

# НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА САНУ

На електронској седници Научног већа Института техничких наука САНУ одржаној 10.06.2016. одређени смо за чланове Комисије за избор у звање научни сарадник др Милоша Миловића, истраживача сарадника Института техничких наука САНУ. На основу увида у објављене научне радове кандидата, као и на основу стручне биографије и осталог прегледаног материјала, подносимо Научном већу Института техничких наука САНУ следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### I Биографски подаци

Милош Д. Миловић рођен је 1987. године у Приштини. Гимназију је завршио у Рашкој. Године 2006. уписује Факултет за физичку хемију Универзитета у Београду. Мастер рад „Креирање неуронске мреже у циљу процене садржаја гвожђа у мозгу оболелих од амиотрофичне латералне склерозе“ одбранио је 2011. године. За изузетан успех током студирања награђен је Повељом Универзитета у Београду као најбољи студент генерације Факултета за физичку хемију који је дипломирао у школској 2010/11. Добитник је дипломе Павле Савић, коју додељује Друштво физикохемичара Србије за успех постигнут на студијама физичке хемије. Докторске студије уписује 2011. на свом матичном факултету, а докторски рад под називом “Синтеза, структурна и електрохемијска својства  $\text{LiFePO}_4$  и  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  као катодних материјала за литијум-јонске батерије“ одбранио је 2016.

У Институту техничких наука САНУ запослен је од децембра 2011. као истраживач приправник на пројекту интегралних и интердисциплинарних истраживања ИИИ 45004, „Молекуларно дизајнирање наночестица контролисаних морфолошких и физикохемијских карактеристика и функционалних материјала на њиховој основи“. 17.06.2013. изабран је у звање истраживач сарадник, а 19.04.2016. реизабран је у исто звање. Има објављена четири рада у водећим међународним часописима и неколико учешћа на домаћим и међународним скуповима.

У област научног интересовања спадају: катодни материјали, хемијски извори струје, литијумске батерије, кристалографија.

### II Научни рад

Др Милош Миловић је учесник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја ИИИ 45004, „Молекуларно дизајнирање наночестица контролисаних морфолошких и физикохемијских карактеристика и функционалних материјала на њиховој основи“.

### III Кратка анализа објављених радова

Др Милош Миловић је до сада објавио 3 рада у међународном часопису изузетних вредности (M21a), 1 рад у врхунском међународном часопису (M21), 2 саопштења са међународног скупа штампана у целини (M33) и 10 саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34) и 1 рад у националном часопису (M53).

Научно-истраживачка активност кандидата Милоша Миловића је у области науке о материјалима и посебно је оријентисана ка синтези нових и унапређењу постојећих катодних система за литијум-јонске батерије. У свом досадашњем раду кандидат је истраживао два таква система:  $\text{LiFePO}_4$  и  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , који се одликују високом густином енергије, ниском ценом, стабилношћу и еколошком прихватљивошћу. Ипак, ниска електронско-јонска проводљивост ограничава примену ових материјала, а посебно код потрошача велике снаге. Истраживачка активност кандидата усмерена је на модификацију ових прахова коришћењем различитих метода синтезе, а путем прављења *in situ* композита са угљеником, регулацијом величине честица или анјонским допирањем са флуором F- као допантом, са циљем да се проводна својства и катодне перформансе ових материјала унапреде.

Преципитацијом из воденог раствора и накнадним одгревањем на  $700^\circ\text{C}$  синтетисан је прах оливина  $\text{LiFePO}_4$ . Истом методом, заменом прекурсора  $\text{LiNO}_3$  са прекурсором  $\text{LiF}$  синтетисан је прах оливина  $\text{LiFePO}_4$  допираног флуором. На крају, стеаринска киселина коришћена је као извор угљеника, а преципитацијом у растопу стеаринске киселине и накнадним одгревањем на  $700^\circ\text{C}$  синтетисан је композит флуором допираног оливина  $\text{LiFePO}_4$  са угљеником. Утврђено је да се флуор уграђује у решетку оливина у износу од око 2 атом% на местима кисеоника (чији је јонски радијус близак, мада нешто већи од јонског радијуса флуора) и то искључиво на O2 позицији што је енергетски најповољније решење од могуће три кристалографске позиције кисеоника. Као последица уградње флуора смањује се запремина јединичне ћелије решетке оливина; присуство флуора стабилише оливинску структуру што за последицу има смањену учесталост тзв. „antisite“ дефекта, у коме литијум на M1 позицији и гвожђе на M2 позицији међусобно измењују места, и повећану кристалиничност  $\text{LiFePO}_4$  фазе. Утврђено је да се специфична електрична проводљивост  $\text{LiFePO}_4$  повећава пет пута (око пола реда величине) у односу на чист  $\text{LiFePO}_4$ . Катодне карактеристике праха допираног флуором значајно су унапређене: дужи напонски плато при свим тестираним струјним густинама указују на „дубљу“ интеркалацију литијума, а самим тиме и капацитети су већи (нпр. при брзини циклирања од C/3 специфични капацитет оливина допираног флуором износи 140 у односу на 85 mAh/g измереним за чист оливин). Декомпозицијом стеаринске киселине формиран је угљеник (5 теж%) који *in situ* облаже честице флуором допираног  $\text{LiFePO}_4$  ограничавајући кристални раст и спречавајући агломерацију честица. Услед повећане проводљивости и смањене средње величине честица, композит флуором допираног  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  остварује супериорне катодне карактеристике: 95% (162 mAh/g) теоријског капацитета при густини струје од C/10, 82% (140 mAh/g) при 1C, 74%

(125 mAh/g) при 2С, 59% (100 mAh/g) при 5С, уз одличну реверзибилност током 150 тестираних циклуса пуњења-пражњења. (*Journal of Power Sources* 241 (2013) 70-79)

Полазећи од прекурсора смештеног унутар целулозне матрице (нанопорозни квантитативни филтер папир), синтетисан је композит  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  поступком нагло загревања до  $700^\circ\text{C}$ , кратким боравком на тој температури (5 min) и наглим хлађењем до собне температуре. Метод брзог термичког третмана ограничава раст кристала оливин-фосфата, док с друге стране штеди време и енергију. На овај начин добијена је уређена  $\text{LiFePO}_4$  фаза у нанокристалном облику (средње величине кристалита од 35 nm) уз присуство минималне количине дефеката („antisite“, 2 атом%) и аморфна фаза неграфитног угљеника који облаже честице  $\text{LiFePO}_4$ . Тежински удео угљеника у композиту износи 40%. Добијени композитни прах је електрохемијски активан и стабилан током 150 тестираних циклуса пуњења-пражњења; при ниским густинама струје остварује високу искоришћеност активног материјала од 97% (165 mAh/g) теоријског капацитета при C/10, док при већим густинама: 1С, 5С, 10С даје редом 140, 120 и 110 mAh/g уз допринос псеудокапацитивности која потиче од велике количине угљеника. (*Powder Technology* 246 (2013) 539-544)

Реакцијом у чврстом стању синтетисан је  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  који је кристалисао у  $P2_1/n$  просторној групи (#14). Средња величина кристалита износи око 100 nm. Као и код  $\text{LiFePO}_4$ , кристална решетка  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  подложна је настанку дефекта („antisite“) у коме литијум и гвожђе међусобно измењују места: утврђено је присуство гвожђа у износу од 5 атомских процената искључиво на Li2 кристалографској позицији, од могуће две, Li1 и Li2 тетраедарске позиције, као резултат електростатичког одбијања међу катјонима гвожђа. Израчуната је просторна дистрибуција суме валенци веза литијума у оквиру  $P2_1/n$  решетке  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ; под претпоставком да у кристалу  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  све вредности валенце око 1 представљају позиције могућег налажења литијума, израчуната је 3D мапа могућих путања литијумових јона и утврђено да је транспорт литијума у оквиру  $P2_1/n$  структуре  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  дводимензион и да се одвија по равнима (101). Услед ниске сопствене проводљивости материјала, као и услед неконтролисаног раста и агломерације честица  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  добијених реакцијом у чврстом стању, испитивани прах, иако електрохемијски активан, потврдио је слабе катодне карактеристике уз знатну поларизацију електрохемијског профила при пуњењу и пражњењу. Даље, након више узастопних циклуса пуњења и пражњења, *ex situ* рендгенским дифракционим мерењем запажена је конверзија структуре током (де)интеркалације литијума из  $P2_1/n$  у неуређену *Pmb* (просторна група #62) полиморфну структуру. (*Journal of Power Sources* 265 (2014) 75-80)

Методом брзог термичког третмана (на сличан начин као при синтези композита  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ ), који укључује нагло загревање до  $750^\circ\text{C}$ , кратак боравак на тој температури и нагло хлађење након тога, синтетисан је композит  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ . У води растворна метилцелулоза, уместо чисте целулозе, коришћена је као извор угљеника, чиме је ранији метод синтезе унапређен. Варирањем концентрације метилцелулозе у почетном раствору синтетисани су композити са различитим садржајем угљеника и испитан је његов утицај на микроструктурне, проводне и електрохемијске карактеристике композита. Својство

метилцелулозе да гелира при загревању раствора и да се реверзибилно раствара при хлађењу омогућило је равномерно мешање прекурсорских компоненти, њихово равномерно дисперговање и заробљавање унутар метилцелулозне матрице. На тај начин омогућена је контрола раста честица  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  већ у првим корацима синтезе. Добијени нанокристални  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  кристалисао је у 14. просторној групи,  $P2_1/n$ . Са порастом садржаја угљеника смањује се средња величина кристалита (од 44 до 15 nm, за 3 теж% и 14 теж%). Даље, са порастом садржаја угљеника смањује се средња величина честица, а специфична електрична проводљивост се повећава, што води већој искоришћености активног материјала. У односу на чист  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , катодне карактеристике композита  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  знатно су унапређене: стабилно циклирање, дужи напонски платои и већи капацитети (практично дуго, 55 и 110 mAh/g за  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  и  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}_{9\%}$ ); међутим, превелики садржај угљеника (>9 теж%) доводи до сатурације катодних перформанси. (*Cellulose 23 (2016) 239-246*)

#### **IV Цитираност**

Радови др Милоша Миловића цитирани су 18 пута (према индексној бази Scopus, дана 07.06.2016.), од којих су 15 хетероцитати, а 3 аутоцитати. Сви цитати наведени су у прилогу.

#### **V Мишљење и предлог Комисије**

За избор у звање научни сарадник Правилником за стицање појединачних научних звања одређени су минимални квантитативни захтеви. Услов за први избор у звање научни сарадник изражен је као обавеза да кандидат има укупно најмање 16 бодова, који треба да припадају следећим категоријама: у првој категорији у избору наведених фактора  $M_{10}+M_{20}+M_{31}+M_{32}+M_{33}+M_{41}+M_{42}$  мора да има 10 бодова и више, и у другој категорији у збиру наведених фактора  $M_{11}+M_{12}+M_{21}+M_{22}+M_{23}+M_{24}$  мора да испуњава услов од најмање 6 бодова.

У табели је приказан преглед објављених радова по категоријама и еквивалентант број бодова за кандидата др Милоша Миловића.

Табела објављених радова кандидата др Милоша Миловића

Индикатор	Категорија	Вредност индикатора	Број радова	Укупно
M21a	Рад у међународном часопису изузетних вредности	10	3	30
M21	Рад у врхунском међународном часопису	8	1	8
M33	Саопштење са међународног скупа штампано у целини	1	2	2
M34	Саопштење са међународног скупа штампано у изводу	0,5	10	5
M53	Рад у националном часопису	1	1	1
M70	Одбрањена докторска дисертација	6	1	6
Укупно				52

Потребан услов за научног сарадника	Остварено
Укупно: 16	52
$M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42 \geq 10$	40
$M11+M12+M21+M22+M23+M24 \geq 6$	38

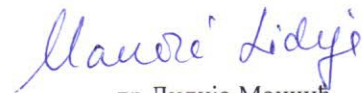
На основу свега изложеног може се извести

## Закључак


Кандидат др Милош Миловић је у својој досадашњој активности показао склоност ка темељном научно-истраживачком раду, жељу за даљим усавршавањем, иницијативу и висок степен самосталности у обављању свих задатака, као и способност за тимски рад на пројекту. Значајан број објављених радова потврђује актуелност тема истраживања којима се кандидат бавио. Др Милош Миловић показује спремност за савладавање нових методологија, стицање нових експерименталних и теоријских знања из области физичке хемије чврстог стања, са акцентом на материјале који се примењују као катоде у литијумским батеријама.

Имајући у виду научне резултате кандидата, предлагемо Научном Већу Института техничких наука САНУ да усвоји овај Извештај и предложи Матичном одбору за хемију захтев за одлуку да др Милоша Миловића стекне звање **научног сарадника**.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Лидија Манчић

Научни саветник ИТН САНУ

  
др Драгана Југовић

Виши научни сарадник ИТН САНУ

  
др Миодраг Митрић

Научни саветник Института за нуклеарне науке Винча