoj novih nanokompozitnih materialov, kot so zgoraj omenjeni feromagnetni tekoči kristali, seveda pa razvoj z uporabo nanodelcev sintetiziranih po naših metodah poteka tudi drugje v svetu. Razvili smo nove metode, ki omogočajo kontrolo površinskih lastnosti (funkcionalizacijo) nanodelcev. Pridobljeno znanje je osnova, tako za sintezo koloidnih suspenzij nanodelcev in za njihovo uporabo v medicini, kot tudi za njihovo nadaljnje spajanje v nanoskupke in nanokompozitne materiale. Sinteza stabilnih suspenzij superparamagnetnih nanoskupkov z ozko porazdelitvijo velikosti bo omogočila nove pristope k kontroli optičnih lastnosti suspenzij (magneto-optika) in s tem nove smeri razvoja fotonike. Po originalnem sinteznem postopku smo kot druga skupina na svetu (prvi so bili raziskovalci s Kalifornijske univerze) uspeli sintetizirati take magneto-optične suspenzije, pri čemer pa naša metoda omogoča mnogo lažjo proizvodnjo večjih količin. Razen v fotoniki so suspenzije superparamagnetnih nanoskupkov zelo zanimive tudi za uporabe povezane z njihovim magneto-reološkim učinkom.

Naše raziskave na področju sinteze, funkcionalizacije in lastnosti nanodelcev so pomembno prispevale tudi k razumevanju vpliva nanodelcev na žive sisteme in so s tem pomembne za razvoj nanobiomedicine na eni strani in nanotoksikologije na drugi.

Osnovno znanje pridobljeno z našimi raziskavami na področju mikrovalovnih magnetnih materialov bo vse bolj pomembno v bližnji prihodnosti, ko se bo meja delovnih frekvenc elektromagnetnih sistemov dvignila v območje milimetrskih valov (30-300 GHz). Pri tako visokih frekvencah lastne magnetne lastnosti običajnih materialov večinoma odpovedo, zato je potrebno razviti postopke za pripravo novih materialov. Tudi v tem primeru lahko pričakujemo, da bo uspešna rešitev problema ustreznih materialov privedla do splošnega dviga znanstvenega nivoja na področju, na primer, pri nadaljnjem razvoju nereguliranih naprav. Naš viden prispevek na tem področju so metode za pripravo magnetno usmerjenih plasti barijevega heksaferita. Za njihov nanos iz stabilnih suspenzij je bilo potrebno preučiti sile, ki delujejo med magnetnimi nanodelci v suspenziji in z ustrežno površinsko obdelavo preprečiti magnetno aglomeracijo nanodelcev. Pridobljeno znanje bo osnova za razvoj številnih novih kompozitnih materialov, ki v plasti spajajo magnetne materiale z drugimi uporabnimi materiali. Posebno

zanimivi so kompoziti, pri katerih sta dve uporabni lastnosti med seboj sklopljene, kot je to na primer pri magnetoelektričnih kompozitih, v katerih so sklopljene magnetne in feroelektrične lastnosti.

ANG

The program P2-0089 was devoted mainly to the syntheses of new materials. Accessibility to the appropriate material is frequently the main obstacle in the development of a new area of science and technology. The scientific principles governing the development in a certain area of science might frequently be well known; however, the development is limited by a lack of the appropriate technology needed to prepare the material required. In such a situation, knowledge enabling the synthesis of the required material can facilitate a sudden burst of research and new products. A good example is ferromagnetic liquid crystals, the existence of which were predicted by Brochard and de Gennes more than 40 years ago; however, only our development of magnetic BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nanoplatelet synthesis enabled the first experimental evidence, and, even more importantly, enabled the subsequent research and development of entirely new technologies.

The main research has been focused on the controlled synthesis of nanoparticles (NPs), the engineering of their surface properties and their assembly into nanocomposites (NCs). New materials based on magnetic NPs for biomedical applications, magnetic ferrites for high-frequency applications and semiconducting ceramics were developed. We managed to be the first group in the world to synthesise ultrafine hexaferrite NPs. This then enabled the further development of NCs, such as the above-mentioned ferromagnetic liquids. However, developments based on the NPs synthesized according to our procedures are taking place worldwide. We developed new methods required for the control of NPs' surface properties. The acquired knowledge is needed for the preparation of suspensions of NPs, for their medical applications, and also for the assembly of NPs into nanoclusters and NCs. The synthesis of stable suspensions of superparamagnetic nanoclusters with a narrow size distribution will enable a new approach to the control of optical properties (magneto-optics) and will enable new directions in photonics research. We have managed to synthesize such magneto-optical suspensions using an original synthesis procedure, second only to a group from the University of California. Our synthesis method enables the even easier production of larger amounts of the suspension. The research based on the application of our materials can thus have an especially large impact in the various fields of photonics. The suspensions are also very interesting in applications based on their large magneto-rheological effect.

Our research of the synthesis, functionalization, and properties of NPs are of special importance for understanding the influence of NPs on living systems and therefore important for the development of nano-biomedicine and nano-toxicology.

Basic research gained through our work in the field of microwave magnetic materials will be increasingly important in the near future, when the operating frequencies of electronic devices will increase to the area of mm-waves (30–300 GHz). At these high frequencies the intrinsic properties of conventional materials generally fail. There is a need for the development of new procedures enabling the synthesis of entirely new materials. Our significant contribution to this field of research is in the preparation of magnetically oriented films of Ba hexaferrite. To be able to control their deposition from the suspensions we had to study the forces acting between the magnetic nanoparticles in the suspension. Their magnetic agglomeration has to be avoided with an appropriate surface treatment. This gained knowledge is also the basis for the development of new materials combining magnetic materials with other functional materials. The composites enabling the coupling of different functional properties are of special interest, for example, coupled ferromagnetic and ferroelectric properties in magneto-electric composites.

## 9.2. Pomen za razvoj Slovenije<sup>10</sup>

SLO

Glavnina raziskav je bila usmerjena k sintezi kompleksnih nanomaterialov in njihovi uporabi v medicini in tehniki. Metode, ki jih uporabljamo pri sintezi novih nanomaterialov ne temeljijo na uporabi drage opreme, ampak na izvirnih pristopih in poglobljenem znanju o osnovnih kemijskih mehanizmih postopkov. Pri razvoju novih metod sinteze materialov smo pozorni na to, da omogočajo relativno preprost prenos v industrijsko proizvodnjo. Tako imajo naše raziskave veliko uporabno vrednost za slovensko industrijo. Čeprav so raziskave na področju medicine predvsem temeljne, dejanska uporaba pa precej oddaljena, je lahko pridobljeno znanje

praktično pomembno v sodelovanju s slovenskimi farmacevtskimi podjetji in manjšimi podjetji, ki zagotavljajo specializirane storitve v raziskavah na področju medicine. S tovarno Lek že uspešno sodelujemo pri razvoju zdravil na osnovi nanodelcev. Seveda pa bo znanje razvito v povezavi z medicino praktično uporabno tudi za razvoj novih tehnologij, izdelkov in storitev. Tu naj izpostavimo uporabo magnetne separacije v čiščenju vode, kjer smo sodelovali s tovarno Cinkarna Celje. Z raziskavami smo se tako tvorno vključevali v reševanje okoljske problematike čiščenja voda, ki je vse bolj pereča tudi v Sloveniji. Magnetna separacija je pomembna tudi v biotehnologiji in kemijski tehnologiji, na primer za nove magnetno izločljive (bio)katalizatorje, ki lahko zelo hitro najdejo uporabo v industriji, od proizvajalcev osnovnih kemikalij, preko biotehnologije in farmacije, do živilske tehnologije. Pripravili smo prve magnetne katalizatorje in jih testiramo v relevantnih kemijskih procesih. Na področju magnetne separacije mikroorganizmov smo se vključili v razvoj novih pristopov v vinarstvu in pivovarstvu. Del naših raziskav je posvečen raziskavam keramik s pozitivnim temperaturnim koeficientom upornosti (PTKU), kjer že dolgo sodelujemo s tovarno Stelem. Raziskave povezane z magnetnimi in optičnimi materiali za optična vlakna pa smo izpeljali v sodelovanju s podjetjem Optacore.

Da bi še pospešili prehod rezultatov naših raziskav v praktično uporabo smo ustanovili odcepljeno podjetje Nanos Scientifical d.o.o in pravno uredili njegove razmerje z IJS. V začetni stopnji bo podjetje tržilo naše znanje o funkcionalizaciji magnetnih nanodelcev predvsem v mednarodni raziskovalni sferi na področju biomedicine in fotonike. Ustanovljeno odcepljeno podjetje nam daje veliko možnosti za prenos novih tehnologij na tržišče.

Ne nazadnje je program s svojo tematiko oral ledino v Sloveniji na področju nanomaterialov. Znanje, ki ga razširjamo v raziskovalno, pedagoško, industrijsko in družbeno okolje je pomembno za tehnološki in družbeni razvoj Slovenije. Program je z več (3-5, odvisno od obdobja) habilitiranimi visokošolskimi učitelji prispeval k dvigu pedagoške ravni. Člani programa se vključujemo v pedagoški proces na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerzi v Mariboru, Medicinski fakulteti Univerze v Mariboru in Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Nanomateriale sintetizirane v okviru programa uporabljajo v raziskavah številne druge slovenske raziskovalne skupine, predvsem s področja biologije, nanotoksikologije, fizike, elektrotehnike in biotehnologije. Sodelovali smo celo pri razvoju nove likovno umetniške tehnike v sodelovanju z Likovno akademijo Univerze v Ljubljani, ki temelji na manipulaciji suspenzije magnetnih nanodelcev v monomeru, pri čemer lahko obliko ohranimo s polimerizacijo.

ANG

The majority of the research in the program has been devoted to the synthesis of complex nanomaterials and their use in medicine and technology. The methods that we use for the synthesis of new nanomaterials do not require expensive equipment, as they are based on original scientific approaches and a profound knowledge of basic chemical processes. Special care is given to new synthesis methods that enable a relatively easy transfer to industrial production. Our research is thus important for Slovenian industry. Although the research related to medicine is mainly basic and its applications seem quite distant, the acquired practical knowledge is important in cooperation with Slovenian pharmaceutical companies and SMEs providing specialized services to biomedical research. Our cooperation with the Lek Pharmaceuticals company is already well established on the research related to the development of new nanoparticles-based drugs. The knowledge developed in the research of materials applications in medicine is also practically applicable for the development of new technologies, products and services, especially related to magnetic separation. We already cooperate with the Cinkarna Celje company on the use of the magnetic separation in water purification. Thus, we participated in solving the ecological problems of water remediation, which is increasingly problematic in Slovenia. Magnetic separation is also important in biotechnology and in chemical technology, for example, in new, magnetically retractable (bio) catalysts that can be used by Slovenian industry, ranging from process industries, such as the producers of basic chemicals, over biotechnology and pharmacy, to the food industry. We already synthesized magnetic catalysts and tested them in relevant chemical processes. We are also involved in the development of new processes in the wine and beer industry based on the magnetic separation of microorganisms. A part of our research remains devoted to ceramics displaying a positive temperature coefficient of resistivity (PTCR), where we traditionally cooperate with the Stelem company. We also cooperate with the Optacore company in the R&D of magnetic and optical materials for optical fibres.

To even further strengthen the transfer of our research results into practical use we recently

established a spin-out company Nanos Scientifcae d.o.o. and settled its legal relation with Jožef Stefan Institute. In the initial phase the company will market some of our knowledge related to the functionalization of magnetic nanoparticles to international customers working in biomedical research and photonics. The spin-out company gives many new opportunities for the marketing of our developed new technologies.

Last but not the least, the program pioneers many areas of nanomaterials in Slovenia. Acquired knowledge is disseminated over research, industry, and to society, and is thus important for the technological development of Slovenia. The program contributes to an increase in the level of higher education with three habilitated professors. The members of the program are involved in the pedagogical processes at the Faculty for Chemistry and Chemical Technology, University of Maribor, the Faculty of Medicine, University of Maribor and at the International Postgraduate School of Jožef Stefan. Nanomaterials synthesized in our research group are used in the research of many other Slovenian research groups, from biology, nano-toxicology, physics, electrotechnics, and biotechnology. We even cooperate with the Art Academy, University of Ljubljana in the development of new artistic techniques based on manipulation with a suspension of magnetic nanoparticles in a monomer, which is polymerized to retain its form.

## 10. Zaključena mentorstva članov programske skupine pri vzgoji kadrov v obdobju 1.1.2009-31.12.2014<sup>11</sup>

### 10.1. Diplome<sup>12</sup>

vrsta usposabljanja	število diplom
bolonjski program - I. stopnja	7
bolonjski program - II. stopnja	0
univerzitetni (stari) program	70

### 10.2. Magisterij znanosti in doktorat znanosti<sup>13</sup>

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Mag.	Dr.	MR	
33403	Petra Jenuš	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
31770	Aljaž Selišnik	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
29529	Slavko Kralj	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
26338	Stanislav Čampelj	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
26478	Sašo Gyergyek	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
29744	Darinka Primc	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
29535	Simona Ovtar	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
29578	Brina Dojer	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
28223	Ana Drmota Petrič	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
0	Danč Anita	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	
0	Danč Valerija	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	
28428	Miloš Beković	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
32141	Janja Stergar	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Legenda:

**Mag.** - Znanstveni magisterij  
**Dr.** - Doktorat znanosti  
**MR** - mladi raziskovalec

## 11. Pretok mladih raziskovalcev – zaposlitev po zaključenem usposabljanju<sup>14</sup>

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Mag.	Dr.	Zaposlitev
33403	Petra Jenuš	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	A - raziskovalni zavodi
31770	Aljaž Selišnik	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	C - Gospodarstvo
29529	Slavko Kralj	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	A - raziskovalni zavodi
26478	Sašo Gyergyek	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	A - raziskovalni zavodi
26338	Stanislav Čampelj	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	C - Gospodarstvo
29744	Darinka Primc	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	E - Tujina
29535	Simona Ovtar	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	E - Tujina
29578	Brina Dojer	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	A - raziskovalni zavodi
28223	Ana Drmota Petrič	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	C - Gospodarstvo
28428	Miloš Beković	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	D - Javni zavod

Legenda zaposlitev:

- A** - visokošolski in javni raziskovalni zavodi
- B** - gospodarstvo
- C** - javna uprava
- D** - družbene dejavnosti
- E** - tujina
- F** - drugo

### 12. Vključenost raziskovalcev iz podjetij in gostovanje raziskovalcev, podoktorandov ter študentov iz tujine, daljše od enega meseca, v obdobju 1.1.2009-31.12.2014

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Sodelovanje v programski skupini	Število mesecev
0	Dr. Svetoslav M. Kolev	D - podoktorand	10
0	Dr. Marin Tadič	D - podoktorand	6
0	Maria Verde Lozano	C - študent – doktorand	3
0	Mara Bernardo Sacristan	C - študent – doktorand	3
0	Bernardo Maestro Maria	C - študent – doktorand	1
0	Damien Morisset	C - študent – doktorand	3

Legenda sodelovanja v programski skupini:

- A** - raziskovalec/strokovnjak iz podjetja
- B** - uveljavljeni raziskovalec iz tujine
- C** - študent – doktorand iz tujine
- D** - podoktorand iz tujine

### 13. Vključevanje v raziskovalne programe Evropske unije in v druge mednarodne raziskovalne in razvojne programe ter drugo mednarodno sodelovanje v obdobju 1.1.2009-31.12.2014<sup>15</sup>

SLO

PR-02337: Eureka, "IMICIMO: Integrated Miniature Circulators for Microwave Modules – Integrirani miniaturni cirkulatorji za mikrovalovne sklope", nosilka doc. dr. Darja Lisjak, 2008-2010

PR-03196: MANUNET 3 »FOMS; Fiber Optics Magnetostrictive Sensor -Magnetostrikijski senzor na osnovi optičnih vlaken«; nosilka doc. dr. Darja Lisjak, 2010-2011.

PR-03349: MNT-ERA-NET, »FERFIT: Ferrite Thick Films for Integrated Circuits - Debele feritne plasti za integrirana vezja«; koordinatorica doc. dr. Darja Lisjak, 2010-2012.

COST Action MP0701: »Kompoziti z materiali nanodimenzij, ki izkazujejo nove funkcionalne in strukturne lastnosti (nanokompozitni materiali NCM)«; nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2009-2012.

COST Action ICT1208: »Integrating devices and materials: A challenge for new instrumentation in ICT«; nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2013-2017.

BI-CZ-09-10-001: »Kompozitni nanodelci sestavljeni iz heksagonalnega ferita in spinelnega ferita za zdravljenje raka z magnetno hipertermijo«; Slovensko-Francoska bilateralna sodelava, nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2009-2010.

BI-FR-09-10-PROTEUS-003: »Sinteza superparamagnetnih nanodelcev heksaferita s hidrotermalnimi metodami«; Slovensko-Francoska bilateralna sodelava, nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2009-2010.

BI-HU-10-11-002: »Magnetni nanodelci za uporabo v hipertermiji«; Slovensko Madžarska bilateralna sodelava, nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2010-2011.

BI-HU/08-09-008: "Co-fired Ferrite-Ceramic Systems for Integrated Miniature Circulators – Sočasno sintrani feritni keramični sistemi za integrirane miniaturne cirkulatorje", Slovensko Madžarska bilateralna sodelava nosilka doc. dr. Darja Lisjak, 2008-2009.

Bi-BG/09-10-004: "Preparation of thick ferrite coatings with the deposition in magnetic field – Priprava debelih feritnih plasti z nanosom v magnetnem polju" Slovensko - Bolgarska bilateralna sodelava, nosilka doc. dr. Darja Lisjak, 2009-2010.

BI-BG/11-12-004 »Room-Temperature Multiferroics Based on Y-type Hexaferrites -Multiferoriki na osnovi Y-hexaferitov delujoči pri sobni temperaturi«; Slovensko - Bolgarska bilateralna sodelava, nosilka doc. dr. Darja Lisjak, 2011-2012.

BI-RS/14-15-024 »Superparamagnetni nanodelci in nanoskupki železovega oksida: sinteza, interakcije med nanodelci, magnetni moment in njihova uporaba«; Slovensko - Srbska bilateralna sodelava, nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2014-2015.

#### **14.Vključenost v projekte za uporabnike, ki so v obdobju trajanja raziskovalnega programa (1.1.2009–31.12.2014) potekali izven financiranja ARRS<sup>16</sup>**

SLO

PR-01905: L2-9151-0106-06 »Sinteza magnetnih nanodelcev za mikrovalovne absorberje in magnetne tekočine« sofinanciranje Kolektor Nanotesla Inštitut, nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2007-2009.

PR-01623: L2-1156-0106-08 »Razvoj fotokatalitičnih superparametrov nanokompozitov za postopke zmanjšanja emisij«; sofinanciranje Cinkarna Celje d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2008-2010.

PR-03232: »Sodelovanje pri razvoju magnetnih nanodelcev za vnos dednega materiala v celice«; nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2009-2010.

K8: »Optimizacija proizvodnega postopka priprave PTC uporov«; Stelem d.o.o., nosilec dr. Igor Zajc, 2010.

PR-04081: »Razvoj pilotnega postopka priprave superparamagnetnih fotokatalitskih nanokompozitnih delcev...«; Cinkarna Celje d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2011-2012.

PR-04268: »Deformulacija in razvoj nanodelcev železovega oksida za farmacevtsko uporabo«; Lek Pharmaceuticals d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2011.

PR-04460: »Analitska ter strokovna podpora pri optimizaciji sinteze delcev železovega oksida«;



Lek Pharmaceuticals d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2011.  
 2012-421: »Analitska ter strokovna podpora pri optimizaciji sinteze delcev železovega oksida«;  
 Lek Pharmaceuticals d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2012.  
 PR-05095 »Analitska in strokovna podpora pri razvoju farmacevtske oblike z nanodelci železovega oksida«;  
 Lek Pharmaceuticals d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2012-2013.  
 PR-05462 »Razvoj analitskih metod in izvedba študij karakterizacije farmacevtske oblike z nanodelci železovega oksida«  
 «; Lek Pharmaceuticals d.d., nosilec prof. dr. Darko Makovec, 2013.  
 Vavčer, PR-04988, »Optična vlakna dopirana s fluorescentnimi nanodelci«;  
 Optacore, nosilec doc. dr. Darja Lisjak, 2013.  
 Vavčer, PR-04991, »Raziskave in razvoj polprevodne keramike s PTCR učinkom brez okolju škodljivega svinčevega oksida«,  
 Stelem, , nosilec dr. Igor Zajc, 2013.

**15. Ocenite zrelost rezultatov raziskovalnega programa in možnosti za njihovo implementacijo v praksi (točka ni namenjena raziskovalnim programom s področij humanističnih ved)**<sup>12</sup>

SLO

Glavnina raziskav programske skupine je usmerjena k magnetnim nanodelcem, predvsem v povezavi z uporabo v medicini. Na tem področju so raziskave predvsem temeljne, dejanska uporaba pa je precej oddaljena. Kljub temu je naše znanje pomembno pripomoglo k razvoju zdravila, ki temelji na nanodelcih magnetnega železovega oksida v tovarni Lek Pharmaceuticals d.d. Dobri rezultati so pripeljali do nadaljnjega razvoja novih zdravil. Znanje razvito v raziskavah povezanih z uporabo nanodelcev v medicini pa je na drugi strani zelo aktualno za uporabo magnetnih nanodelcev v tehnologiji, predvsem v povezavi z magnetno separacijo. Pri razvoju novih metod sinteze materialov smo pozorni na to, da omogočajo tudi relativno preprost prenos v industrijsko proizvodnjo. Razvoj materialov in znanja o magnetni separaciji je lahko podlaga za razvoj številnih novih tehnologij in izdelkov. Tako smo v sodelovanju s Cinkarno Celje razvili nov magnetno izločljiv fotokatalitski material, ki bo tovarni omogočil razvoj novih izdelkov in storitev na področju čiščenja voda. Magnetna separacija je pomembna tudi v biotehnologiji in kemijski tehnologiji, na primer za nove magnetno izločljive (bio)katalizatorje. Z adsorpcijo magnetnih nanodelcev na bakterije lahko omogočimo njihovo magnetno izločanje iz reakcijskih mešanic, na primer izločanje izrabljene kvasne biomase iz vina ali izločanje bakterij v določeni stopnji fermentacije, kar omogoča določeno kontrolo biotehnološkega procesa. Na področju nanokompozitnih materialov za uporabo v tehniki smo blizu končnim uporabam v magnetoptičnih in fluorescentnih vlaknih, kjer tesno sodelujemo s tovarno Optacore. Del naših raziskav je posvečen raziskavam keramik s pozitivnim temperaturnim koeficientom upornosti (PTK upori), kjer tesno sodelujemo s tovarno Stelem. Poudarek je na razvoju novih materialov, ki v svoji sestavi ne bodo vsebovali strupenega svinca, kot je  $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ . Uporabno znanje se nanaša na pripravo PTK uporov, ki se uporabljajo kot samo regulirani grelci v gospodinjstvu in na drugih področjih, kjer je uporaba sedanjih materialov zaradi vsebnosti strupenega svinca omejena. Ne nazadnje smo ustanovili odcepljeno podjetje in pravno uredili njegov odnos z IJS. Podjetje bo predvsem v mednarodni raziskovalni sferi tržilo naše znanje o funkcionalizaciji magnetnih nanodelcev. Ideja podjetja je trženje nanodelcev s prilagojenimi površinskimi lastnostmi po željah kupca.

**16. Ocenite, ali bi doseženi rezultati v okviru programa lahko vodili do ustanovitve spin-off podjetja, kolikšen finančni vložek bi zahteval ta korak ter kakšno infrastrukturo in opremo bi potrebovali**

možnost ustanovitve spin-off podjetja	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
potrebni finančni vložek	1 EUR

ocena potrebne infrastrukture in opreme <sup>18</sup>	Iz programa je izšlo odcepljeno (spin out) podjetje Nanos Scientifica d.o.o., ki bo tržilo magnetne nanomateriale pripravljene po zahtevah kupca predvsem na področjih povezanih z raziskavami v medicini in fotoniki. Podjetje ima pogodbo z Institutom »Jožef Stefan« o dostopu do raziskovalne opreme, ki jo potrebuje v podporo svoji tržni dejavnosti. Opremo za proizvodnjo materialov in karakterizacijo bo tudi v bodoče najemalo na inštitucijah znanja. Trženje, kot primarno dejavnost, bo podjetje omogočalo z lastnimi sredstvi.
---	---

## 17. Izjemni dosežek v letu 2014<sup>19</sup>

### 17.1. Izjemni znanstveni dosežek

V študiji urejanja ferimagnetnih nanodelcev CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> in BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> v magnetnem polju smo razložili prispevek vpliva magnetokristalne strukture in oblike nanodelcev na morfologijo in usmerjenost nanešenih nanodelcev. Medtem ko se simetrični nanodelci CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> naložijo v stolpce, kot rezultat ravnotežja med magnetostatsko in potencialno energijo, se nanoploščice BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> preferenčno naložijo v smeri s podlago. Ker taka usmeritev nanoploščic sovpada z magnetno osjo, to omogoča pripravo magnetno anizotropnih plasti. Magnetne anizotropija stolpcev CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> pa je precej manjša, saj magnetna usmeritev ne sovpada s preferenčno usmeritvijo nanodelcev.

Magnetno usmerjene plasti BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> se lahko uporabljajo kot nerecipročni mikrovalovni elementi brez dodatnega magneta ali kot tankoplastni magneti. Stolpičaste strukture iz nanodelcev CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> pa so primerna osnova za pripravo magnetoelektričnih kompozitov, ki naj bi izkazovali največji možni magnetoelektrični učinek.

### 17.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

Začeli smo z novim obdobjem razvojno-raziskovalnega sodelovanja s farmacevtsko tovarno Lek Pharmaceuticals d.d., Mengeš, v podporo razvoju zdravila temelječega na nanodelcih železovega oksihidroksida. V okviru projektov razvijamo tudi nove metode za karakterizacijo lastnosti nanodelcev, predvsem meritve velikosti anorganskega jedra nanodelcev z metodo presevne elektronske mikroskopije.

## C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni;
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja in obdelavo teh podatkov za evidence ARRS;
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v papirnati obliki;
- so z vsebino poročila seznanjeni in se strinjajo vsi izvajalci raziskovalnega programa.

### Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba  
matične RO (JRO in/ali RO s  
koncesijo):*

Institut "Jožef Stefan"

in

*vodja raziskovalnega programa:*

Darko Makovec

ŽIG

Kraj in datum: 

Ljubljana	6.3.2015
-----------	----------

**Oznaka poročila: ARRS-RPROG-ZP-2015/133**

<sup>1</sup> Napišite povzetek raziskovalnega programa v slovenskem jeziku (največ 3.000 znakov vključno s presledki – približno pol strani, velikost pisave 11) in angleškem jeziku (največ 3.000 znakov vključno s presledki – približno pol strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>2</sup> Napišite kratko vsebinsko poročilo, v katerem predstavite raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega programa in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. V primeru odobrenega povečanja obsega financiranja raziskovalnega programa v letu 2014 mora poročilo o realizaciji programa dela zajemati predložen program dela ob prijavi in predložen dopolnjen program dela v letu 2014. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>3</sup> Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>4</sup> V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa dela raziskovalnega programa, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega programa oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave programske skupine v zadnjem letu izvajanja raziskovalnega programa, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, navedite: "Ni bilo sprememb.". Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>5</sup> Navedite znanstvene dosežke (največ pet), ki so nastali v okviru izvajanja raziskovalnega programa. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja programa vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'. [Nazaj](#)

<sup>6</sup> Navedite družbeno-ekonomske dosežke (največ pet), ki so nastali v okviru izvajanja raziskovalnega programa. Družbeno-ekonomski dosežek iz obdobja izvajanja programa vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat programa ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

<sup>7</sup> Navedite rezultate raziskovalnega programa iz obdobja izvajanja programa v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov vključno s presledki (približno 1/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>8</sup> Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://www.sicris.si/> za posamezen program, ki je predmet poročanja. [Nazaj](#)

<sup>9</sup> Največ 4.000 znakov vključno s presledki (približno 2/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>10</sup> Največ 4.000 znakov vključno s presledki (približno 2/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>11</sup> Upoštevajo se le tiste diplome, magisteriji znanosti in doktorati znanosti (zaključene/i v obdobju 1.1.2009–31.12.2014), pri katerih so kot mentorji sodelovali člani programske skupine. [Nazaj](#)

<sup>12</sup> Vpišite število opravljenih diplom v času izvajanja raziskovalnega programa glede na vrsto usposabljanja. [Nazaj](#)

<sup>13</sup> Vpišite šifro raziskovalca in/ali ime in priimek osebe, ki je v času izvajanja raziskovalnega programa pridobila naziv magister znanosti in/ali doktor znanosti ter označite doseženo izobrazbo. V primeru, da se je oseba usposabljala po programu Mladi raziskovalci, označite "MR". [Nazaj](#)

<sup>14</sup> Za mlade raziskovalce, ki ste jih navedli v tabeli 11.2. točke (usposabljanje so uspešno zaključili v obdobju od 1.1.2009 do 31.12.2014), izberite oz. označite, kje so se zaposlili po zaključenem usposabljanju. [Nazaj](#)

<sup>15</sup> Navedite naslove projektov in ime člana programske skupine, ki je bil vodja/koordinator navedenega projekta. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>16</sup> Navedite naslove projektov, ki ne sodijo v okvir financiranja ARRS (npr: industrijski projekti, projekti za druge naročnike, državno upravo, občine idr.) in ime člana programske skupine, ki je bil vodja/koordinator navedenega projekta. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>17</sup> Opišite možnosti za uporabo rezultatov v praksi. Opišite izdelke oziroma tehnologijo in potencialne trge oziroma tržne niše, v katere sodijo. Ocenite dodano vrednost izdelkov, katerih osnova je znanje, razvito v okviru programa oziroma dodano vrednost na zaposlenega, če jo je mogoče oceniti (npr. v primerih, ko je rezultat izboljšava obstoječih tehnologij oziroma izdelkov). Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>18</sup> Največ 1.000 znakov vključno s presledki (približno 1/6 strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

<sup>19</sup> Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega programa v letu 2014 (največ 1000 znakov, vključno s presledki, velikost pisave 11). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priložitev/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROG-ZP/2015 v1.00b

88-63-60-60-5D-CA-4D-4F-4A-86-06-1A-02-77-8A-B4-15-96-C5-31

## **Priloga 1**

# TEHNIKA

## Področje: 2.04 – Materiali

### Dosežek 1: Mehanizem urejanja magnetnih nanodelcev v različne hierarhične strukture pod vplivom magnetnega polja

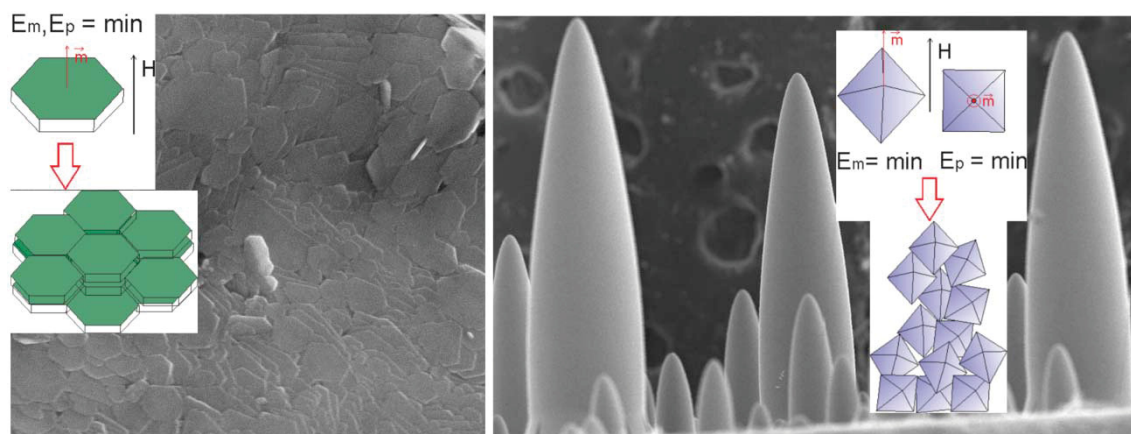
**Vir:** LISJAK, Darja, JENUŠ, Petra, MERTELJ, Alenka. The influence of the morphology of ferrite nanoparticles on the directed assembly into magnetically anisotropic hierarchical structures. *Langmuir*, 2014, 30, 6588-6595. doi: 10.1021/la5012633

#### Odlični znanstveni dosežek:

Mehanizem urejanja magnetnih nanodelcev na osnovi različne magnetokristalne anizotropije in oblike v magnetnem polju.

Nanodelci  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  se urejajo pod vplivom magnetnega polja v različne strukture (glej sliko). Medtem ko se simetrični nanodelci  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  naložijo v stolpce, se nanoploščice  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  preferenčno naložijo v smeri s podlago. Ker taka usmeritev nanoploščic sovpada z magnetno osjo, to omogoča pripravo magnetno anizotropnih plasti. Magnetne anizotropija stolpcev  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  pa je precej manjša, saj magnetna usmeritev ne sovpada s preferenčno usmeritvijo nanodelcev. Usmeritev nanodelcev  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  je odvisna od uravnoveženja magnetostatske in potencialne energije.

Magnetno usmerjene plasti  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  se lahko uporabljajo kot neregularni mikrovalovni elementi brez dodatnega zunanega magneta ali kot tankoplastni magneti. Stolpičaste strukture iz nanodelcev  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  pa so primerna osnova za pripravo magnetoelektričnih kompozitov tipa 1-3, ki naj bi izkazovali največji možni magnetoelektrični učinek.



Vpliv magnetokristalne strukture in oblike ferimagnetnih nanodelcev na njihovo urejanje v magnetnem polju:  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (levo) in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (desno).