

## **Прототип:**

Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкџет штампача

**Руководилац пројекта:** проф. др Љиљана Живанов

**Одговорно лице:** Чедо Жлебич

**Аутори:** Чедо Жлебич, Љиљана Живанов, Милица Кисић, Нелу Блаж, Мирјана Дамњановић  
Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад

Александар Менићанин

Институт за мултидисциплинарна истраживања (ИМСИ), Београд

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја TP-32016

**Година:** 2015.

**Примена:** новембар 2015.

## **Кратак опис**

Приказан је поступак израде узорака на бази графенског мастила применом десктоп штампача. Узорци су штампани на флексибилној ПЕТ фолији и синтеровани на температури од 100 °C. Као мастило за штампу, коришћено је графенско проводно мастило на бази воденог растварача (Phene plus I3015). Узорци су штампани на ПЕТ подлози дебљине 140  $\mu\text{m}$  (Novacentrix Novele™ II-220). Штампач Epson Stylus C88+ са 180 млазница и 3 pL величином капљица је коришћен за штампање. Технолошки поступци штампе, као и поступак мерења електричних параметара узорака, детаљно су описани.

### **Техничке карактеристике:**

Израђена су два сета узорака: први сет узорака је димензија 10 mm×10 mm и штампан је у 7 и 12 слојева, док је други сет узорака димензија 20 mm×2 mm и штампан је у 2, 7 и 12 слојева. Мерење електричних параметара првог сета узорака извршено је системом за мерење Холовог ефекта Esoria HMS-3000. Измерена покретљивост за узорке од 12 слојева износи 2330  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ . Отпорност другог сета узорака за 2 слоја износи 155 k $\Omega$ , за 7 слојева 1.81 k $\Omega$  и за 12 слојева 220  $\Omega$ .

### **Техничке могућности:**

Техничко решење омогућава израду поновљивих вишеслојних структура у инкџет технологији у циљу квалитетног испитивања електричних карактеристика графенског наночестишног мастила.

### **Реализатори:**

Факултет техничких наука, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд

### **Корисници:**

Факултет техничких наука, Нови Сад

### **Подтип решења:**

M85 - Прототип.

## **Увод**

Фабрикација инкџет технологијом, као производна техника, има обећавајући потенцијал за брз и успешан развој, заснован на примени нових и напредних мастила. Инкџет технологија омогућава компатибилност са различитим врстама подлога, контролисано адитивно депоновање малих количина мастила и смањење потрошње материјала.

С обзиром да конвенционална мастила на бази угљеника имају ограничену проводност, нарочито у формулама која су компатибилна за инкџет штампу, графенска мастила

представљају обећавајућу алтернативу (D. Tobjörk, R. Österbacka, "Paper Electronics". *Adv. Mater.*, Vol. 23, 2011, pp. 1935–1961.). Постоји неколико метода производње графена, као што су редуковање графен оксида (RGO) (X. Wang, L. Zhi, K. Müllen, "Transparent, Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells", *Nano Lett.*, Vol.8, 2008, pp. 323–327.), хемијска депозиција из парне фазе (CVD) (X. Li, C. Magnuson, A. Venugopal, R. Tromp, J. Hannon, E. Vogel, L. Colombo, R. Ruoff., "Large-area graphene single crystals grown by low-pressure chemical vapor deposition of methane on copper." *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 133, No. 9, February 2011, pp. 2816-2819.), ексфолијација графита (Y. Hernandez, V. Nicolosi, M. Lotya, F. Blighe, Z. Sun, S. De, I. McGovern, B. Holland, M. Byrne, Y. Gun'Ko, et al., "High-Yield Production of Graphene by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite", *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 3, 2008, pp. 563–568.).

У раду (E. Secor, P. Prabhurashi, K. Puntambekar, M. Geier, M. Hersam, "Inkjet printing of high conductivity, flexible graphene patterns", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 4, No. 8, 2013, pp. 1347-1351), метода производње графена базирана је на ексфолијацији графена у еколошки бенижном растварачу, етанолу, са стабилизованим полимером, етил целулозом. Да би се детаљно испитале електричне карактеристике, одштампане су линије дужине 4 mm различитих дебљина применом DMP 2800 Fujifilm Dimatix штампача на SiO<sub>2</sub> подлози третираној са hexamethyldisilazane (HMDS). Узорци су синтеровани (печени) 30 минута на температури од 250 °C. За потребе испитивања механичких особина, линије су штампане на полиимидној подлози (DuPont Kapton 125 μm) и синтероване на температури од 250 °C 30 минута.

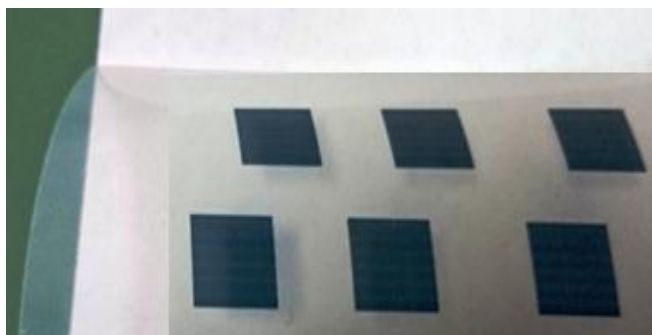
У овом техничком решењу је приказана израда и електрична карактеризација вишеслојних узорака одштампаних десктоп инкџет штампачем на ПЕТ подлози са графенским проводним мастилом на бази воденог растварача. Испитана је и компатибилност са ПЕТ подлогом на ниским температурама синтеровања (100 °C).

### Процес фабрикации одштампаних узорака

Као мастило за штампу, коришћено је графенско проводно мастило на бази воденог растварача (Phene plus I3015). Узорци су штампани на ПЕТ подлози дебљине 140 μm (Novacentrix Novele™ II-220). Штампач Epson Stylus C88+ са 180 млазница и 3 pL величином капљица је коришћен за штампање.

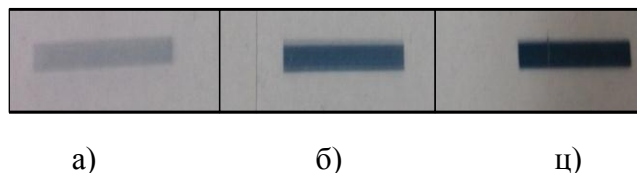
Припрема штампе почиње сипањем графенског мастила у посебно дизајниран кертриџ. Том приликом, потребно је контролисаном перисталтичном пумпом извући скупљени ваздух унутар кертриџа. Затим, кертриџ са графенским мастилом се поставља у главу штампача на место предвиђено за монтирање кертриџа са црном бојом. Да би штампа била вршена максималним интензитетом једног канала (у овом случају канала за црну боју), коришћена су монохроматска подешавања у софтверским алату. У циљу постизања најбоље резолуције приликом штампања узорака, неопходно је користити софтвер са векторском графиком. Пре самог процеса штампе, кертриџ са мастилом се оставља да стоји неколико минута на собној температури. На тај начин, постиже се изједначавање температуре унутар кертриџа са температуром просторије, с обзиром да се графенско мастило чува на температури до 8 °C.

Први сет узорака је штампан у облику квадрата (10 mm×10 mm) у резолуцији од 2000 dpi и синтерован на температури од 100 °C 30 минута (слика 1). Димензије тих узорака одговарају димензијама РСВ (printed circuit board) држача узорака Escoria система.



Слика 1. Одштампани графенски узорци од 12 слојева на флексибилној ПЕТ подлози.

Дебљина првог сета узорака износи  $\sim 750$  nm. Узорци са 7 одштампаних слојева, имају дебљину од  $\sim 300$  nm. Три одштампане линије са различитим бројем слојева (други сет узорака) приказане су на слици 2. Као што се види, узорци су униформни и показују одличну компатибилност са ПЕТ подлогом. Приметна је и промена боје узорака од светлије нијансе плаве до тамно плаве (услед промене оптичке транспарентности) са сваком додатно одштампаним слојем.



Слика 2. Одштампане графенске линије  $20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  на ПЕТ подлози са: а) 2 слоја, б) 7 слојева, ц) 12 слојева.

Табела 1. Вредности отпорности одштампаних графенских линија ( $20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ) за више слојева.

Број слојева	Отпорност
2	155 k $\Omega$
7	1.81 k $\Omega$
12	220 $\Omega$

Промена отпорности линије ( $20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ) одштампане у неколико слојева приказана је у табели 1. Очигледно је да отпорност линија опада са порастом броја одштампаних слојева, с обзиром да је отпорност узорака обрнуто пропорционална њиховој дебљини. Такође, из табеле се види да је за постизање веће проводности графенских узорака неопходна вишеслојна штампа.

### Електрична карактеризација узорака

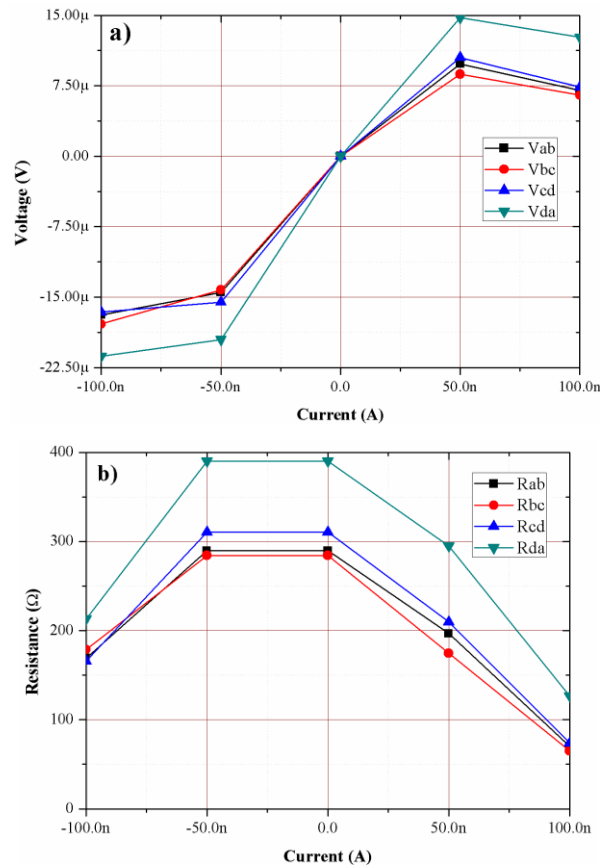
Електричне карактеристике одштампаних узорака извршене су уређајем за мерење Холовог ефекта Есориа HMS-3000. Овај уређај омогућава високу тачност и поновљивост мерења. Са држачима узорака, базираним на квадратном облику и Ван дер Пауовом техником, приступа се тестирању различитих типова узорака. Транспортни параметри на температури од 300 K дати су као напонско-струјна ( $V-I$ ) и отпорничко-струјна ( $R-I$ ) зависност између крајева узорака квадратног облика. Омски контакти су смештени на самим угловима и уз сам руб узорака.

У табели 2 су приказани резултати мерења електричних параметара. Покретљивост носилаца узорака са 12 одштампаних слојева износи  $2330\text{ cm}^2/\text{Vs}$ . То је и даље мање од  $200,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$  колико је добијено у (К. Bolotin, К. Sikes, Z. Jiang, М. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, Н.

Stormer, "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene.", *Solid State Communications*, Vol. 146, No. 9, 2008, pp. 351-355), али веће него покретљивост одштампаних узорака у инкџет технологији са 20 % сребрним наночестичним мастилом ( $4.58 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) и 40 % сребрним наночестичним мастилом ( $21.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ), измерено у (A. Menicanin, Lj. Zivanov, G. Stojanovic, N. Samardzic, D. Randjelovic, "Transport Parameters of Inkjet Printed Nanoparticle Silver on Polyimide Substrate Measured at Room and Liquid Nitrogen Temperatures.", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 60, No. 9, 2013, pp. 2963-2967). Специфична отпорност одштампаних графенских узорака износи  $2.57 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ , док је проводност  $389.11 \text{ 1}/\Omega\text{cm}$ . У раду (E. Secor, P. Prabhurashi, K. Puntambekar, M. Geier, M. Hersam, "Inkjet printing of high conductivity, flexible graphene patterns", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 4, No. 8, 2013, pp. 1347-1351), измерена проводност линија са 10 одштампаних слојева износи  $2.5 \times 10^4 \pm 0.2 \times 10^4 \text{ S/m}$   $\approx 250 \text{ S/cm}$ , што је упоредиво са проводношћу измереном у овом техничком решењу.

**Табела 2.** Просечне измерене вредности Холових параметара одштампаних графенских узорака у 12 слојева за четири различита узорка.

Електрични параметри	Вредности
Запреминска концентрација ( $1/\text{cm}^3$ )	$1.05 \times 10^{18}$
Покретљивост ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$2.33 \times 10^3$
Средњи Холов коефицијент ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )	5.97
Специфична отпорност ( $\Omega\text{cm}$ )	$2.57 \times 10^{-3}$
Специфична проводност ( $1/\Omega\text{cm}$ )	389.11
Површинска концентрација ( $1/\text{cm}^2$ )	$9.41 \times 10^{13}$



Слика 5. Електрична карактеризација графенских узорака одштампаних на ПЕТ подлози. а)  $V-I$  криве. б)  $R-I$  криве.

На слици 5 приказане су  $V-I$  и  $R-I$  криве тестираних узорака. Узорци су побуђивани  $dc$  струјом у опсегу од  $-100\text{ nA}$  до  $100\text{ nA}$ .

Представљеном мерном методом омогућена је брза и ефикасна штампа вишеслојних графенских узорака применом јефтиних десктоп штампача цене око 100 долара, а све у циљу мерења електричних параметара графенског мастила.

*Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкџет штампача развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду и Институту за мултидисциплинарна истраживања у Београду, у оквиру текућег пројекта бр. TP-32016 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.*

*Штампано –2015.*



УНИВЕРЗИТЕТ  
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ  
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија  
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централна: 021 485 2000  
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763  
Телефакс: 021 458-133; e-mail: [ftndean@uns.ac.rs](mailto:ftndean@uns.ac.rs)

ИНТЕГРИСАНИ  
СИСТЕМ  
МЕНАДЖМЕНТА  
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: \_\_\_\_\_

Ваш број: \_\_\_\_\_

Датум: 2015-11-26

## ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Новом Саду, на 1. редовној седници одржаној дана 01.10.2015. године, донело је следећу одлуку:

*-непотребно изостављено-*

**Тачка 12.2.9: У циљу верификације новог техничког решења предлажу се рецензенти:**

- Др Владимир Срдић, Технолошки факултет у Новом Саду
- Др Данијела Рађеновић, ИХТМ Универзитет у Београду

## **ИЗРАДА УЗОРАКА НА БАЗИ ГРАФЕНСКОГ МАСТИЛА КОРИШЋЕЊЕМ ДЕСКТОП ИНКЈЕТ ШТАМПАЧА**

Аутори: Чедо Жлебич, Љиљана Живанов, Милица Кисић, Нелу Блаж, Мирјана Дамњановић, Александар Менићанин

*-непотребно изостављено-*

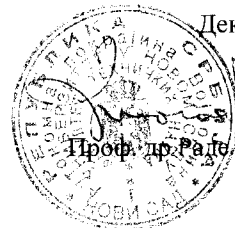
Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:  
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник

Декан



Проф. др. Раде Дорословачки

## РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума  
за писање техничког решења

### Прототип:

Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкџет  
штампача

**Број пројекта:** ТР–32016

**Руководилац пројекта:** проф. др Љиљана Живанов

**Одговорно лице:** Чедо Жлебич

**Аутори:** Чедо Жлебич, Љиљана Живанов, Милица Кисић, Нелу Блаж, Мирјана  
Дамњановић – Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад

Александар Менићанин – Институт за мултидисциплинарна истраживања  
(ИМСИ), Београд

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32016

**Година:** 2015

**Примена:** новембар 2015

**Реализатори:** Факултет техничких наука, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна  
истраживања, Београд

**Корисници:** Факултет техничких наука, Нови Сад

**Подтип решења:** Прототип – М85

### Мишљење рецензента

У приказаном техничком решењу описан је процес израде поновљивих  
вишеслојних структура применом инкџет десктоп штампача са циљем поузданог и  
квалитетног испитивања електричних параметара графенског наночестичног мастила.

Узорци су штампани на флексибилном ПЕТ супстрату и синтеровани на 100 °С  
30 минута. Остварена је одлична компатибилност графенског мастила на ниској  
температури синтеровања.

Профили узорака, на основу АФМ мерења, показују да измерена дебљина 12  
одштампаних слојева износи ~750 nm, док за узорке са 7 одштампаних слојева,  
дебљина износи ~300 nm. Измерена покретљивост носилаца узорака са 12  
одштампаних слојева износи 2330 cm<sup>2</sup>/Vs, док је специфична отпорност узорака  
2.57 × 10<sup>-3</sup> Ωcm, а проводност 389.11 1/Ωcm.

Овим техничким решењем је показано да се коришћењем једноставне опреме може добити значајно средство за испитивање особина вишеслојних узорака одштампаних графенским наночестичним мастилом. С обзиром да су до сада највише испитивани узорци графена добијени поступком ексфолијације, који није погодан за масивну производњу, предложено техничко решење омогућује да се испитају особине једног поступка који има тај потенцијал, због чега је то важно и значајно.

*Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкјет штампача развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду и Институту за мултидисциплинарна истраживања У Београду у оквиру текућег пројекта бр. ТР-32016 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.*

У Новом Саду,  
24.11.2015.

Рецензент:



Др Владимир Срдих

Технолошки факултет, Нови  
Сад



## РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума  
за писање техничког решења

### Прототип:

Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкџет  
штампача

**Број пројекта:** ТР-32016

**Руководилац пројекта:** проф. др Љиљана Живанов

**Одговорно лице:** Чедо Жлебич

**Аутори:** Чедо Жлебич, Љиљана Живанов, Милица Кисић, Нелу Блаж, Мирјана  
Дамњановић – Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад

Александар Менићанин – Институт за мултидисциплинарна истраживања  
(ИМСИ), Београд

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32016

**Година:** 2015

**Примена:** новембар 2015

**Реализатори:** Факултет техничких наука, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна  
истраживања, Београд

**Корисници:** Факултет техничких наука, Нови Сад

**Подтип решења:** Прототип – М85

### Мишљење рецензента

У овом техничком решењу је приказан процес припреме, штампе и мерења електричних параметара узорака на бази графенског мастила. Штампање узорака је извршено десктоп инкџет штампачем на флексибилној ПЕТ подлози. Дебљина одштампаних узорака је утврђена микроскопом атомских сила. Мерење електричних особина графенског мастила извршено је системом за мерење Холовог ефекта.

Отпорност одштампаних линија димензија 20 mm×2 mm за 2 слоја износи 155 kΩ, за 7 слојева 1.81 kΩ и за 12 слојева 220 Ω. Јасно је приказано да је за постизање веће проводности графенских узорака неопходна вишеслојна штампа.

Приказаном методом је могуће на брз и ефикасан начин одштампати узорке потребних димензија како би се системом за мерење Холовог ефекта испитали параметри графенског мастила (запреминска концентрација и покретљивост носилаца,

специфична отпорност и проводност, средњи Холов коефицијент, површинска концентрација).

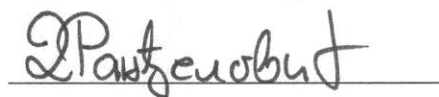
Ово техничко решење показује да је коришћењем јефтине опреме, као што је десктоп штампач Epson Stylus C88+ (чија је цена око 100 долара), могуће добити графенске узорке задовољавајућих карактеристика, што би омогућило израду јефтиних пасивних компоненти и сензора на флексибилним подлогама.

На основу достављеног материјала, у складу са одредбама Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитавном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, који је донео Национални савет за научни и технолошки развој Републике Србије («Службени гласник РС, бр. 38/2008») рецензент оцењује да резултат научноистраживачког рада под називом: **Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкјет штампача** испуњава услове да буде признато као техничко решење категорије Лабораторијски прототип (М85).

*Израда узорака на бази графенског мастила коришћењем десктоп инкјет штампача развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду и Институту за мултидисциплинарна истраживања У Београду у оквиру текућег пројекта бр. ТР-32016 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.*

У Београду,  
24.11.2015.

Рецензент:



Др Данијела Ранђеловић

Центар за микроелектронске  
технологије, Београд



УНИВЕРЗИТЕТ  
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ  
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија  
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централна: 021 485 2000  
Радуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763  
Телефакс: 021 458-133; e-mail: [ftndeap@uns.ac.rs](mailto:ftndeap@uns.ac.rs)

ИНТЕГРИСАН  
СИСТЕМ  
МЕНАџМЕНТА  
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01.сл

Ваш број: \_\_\_\_\_

Датум: 2015-11-26

## ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 5. редовној седници одржаној дана 25.11.2015. године, донело је следећу одлуку:

*-непотребно изостављено-*

### **ТАЧКА 17. Питања научноистраживачког рада и међународне сарадње**

Тачка 17.2.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење под називом:

**17.2.9. Назив техничког решења:**

### **ИЗРАДА УЗОРАКА НА БАЗИ ГРАФЕНСКОГ МАСТИЛА КОРИШЋЕЊЕМ ДЕСКТОП ИНКЏЕТ ШТАМПАЧА**

Аутори: Чедо Жлебич, Љиљана Живанов, Милица Кисић, Нелу Блаж, Мирјана Дамњановић, Александар Менићанин

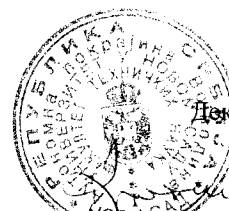
*-непотребно изостављено-*

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:  
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Декан

Проф. др Раде Дорословачки