

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2014/105



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	N5-0002
Naslov projekta	Grafensko-organski supramolekularni funkcionalni kompoziti
Vodja projekta	6617 Gvido Bratina
Tip projekta	N Projekti ESF in ERC
Obseg raziskovalnih ur	3749
Cenovni razred	F
Trajanje projekta	03.2010 - 02.2013
Nosilna raziskovalna organizacija	1540 Univerza v Novi Gorici
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	1 NARAVOSLOVJE 1.02 Fizika
Družbeno-ekonomski cilj	13.01 Naravoslovne vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)
Raziskovalno področje po šifrantu FOS	1 Naravoslovne vede 1.03 Fizika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

2. Povzetek raziskovalnega projekta¹

SLO

Projekt GOSPEL GOSPEL, je preko Agencije za raziskovalno dejavnost Rrepublike Slovenije (ARRS) financiral Evropska znanstvena fundacija v okviru EUROCORES Programa EuroGRAPHENE. V projektu so poleg Laboratorija za fiziko organskih snovi LFOS Univerze v Novi Gorici, sodelovali še CNR, Bologna, Italija, Max Planck Institut, Mainz, Nemčija (MPG), Univerza v Manchestru (MAN), Velika Britanija, Univerza v Monsu, Belgija (UMO) in EMPA, Zürich, Švica. Vloga LFOS v projektu se je osredotočala na izvajanje transportnih meritev v tankih slojih reduciranega grafenskega oksida (rGO) in sorodnih materialnih sistemov (nanografenski trakovi, grafenski koščki na podlogah). V okviru projekta smo v LFOS izvedli vrsto meritev časovne odvisnosti tokov fotovzbujenih nosilcev naboja $I(t)$ na tankih slojih reduciranega grafenskega oksida in potrdili pravilnost hipoteze, ki predvideva povezavo med morfološki značilnostmi slojev in gibljivostjo nosilcev naboja. Sloji rGO, ki so bili pripravljeni na SiO₂ in ki so izkazovali višjo koncentracijo strukturnih napak so imeli nižjo gibljivost nosilcev naboja kot sloji rGO, ki so bili nanešeni na safir ali kvarc.

Jedro projekta so predstavljale meritve $I(t)$ na rGO, ki je bil izpostavljen različnim organskim molekulam, katerih interakcija z rGO je vključevala prenos naboja med molekulo in rGO. Iz merjenj časa preleta elektronov in vrzeli smo ugotovili, da tiste molekule, ki vključujejo znaten prenos elektronov iz rGO na molekulo, se pravi, da se obnašajo kot akceptorji, pomembno vplivajo na transport elektronov (zmanjšujejo njihovo gibljivost). Nasprotno, donorske molekule povzročijo zaviranje vrzeli.

Pomemben dosežek projekta je tudi organizacija mednarodne delavnice na temo grafena z vrsto svetovno znanih znanstvenikov s tega področja v Ajdovščini 8.-11. april 2013.

ANG

project GOSPEL was financed through Slovenian Research Agency (ARRS) by European Science Foundation (ESF) in the framework of EUROCORES program EuroGRAPHENE. Partners collaborating within the GOSPEL project were Laboratory of organic matter physics (LFOS) of the University of Nova Gorica, CNR Bologna, Italy, Max Planck Institut Mainz, Germany (MPG), University of Manchester (MAN), United Kingdom, University of Mons, Belgium (UMO) and EMPA Zürich, Switzerland. The role of LFOS in the project was devoted to the charge transport measurements of thin layers of reduced graphene oxide (rGO) and of other graphene-based materials (graphene nanoribbons, graphene flakes on substrates). Within the project, LFOS performed a series of time dependent time-of-flight photoconductivity measurements of thin rGO layers. The results confirmed the hypothesis that the charge carrier mobility depends on the morphology. rGO layers prepared on SiO₂ substrates with higher structural defects density exhibited lower charge mobility in comparison to the rGO layers deposited on sapphire or quartz.

Time-of-flight Photoconductivity measurements of rGO exposed to variety of organic molecules represented the core of the project. The charge transfer occurred between absorbed molecules and graphene. The corresponding electronic interaction between transferred charge and photogenerated charge carriers influenced the transit time through the rGO layer. In case of acceptor adsorbers, the electron mobility decreased. In case of donors, the hole mobility in rGO decreased.

One of important project achievements was the organization of an international graphene-related workshop. The workshop guested many worldwide-known scientists in Ajdovščina from 8th to 11th of April 2013.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu²

Pričujoče poročilo se nanaša na GOSPEL, ki ga je preko Aгенicije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) financirala Evropska znanstvena fundacija v okviru EUROCORES Programa EuroGRAPHENE. V projektu so poleg Laboratorija za fiziko organskih snovi LFOS) Univerze v Novi Gorici, sodelovali še CNR, Bologna, Italija, Max Planck Institut, Mainz, Nemčija (MPG), Univerza v Manchestru (MAN), Velika Britanija, Univerza v Monsu, Belgija (UMO) in EMPA, Zürich, Švica. Vloga MPG je bila v sintezi novih funkcionaliziranih nanografskih delcev (NG) in karakterizaciji njihove samoorganizacije na površinah na nanoskali. CNR je izdelal različne stabilne raztopine NG z organskimi polprevodniki, kjer so izkoriščali kovalentno ali supramolekularno funkcionalizacijo grafena v vodi ali v organskih topilih. Po opravljeni karakterizaciji z elektronsko mikroskopijo in rentgenskim uklonom so raztopine poslali na EMPA in v LFOS. EMPA je opravil električno karakterizacijo na nanoskali z uporabo tunelskega mikroskopa. LFOS pa je bil zadolžen za karakterizacijo transporta električnega naboja v tankih slojih grafensko-organskih hibridnih (GOH) materialov. Eksperimentalne podatke je UMO uporabil za numerično modeliranje zlasti interakcij med organskimi molekulami in grafenom.

V okviru projekta smo izkoriščali prirojene lastnosti NG za izdelavo novih GOH materialov. NG smo uporabljali za izdelava grafena kakor surfaktatne in s tem omogočili luščenje grafita v vodni raztopini v smeri z vrha navzdol ali pa kot osnovne gradnike, s katerimi smo sestavljali NG v večje grafenske strukture, kot so na primer nanotrakovi. Del projekta, ki ga je izvajal LFOS se je osredotočal na učinke organskih molekul na električni transport v reduciranem grafenskem oksidu (rGO). Osnovna hipoteza je predpostavila, da organske molekule, ki se obnašajo kot akceptorji učinkujejo na transport elektronov v rGO, organske molekule, katerih obnašanje je donorsko, pa učinkujejo na transport vrzeli. Električna karakterizacija zmanjšane plasti grafena oksida (rGO) kaže ambipolarno vedenje podobno kot mehansko (exfoliated) plastoviti grafen, čeprav z zmerno uspešnostjo. Zaradi prisotnosti funkcionalnosti kisika, karbonili (carbonyls), epoksidne smole in lukenj, je gibanje nabojev v rGO kompleksen proces, ki lahko vključuje gibanje na razširjenih stanjih grafena, poskakovanja (hopping) ali perkolacijo, kar povzroči tri velikostne rede nižjo prevodnost od prevodnosti plastovitega enoplastnega grafena. Ko je rGO izpostavljen ustreznim organskim molekulam, kaže znaten učinek na lastnosti gibanja nabojev. rGO smo dobili iz CNR, kjer so ga izdelali v treh korakih. 1. Oksidacija grafita po Hummersovi metodi, ki vključuje natrijev permanganat in žvepleno kislino, ki povzroči začetek oksidacije na mestih kristalografskih napak v grafitnih slojih, kar privede do funkcionalizacije grafitnih slojev s kisikovimi atomi. 2. Luščenje grafita je posledica slabitve van der Waalsovih sil med grafitnimi sloji, kar je posledica funkcionalizacije s kisikom. V vodni raztopini je tako luščenje olajšano in privede do suspenzije grafitnega oksida, ki jo izpostavimo ultrazvočnemu valovanju, ki odstrani debelejša koščke grafita. Dovolj visoka moč ultrazvočnega valovanja je pri tem ključna pri določanju velikosti koščko oksidiranega grafena. 3. Redukcija grafitnega oksida ponovno vzpostavi

heksagonalno kristalno mrežo v grafenskih koščkih. Ta faza poteka ali z visokotemperaturnim popuščanjem ali s primernimi kemijskimi reakcijami, npr. v parahidrazina. Tako pripravljene suspenzije rGO lahko s spinskim nanašanjem pripravimo v obliki tankih slojev na primernih podlogah.

V našem primeru je CNR pripravil rGO na kvarcu, safirju in SiO₂ na siliciju. Ti vzorci so predstavljali osnovne podloge na katerih smo preučevali transport električnega naboja in učinek organskih molekul nanj. Osnovna metoda, ki smo jo uporabljali je vključevala merjenje časa preleta nosilcev naboja v električnem polju. Nosilce smo kreirali s svetlobnimi bliski pulznega laserja (trajanje pulza 3 ns) EKSPALA NdYAG smo preko safirnega okna preusmerili v dušikovo komoro, kjer smo namestili postajo za merjenje tokovnonapetostnih karakteristik. Ta sestoji iz dveh mikromanipulatorskih igel SELTEK Ltd. Tokove fotovzbujenih nosilcev zajemamo preko tokovnega ojačevalca Hamamatsu iz katerega vodimo signal v osciloskop LeCroy WavePro 725Zi. Meritev poteka tako, da ob laserskem blisku sprožimo zajemanje podatkov v osciloskopu. Čas trajanja ene meritve je nastavljen na 100 ns. Meritev se zaključuje po določenem številu laserskih bliskov. Valovno dolžino bliskov lahko izbiramo v območju med 200 nm in 1200 nm. Čas preleta določimo iz oblike krivulje $I(t)$ in sicer na mestu, ko se odvod znatno spremeni.

Na tanke sloje rGO smo z vakuumskim naprejanjem nanесли pare Al elektrod, ki so bile razmaknjene za 800 μm . Na eno elektrodo smo pritisnili električno napetost, drugo pa smo preko primerne upora priključili na ničelni potencial. V primeru, ko je bila nabita elektroda na negativnem potencialu je krivulja $I(t)$ vsebovala tok elektronov, v nasprotnem primeru pa tok vrzeli. Vse meritve smo povezali z meritvami morfologije površine, ki smo jih opravili z mikroskopom na atomsko silo (atomic force microscope - AFM). Ugotovili smo, da je rGO prevaja oba tipa nosilcev naboja: elektrone in vrzeli, vendar je čas preleta za vrzeli nekoliko daljši od časa preleta elektronov, kar kaže na njihovo manjšo gibljivost. Ugotovili smo tudi, da je gibljivost nosilcev na rGO, ki je nanosen na SiO₂ znatno nižja od gibljivosti nosilcev v rGO, ki je nanosen na safir ali kvarc. Preiskave z AFM so pokazale, da ima rGO na SiO₂ znatno višjo stopnjo napak v obliki gub in nepovezanih grafenskih domen kot tisti na ostalih dveh podlogah, kar je vzrok za izmerjene razlike v gibljivosti nosilcev naboja.

Po opravljeni karakterizaciji slojev rGO smo začeli z raziskavami učinka adsorbiranih molekul na gibljivost nosilcev naboja. Skupno vsem eksperimentom je bilo to, da smo kot podloge uporabili rGO nanosen na SiO₂. Kljub slabši gibljivosti nosilcev naboja na tovrstnih podlogah, smo se zanje odločili zaradi skladnosti z večino že objavljenih raziskav, povezanih s študijem delovanja organskih tankoslojnih tranzistorjev, ki vse vključujejo organske sloje nanosene na SiO₂, zraščene na visokodopiranem siliciju. Organske molekule smo izbirali s stališča količine prenesenega naboja med molekulo in grafenom. Te podatke so nam priskrbeli sodelavci UMO oziroma smo jih pridobili iz literature. Molekule smo nanašali s spinskim nanašanjem na rGO, topila za pripravo raztopin pa smo izbrali glede na topnost posamezne molekule. Vsak material smo preverili na dva načina: z merjenjem časa preleta nosilcev naboja in z merjenjem prenosnih karakteristik tranzistorjev, ki smo jih izdelali na rGO in izpostavili raztopini. Prenosna karakteristika čistega rGO izkazuje značilno skoraj parabolično funkcijo z minimumom pri napetosti vrat (V_g) enaki nič, kar običajno onamočimo z Diracovo napetostjo (V_d). Z dodajanjem organskih molekul na površino rGO smo zaznali premikanje minimuma prenosne karakteristike proti pozitivnim, oziroma negativnim V_g , pač glede na to ali so imele adsorbirane molekule akceptorski ali donorski značaj. Krivulje $I(t)$ so, glede na $I(t)$ izmerjeno na čistem rGO izkazovale krajše oziroma daljše čase preleta. Pri tem smo ugotovili, da je občutljivost naše metode merjenja časa preleta fotovzbujenih nosilcev naboja izjemno visoka, saj smo pri nekaterih molekulah zaznali spremembe v času preleta že pri prekritjih, niso presegala 0,08% vse površine rGO. Povzetek rezultatov vseh molekul je prikazan v spodnji tabeli.

Adorbirana molekula	Učinek na V_d	gibljivost	gibljivost	gibljivost
vrzeli	elektronov	iz $I(t)$		

1-pyrene butyric acid	premik na+	manjša	manjša	manjša za e-
(PBA)				

1-pyrene sulfonic acid	premik na+	manjša	enaka	manjša za e-
sodium salt (PSAN)				

Tetrathiafulvalene	premik na-	večja	manjša	manjša za h+
(TTF)				

Tetracyanoethylene	premik na+	manjša	večja	manjša za h+
(TCNE)				

F4-TCNQ	premik na+	manjša	večja	manjša za e-

4. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev³

V tem poročilu se bomo omejili na vlogo LFOS kot partnerja v projektu. Naša naloga v konzorciju je bila postaviti merilni sistem, ki bo omogočal karakterizacijo transportnih lastnosti slojev iz GOH in izvedbo karakterizacije transporta električnega naboja v sistemih, ki bodo vsebovali GOH. V tem oziru smo popolnoma izpolnili načrte. Naša predvidevanja glede občutljivost metode merjenja časa preleta fotovzbujenih nosilcev naboja so se pokazala kot prekonzervativna. Ugotovili smo, da lahko zaznamo učinke adsorbiranih organskih molekul na transport električnega naboja v slojih rGO že pri prekritjih 0,08% celotne površine vzorca.

Ugotovili smo tudi, je hipoteza, ki predvideva povezavo med količino prenesenega naboja med organsko molekulo in rGO in učinkom na transport električnega naboja pravilna. Tako se je pokazalo, na podlagi meritev $I(t)$, da molekule tetracyanoetilen (TCNE) povzročijo močan prenos električnega naboja iz grafena na molekulo. Posledica tega je

pojav pozitivno nabitih pasti na mejni plasti, ki drastično znižajo gibljivost elektronov. Nasprotno, pa se zaradi tega gibljivost vrzeli v rGO poveča

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁴

V teku projekta ni bilo sprememb v načrtovanih aktivnostih.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

	Znanstveni dosežek		
1.	COBISS ID	2731515	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Vlipo mikrostrukture v trdni snovi na elektronsko delovanje 5,11-Bis (triethylsilylethynyl) anthradithiophene
		ANG	Influence of solid-state microstructure on the electronic performance of 5,11-Bis(triethylsilylethynyl) anthradithiophene
	Opis	SLO	Preučevali smo električni transport v 5,11-bis(triethylsilylethynyl) anthradithiophene (TES ADT). TES ADT je eden od najprespektivnejših organskih polprevodnikov, saj je dobro topljiv v organskih topilih. Zaradi tega poteka priprava polprevodnih slojev pri relativno nizkih temperaturah pod 100°C, kar predstavlja tehnološko prednost pred ostalimi polprevodniki. Študija je pokazala, da TES ADT tvori štiri različne polimorfe z izredno različnimi električnimi lastnostmi. Slednjo lastnost, kot smo pokazali, lahko uporabimo za izdelavo organskih tankoslojnih tranzistorjev.
		ANG	We have been investigating electric transport properties of 5,11-bis (triethylsilylethynyl) anthradithiophene (TES ADT). TES ADT is one of the most promising, solution-processable small-molecular organic semiconductors – was analyzed, revealing the highest performing polymorph among four solid-state phases, opening pathways toward the reliable fabrication of high-performance bottom-gate/bottom-contact transistors.
	Objavljeno v	The Society; Chemistry of materials; 2013; Vol. 25, no. 9; str. 1823-1828; Impact Factor: 8.238; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.402; A'': 1; A': 1; WoS: EI, PM; Avtorji / Authors: Yu Liyang, Pavlica Egon, Bratina Gvido	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
2.	COBISS ID	2734075	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Modulacija transporta naboja v reduciranem grafenskem oksidu s fizisorpcijo organskih pigmentov
		ANG	Modulation of charge transport properties of reduced graphene oxide by submonolayer physisorption of an organic dye
	Opis	SLO	Ugotovili smo, da organska molekula 1-pirenske butrične kisline (PBA) na reduciranem grafenskem oksidu tvori pasti za elektrone. Kvantni izračuni so pokazali, da je tvorba pasti posledica interakcije med PBA in grafenom. Prosta elektronska stanja PBA se ob stiku razširijo v grafen. Z opazovanjem časovne odvisnosti tokov fotovzbujenih nosilcev naboja smo ugotovili, da že ekstremno majhna količina PBA, ko je pokrito 0.08% površine grafena, povzroči zaznavno spremembo v gibljivosti elektronov.
		ANG	We have examined the effect of submonolayer coverage of 1-pyrene butyric acid on charge carrier transport in reduced graphene oxide. We have modeled the interaction of 1-pyrene butyric acid molecules with graphene and determined the amount of charge transfer at the interface between the two materials. The effect of 1-pyrene butyric acid as electron acceptor was determined by transfer characteristics measurements on thin film transistors for thick layers. By using time-resolved photocurrent

		measurements we were able to detect a reduction of electron mobility in reduced graphene oxide for coverage as low as 0.08%.
	Objavljeno v	Elsevier;North-Holland; Organic electronics; 2013; Vol. 14, no. 7; str. 1787-1792; Impact Factor: 3.836;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.402; A': 1; WoS: PM, UB; Avtorji / Authors: Pathipati Srinivaso Rao, Pavlica Egon, Bratina Gvido
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	2495227 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Giblјivost nosilcev naboja v krajevno odvisnem električnem polju določena z merjenjem časa preleta.
		<i>ANG</i> Time-of-flight mobility of charge carriers in position-dependent electric field between coplanar electrodes
	Opis	<i>SLO</i> Meritev časovne odvisnosti toka fotovzbujenih nosilcev po metodi preleta (TOF) omogoča opazovanje gibljivosti nosilcev naboja v tankih slojih organskih polprevodnikov. Primerjali smo TOF meritev v polprevodnem polimeru z Monte Carlo simulacijami TOF meritev. V simulacijah smo uporabili krajevno neodvisno in krajevno odvisno električno polje. Pokazali smo, da se meritev ujema z krajevno odvisnim električnim poljem med elektrodama. Demonstrirali smo, da pri krajevno neodvisnem električnem polju podcenimo gibljivost tudi za dva reda velikosti v primerjavi z krajevno odvisnim električnim polje.
		<i>ANG</i> Time-of-flight measurements (TOF) of the photocurrent in thin organic semiconductor layers represent an effective way to extract charge carrier mobility. We compared time-dependence of the photocurrent, measured in the samples comprising thin layers of poly-3-hexylthiophene, with the Monte Carlo simulations. In the simulations, we have used both, a position-independent and a position-dependent electric field. We obtained a favorable agreement between the simulations and the measurements only in the case of position-dependent electric field. We demonstrate that the charge carrier mobility may be underestimated by more than one order of magnitude, if a position-independent electric field is used in the calculations of the mobility.
	Objavljeno v	American Institute of Physics.; Applied physics letters; 2012; Vol. 101, no. 9; str. 093304-1-093304-5; Impact Factor: 3.794;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.629; A': 1; WoS: UB; Avtorji / Authors: Pavlica Egon, Bratina Gvido
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek

7.Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁶

	Družbeno-ekonomski dosežek	
1.	COBISS ID	Vir: vpis v poročilo
	Naslov	<i>SLO</i> Grapheska delavnica, od osnovnih lastnosti do aplikacij
		<i>ANG</i> Graphene workshp, from fundamental properties to applications
	Opis	<i>SLO</i> Mednarodna delavnica, Ajdovščina 8.-11. april 2013. Cilj delavnice je bil zbrati mlade znanstvenike, ki se ukvarjajo z grafenom. Poleg predavanj so udeleženci prisostvovali praktičnim vajam s področja modeliranja, merjenja transportnih lastnosti in merjenja strukture grafenskih slojev.
		<i>ANG</i> Ajdovščina, Slovenia – from 8th to 11th of April 2013. The aim of the workshop was to attract young researchers to the field of graphene. In addition to lectures, the workshop programme included "hands-on" sessions, where participants had the opportunity to practice on real

		experiments
Šifra	B.01	Organizator znanstvenega srečanja
Objavljeno v	zbornik	
Tipologija	2.30	Zbornik strokovnih ali nerecenziranih znanstvenih prispevkov na konferenci

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁷

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti⁹

SLO

Projekt GOSPEL predstavlja mejnik v prizadevanjih, da bi premaknili detekcijsko limito pri zaznavanju učinkov dopantov na transportne lastnosti grafenskih slojev. V članku v reviji Organic electronics [COBISS.SI-ID 2734075], smo objavili naše raziskave o učinku 1-pyrene butyric acid (PBA) na transport elektronov v reduciranem grafenskem oksidu (rGO). V povezavi s teoretskimi izračuni, ki so jih opravili v UMO in ki kažejo da je pri interakciji med molekulo PBA in grafenom prisoten le šibak prenos električnega naboja (le 0.06 e/dimer, kjer je e osnovni naboj), smo ugotovili, da je učinek na transport naboja znaten. To smo ugotovili pri analizi meritev časovne odvisnosti tokov fotovzbujenih nosilcev naboja $I(t)$. Kot smo pokazali v članku v reviji Applied Physics Letters COBISS.SI-ID 2495227] krivulje $I(t)$, ki jih posnamemo v koplanarni konfiguraciji elektrod, izkazujejo čas preleta 10% najhitrejših nosilcev naboja. Ti nosilci so izjemno občutljivi na porazdelitev energijskih pasti v sloju, ki ga preiskujemo.

Z nanašanjem submolekularnih plasti organskih polprevodnikov, ki vključujejo prenos naboja med molekulo in grafenom, pride do tvorbe plitvih plasti (nekaj desetink eV pod najnižjo prosto orbitalo), ki imobilizirajo nosilce naboja za čas, ki je primerljiv z dolžino meritve. Ta stanja so najlažje dosegljiva za najhitrejšje elektrone, katerih delež je sicer majhen, vendar zaradi svoje hitrosti pomembno vplivajo na obnašanje krivulje $I(t)$ v njenem sklepnem delu. V kolikor se ti elektroni zadržijo v plitvih pasteh, se točke v $I(t)$, ki označujejo čas preleta premaknejo proti daljšim časom.

Na ta način smo lahko zaznali učinke dopantov na transportne lastnosti rGO pri površinskih koncentracijah PBA, ki niso presegale 0,08 % celotne površine vzorca.

ANG

The GOSPEL project represents a milestone in the attempt to improve the detection limit of the dopant effects on the charge transport in graphene layers. We published our research on effects of the 1-pyrene butyric acid (PBA) on the charge transport in reduced graphene oxide (rGO) in the scientific article in Organic electronics [COBISS.SI-ID 2734075]. Our results were compared to theoretical calculations, which were performed at UMO. These calculations indicated that the interaction between PBA molecule and graphene results in a reduced charge transfer (only 0.06 e/dimer, e is unit of charge). However the PBA adsorption on rGO exhibits a significant change of charge transport properties. We discovered this fact by analyzing the time dependence of time-of-flight photoconductivity (TOF) current $I(t)$. Analysis is strongly connected to our findings, published in Applied Physics Letters [COBISS.SI-ID 2495227], where we present the model of TOF $I(t)$ time dependence. That is the $I(t)$ curve, obtained by TOF measurements between coplanar electrodes, reflects the transit time of the 10% of the fastest carriers. These carriers are extremely sensitive to the distribution of charge traps in the examined layer. When graphene is coated with a submonolayer of organic molecules, which cause charge transfer, the shallow trap levels are formed in graphene (few tenths of eV below the lowest free orbital). Therefore, charge carriers in graphene are trapped in these shallow traps. Trapping time is comparable to the time of the measurement. These shallow trap levels are populated with the first photogenerated carriers that drift through graphene. Although the amount of the fastest

carriers is low, their change of average velocity significantly change the shape of $I(t)$ curve. In the presence of shallow trap levels, $I(t)$ signature of transit time is observed to shift to longer times. As this is extremely sensitive to the density of trapping levels, we were able to detect the effect of doped molecules at the coverage as low as 0.08% of graphene surface. This achievement represents by far the most sensitive detection of adsorbed molecules.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Projekt GOSPEL je bil ob svojem zagonu prvi projekt, ki ga je financirala Evropska znanstvena fundacija in je v konzorciju vključeval slovenskega partnerja. Obenem je to tudi eden redkih projektov v Sloveniji, ki se osredotoča na raziskave transportnih lastnosti grafena oziroma grafenskih materialov.

V okviru projekta je Laboratorij za fiziko organskih snovi (LFOS) lahko financiral usposabljanje enega doktorskega študenta, ki bo v maju 2014 predvidoma zaključil delo na doktorski disertaciji. S projektom smo lahko navezali tesne stike s pomembnimi raziskovalnimi laboratoriji po Evropi, ki se ukvarjajo z grafenom. Zlasti pomembna je povezava s skupino Prof. dr. Klaus Mülle na Max Planck Institut Mainz, Nemčija, ki je eden od vodilnih laboratorijev za sintezo sodobnih organskih polprevodniških molekul in grafenskih materialov.

Zelo pomembna za prepoznavnost Slovenije kot države, ki se osredotoča na vrhunske znanstvene raziskave na področju sodobnih materialov je bila tudi organizacija mednarodne delavnice 8.-11. april na temo grafena, ki je vključevala znanstvenike iz tako prestižnih institucij kot so CNR Bologna, Italija, ICM Madrid, Španija, Univerza Chalmers, Švedska, Texas Instruments Incorporated, ZDA.

ANG

The GOSPEL project was financed by the European Science Foundation (ESF). At its launch, the GOSPEL project was the first one ESF financed. The consortium of GOSPEL project comprised also a Slovenian partner. More, GOSPEL was one of only few projects in Slovenia, which were focused to the graphene materials.

In the framework of GOSPEL project, the Laboratory of Organic Matter Physics (LFOS) was able to finance one doctoral student, who will defend his doctoral dissertation in the May of 2014. Collaborating with the partners in the project, we made strong connections to the most prominent research laboratories of Europe, which are focused on the graphene research. Among them, we would like to stress the connection with Prof. dr. Klaus Mülle from the Max Planck Institut Mainz, Germany, which is one of the leading laboratories for the synthesis of organic semiconducting molecules and graphene materials.

The Slovenian participation in GOSPEL undoubtedly promoted Slovenia as an advanced research focused country in the field of novel materials. Such promotion was achieved by organizing an international graphene workshop. The workshop took place in Ajdovščina from 8th to 11th of April 2013. The workshop was a successful and hosted the scientists from the most prominent worldwide institutions including CNR Bologna (Italy), ICM Madrid (Spain), Chalmers University (Sweden), and Texas Instruments Incorporated (USA).

10. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE

	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

Komentar

--

11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!
Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☐	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☐	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☐	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☐	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☐	☐	☐	☐	
G.02.07.	Večji delež izvoza	☐	☐	☐	☐	
G.02.08.	Povečanje dobička	☐	☐	☐	☐	
G.02.09.	Nova delovna mesta	☐	☐	☐	☐	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	☐	☐	☐	☐	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	☐	☐	☐	☐	
G.02.12.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	☐	☐	☐	☐	
G.03.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	☐	☐	☐	☐	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	☐	☐	☐	☐	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	☐	☐	☐	☐	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	☐	☐	☐	☐	
G.04.06.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	☐	☐	☐	☐	
	Varovanje okolja in trajnostni					

G.06.	razvoj	☐	☐	☐	☐	
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	☐	☐	☐	☐	
G.09.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	

Komentar

--

12.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹¹

	Sofinancer			
1.	Naziv			
	Naslov			
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		EUR	
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		%	
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja		Šifra	
		1.		
		2.		
		3.		
		4.		
		5.		
Komentar				
Ocena				

13.Izjemni dosežek v letu 2013¹²**13.1. Izjemni znanstveni dosežek**

--

13.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

--

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 ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS

- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Univerza v Novi Gorici

Gvido Bratina

ŽIG

Kraj in datum:

Nova Gorica	8.4.2014
-------------	----------

Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2014/105

¹ Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁴ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) 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](#)

⁶ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) 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 projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

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

⁹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Rubrike izpolnite / prepišite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.rrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

¹² Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2013 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). 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 priponko/-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-RPROJ-ZP/2014 v1.03

B6-7E-9D-4B-A2-7D-6B-D4-C2-54-F6-9C-95-0B-86-E5-E1-C6-36-E8