

Technológia InkJet Printing – 2. časť

Používané materiály

Z dôvodu neustálej miniaturizácie elektronických obvodov, ako aj samotných elektronických zariadení, je čoraz väčší dopyt po flexibilnej elektronike. V závislosti od fyzikálnych faktorov, ako sú prevádzková teplota, frekvencia alebo mechanická pevnosť, sa najčastejšie používajú v oblasti organickej elektroniky na účely substrátu napr. polyimidové alebo polyesterové fólie, príp. tkané alebo netkané sklenené textílie apod. [1].

Substráty používané v InkJet Printing technológii sú prevažne na báze organických polymérov. Polyméry sa používajú v elektronike ako izolačný materiál (napr. vo forme fólií), zalievacia hmota, odporový materiál a prechodové dielektrikum viac ako 40 rokov. Vysoký elektrický odpor a dobré mechanické vlastnosti polymérov robia tento materiál užitočným ako pasívny materiál pre elektroniku.

Medzi najčastejšie používané polyméry, z ktorých sa vyrábajú fólie (substráty) pre elektroniku patria najmä [2]:

- polyetylén,
- polypropylén,
- polyvinylchlorid (PVC),
- polystyrén,
- polyamid,
- polyester,
- polyimid.

Z dôvodu, že ku spekaniu nanočastíc kovov dochádza približne pri teplote 200 °C, je nutné nanosený atrament na substrát podrobiť tepelnému procesu. Z tohto dôvodu je možné použiť len tie polymérne fólie, ktoré majú vyššiu tepelnú odolnosť, než je teplota spekania použitého atramentu. Polyetylén, polypropylén, PVC a polystyrén majú tepelnú odolnosť nižšiu než 200 °C, čím v prípade tepelného spôsobu spekania prechádzajú do stavu viskózne pseudoplastické kvapaliny. Na účely použitia technológie InkJet Printing vyhovujú ako substráty aj lacnejšie polymérne fólie, ktoré znesú vyššiu teplotu hoci len krátkodobo, počas

procesu spekania nanočastíc, príp. v procese spájkovania.

Tento problém je možné eliminovať použitím atramentu, na ktorý je možné aplikovať iný spôsob spekania než tepelný. Komerčne dostupné atramenty na báze striebra však vyžadujú podmienky spekania založené na tepelnom spôsobe, zvyčajne pri teplote 200 °C na



Obr. 1 UWB anténa vyrobená technológiou InkJet Printing na polyimidovom substráte Kapton® HN [4].

Ing. Peter Lukács
prof. Ing. Alena Pietriková, CSc.
FEI
Technická univerzita v Košiciach

30–60 min. Z tohto dôvodu sa na účely substrátu v technológii InkJet Printing používajú polymérne materiály polyimid a polyester.

Okrem polymérnych substrátov sa v technológii InkJet Printing používajú aj substráty na báze impregnovaného papiera, ktoré sú hlavnými predstaviteľmi tzv. „jednorazovej“ elektroniky. Ich výhodou je najmä nízka cena a možnosť úpravy ich vlastností pomocou vyplnenia pórov špeciálnym materiálom.

Medzi základné požiadavky na polymérne substráty používané v technológii InkJet Printing patria:

- nízka teplota spekania, flexibilita a vhodné mechanické vlastnosti,
- malá drsnosť povrchu a optimálna zrnitosť substrátu,
- odolnosť proti teplotnému namáhaniu a v tej súvislosti nízky koeficient tepelnej rozťažnosti,

Tabuľka 1 Vybrané fyzikálne a elektrické parametre fólie DuPont™ Kapton® HN I31

Vlastnosť	25 µm	50 µm	75 µm	125 µm
Modul pružnosti v ťahu pri 23 °C [GPa]	2,5	2,5	2,5	2,5
Modul pružnosti v ťahu pri 200 °C [GPa]	2,0	2,0	2,0	2,0
Medza pevnosti v ťahu pri 23 °C [MPa]	231	231	231	231
Medza pevnosti v ťahu pri 200 °C [MPa]	139	139	139	139
Hustota [g/cm ³]	1,42	1,42	1,42	1,42
Zmrštenie pri 150 °C – 30 min [%]	0,17			
Zmrštenie pri 400 °C – 120 min [%]	1,25			
Koeficient tepelnej rozťažnosti [ppm/°C]	20			
Maximálne predĺženie pri 23 °C [%]	72	82	82	82
Maximálne predĺženie pri 200 °C [%]	83	83	83	83
Dielektrická pevnosť [kV/mm]	303	240	205	154
Relatívna permitivita pri 1 kHz	3,4	3,4	3,5	3,5
Stratový činiteľ pri 1 kHz	0,0018	0,0020	0,0020	0,0026
Objemový odpor [Ω/cm]	1,5·10 ¹⁷	1,5·10 ¹⁷	1,4·10 ¹⁷	1,0·10 ¹⁷

– nízka cena, resp. dostupnosť pre výrobcov.

Substráty používané v technológii InkJet Printing

1) Polyimid

Medzi najčastejšie používaný polymérny substrát používaný v technológii InkJet Printing patrí polyimidový substrát DuPont™ Kapton® HN vďaka svojim výhodným fyzikálnym a elektrickým vlastnostiam, ktoré sú uvedené v *tabuľke 1* [3].

Polyimidový substrát Kapton® je syntetizovaný polymerizáciou aromatického dianhydridu a aromatického diamínu. Má vynikajúcu teplotnú stabilitu, odolnosť proti rozpúšťadlám a adhéziu. Kapton® sa používa taktiež na výrobu filmov potiahnutých vodivou medenou fóliou, ktoré majú obchodné označenie Pyralux® [3].

Kapton® HN je univerzálna polyimidová fólia, ktorá sa vyznačuje výbornou tepelnou stabilitou v rozmedzí od –269 až do 400 °C. Kapton® HN môže byť laminovaný, metalizovaný, formovaný alebo potiahnutý lepidlom [3]. Nevýhodou polyimidovej fólie je jej vysoká cena, ktorá zohráva často dôležitú úlohu pri výbere vhodného substrátu. Lacnejší variant predstavujú polymérne substráty PET a PEN.

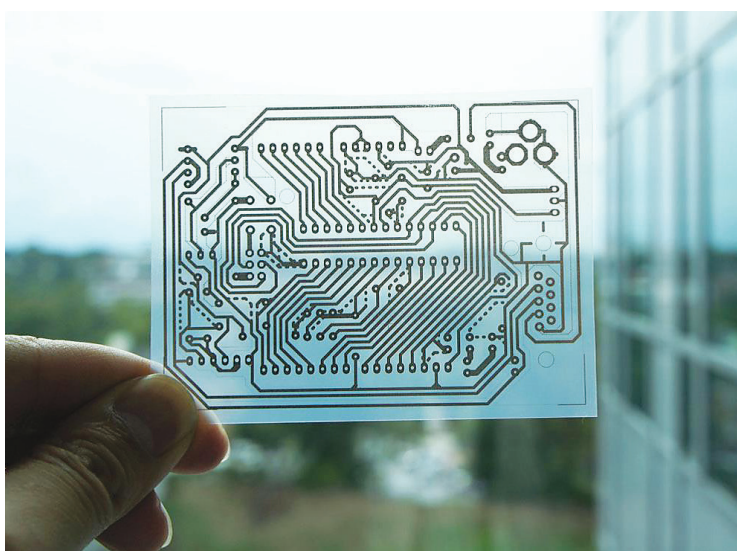
Obr. 1 znázorňuje UWB anténu vyrobenú technológiou InkJet Printing na polyimidovom substráte Kapton® HN 200 hrúbky 50,8 μm [4].

2) Polyester

Polyesterová fólia Mylar® sa často používa ako substrát v oblasti flexibilnej elektroniky vďaka svojim výhodným mechanickým,

elektrickým a teplotným vlastnostiam. PET fólia Mylar® ponúka výhodné fyzikálne vlastnosti v širokom teplotnom rozsahu od –70 po 150 °C, pričom pri krátkodobej teplotnej záťaži od –250 až po 200 °C a viac, v závislosti od konkrétneho typu fólie. Vybrané fyzikálne a elektrické parametre PET fólie Mylar® sú uvedené v *tabuľke 2* [5].

Hlavnou výhodou PET fólie Mylar® je jej priehľadnosť, vďaka čomu sa najčastejšie používa pre aplikácie, kde sa vyžaduje priehľadnosť substrátu, napr. výroba displejov. Príklad použitia PET fólie Mylar®, na ktorý je nanosený motív technológiou InkJet Printing, je znázornený na *obr. 2* [6].



Obr. 2 Príklad použitia PET fólie Mylar® [6].

Tabuľka 2
Vybrané fyzikálne a elektrické parametre PET fólie Mylar® [5]

Vlastnosť	Hodnota
Drsnosť povrchu R_s [nm]	38
Hustota [g/cm ³]	1,39
Viskozita	0,56
Teplota tavenia [°C]	254
Koeficient tepelnej rozťažnosti [cm/cm/°C]	$43,18 \cdot 10^{-6}$
Relatívna permitivita pri 25 °C a 1 MHz	3,0
Relatívna permitivita pri 25 °C a 1 GHz	2,8
Stratový činiteľ pri 25 °C a 1 MHz	0,016
Stratový činiteľ pri 25 °C a 1 GHz	0,008
Povrchový odpor pri 23 °C a 30 % relatívnej vlhkosti [Ω/□]	10^{16}
Povrchový odpor pri 23 °C a 80 % relatívnej vlhkosti [Ω/□]	10^{12}
Objemový odpor pri 25 °C [Ω/cm]	10^{18}
Objemový odpor pri 150 °C [Ω/cm]	10^{13}

3) Papierové substráty

Papierové substráty aplikované v technológii InkJet Printing patria v oblasti elektroniky medzi lukratívne novinky. Tieto materiály nájdu v budúcnosti pravdepodobne široké uplatnenie. Medzi základné požiadavky, ktoré substráty pre tlačnú elektroniku musia spĺňať, patrí malá drsnosť povrchu a minimálna nasiakavosť. Vo všeobecnosti má papier veľkú drsnosť povrchu a kvôli celulóze, z ktorej sa vyrába, aj dobrú schopnosť nasiakavosti. Napriek týmto vlastnostiam sa papier čoraz častejšie používa ako substrát v oblasti flexibilnej elektroniky. Nanesením špeciálnych vrstiev na papier sa eliminujú opisované nežiaduce

vlastnosti materiálu. Na tento účel sa používa nanášanie vrstiev polyetylénu, polypropylénu, PET, vosku, príp. hliníka. Iný spôsob úpravy povrchových vlastností papiera, ako je povrchová energia, drsnosť a pórovitosť spočíva v použití kriedového papiera, príp. fotopapiera. Okrem toho tento materiál spĺňa nároky na odolnosť proti zvýšeným teplotám, pri ktorých sa spekajú nanočastice. Ich nevýhodou je však anizotropia fyzikálnych vlastností [7].

Ďalšou možnosťou nanášania vrstiev technológiou InkJet Printing je použitie aramidového papiera na účely substrátu. Existuje niekoľko výrobcov, ktorí ponúkajú aramidový papier pre elektrotechnický priemysel. Za najčastejšie používaný aramidový papier v technológii InkJet Printing sa považuje Nomex® od spoločnosti DuPont™.

Nomex® 410 je kalandrovaný izolačný aramidový papier, ktorý ponúka vysokú dielektrickú pevnosť, mechanickú odolnosť, flexibilitu a pružnosť. Nomex® 411 je nekalan-

drovaný predchodca aramidového papiera Nomex® 410. Fyzikálne a elektrické vlastnosti oboch substrátov sú uvedené v *tabuľke 3* [8], [9].

Obr. 3 znázorňuje UWB anténu vyrobenú technológiou InkJet Printing na papierovom substráte [10].

V porovnaní s polyimidovou fóliou má papierový substrát niekoľkonásobne nižšiu cenu, čo je často dôležitým faktorom pri výbere substrátu. Ďalšou výhodou papiera je možnosť úpravy jeho vlastností vyplnením pórov. Týmto spôsobom je možné upraviť napr. jeho relatívnu permitivitu, vďaka čomu sa často používa vo VF oblasti pre výrobu antén, kde tento parameter zohráva kľúčovú úlohu.

Atramenty používané v technológii InkJet Printing

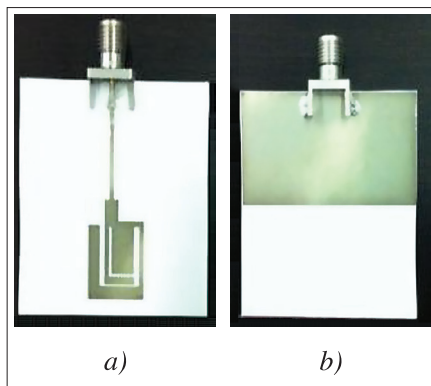
Atramenty používané v technológii InkJet Printing musia spĺňať niekoľko požiadaviek, medzi ktoré patria najmä nízka viskozita, povrchové napätie a v neposlednom rade nízka teplota spekania. Túto požiadavku je možné splniť použitím nanočastíc kovov, ktoré majú teplotu spekania výrazne nižšiu, než ten istý materiál väčších rozmerov. Práve z tohto dôvodu atramenty pre technológiu InkJet Printing sú na báze nanočastíc.

Jedným z problémov, ktorý v súčasnosti riešia technológovia v oblasti vývoja atramentov na báze nanočastíc je zabezpečenie ich dlhodobej životnosti [11], [12]. Separácia a rozdzušovanie nanočastíc, ako aj potlačanie sedimentácie, rovnako tiež ich homogenita v celom objeme, sú základnými požiadavkami, ktorých splnenie je nevyhnutné pri apli-

kácii InkJet Printing technológie metódo DoD.

1) Vodivé atramenty na báze nanočastíc kovov

Technológia InkJet Printing vyžaduje použitie špeciálnych atramentov, ktoré musia spĺňať tri základné požiadavky [11]:



Obr. 3 UWB anténa na papierovom substráte a) pohľad zhora, b) pohľad zdola [10].

- veľmi nízka viskozita (1–10 mPa·s),
- vhodné rozpúšťadlo bez nebezpečenstva zhukovania nanočastíc,
- dostatočná elektrická vodivosť bez náchylnosti na oxidáciu.

Rozvoj nanotechnológií v poslednom období poskytuje možnosť spekania a modifikácie nanočastíc kovov, ktoré sú rozpustené v organických rozpúšťadlách, ako sú toluén, xylén, ale aj voda. Takáto možnosť spracovania nanočastíc kovov poskytuje jednoduchú a efektívnu technológiu nanášania vodivých vrstiev na rôzne povrchy. Nanočastice na báze

striebra, zlata a medi patria medzi najviac skúmané kovy, ktoré sa používajú na výrobu vodivých atramentov pre technológiu InkJet Printing [1].

Atramenty určené na tlač vodivých štruktúr sú zvyčajne na báze ušľachtilých kovov nanorozmerov z dôvodu ich chemickej inertnosti vo vonkajšom prostredí a dobrej elektrickej vodivosti. Z tohto dôvodu sa najčastejšie na účely vodivých atramentov používa striebro [10]. Pre nanášanie atramentu na substráty technológiou InkJet Printing sú dôležité najmä parametre atramentu, ako sú viskozita, povrchové napätie, zmáčanie, rezistivita a podmienky spekania nanočastíc. Viskozita a povrchové napätie atramentu majú výrazný vplyv na rozmery kvapky a ich stabilitu [11].

Štruktúra má po nanesení na substrát technológiou InkJet Printing vysokú rezistivitu z dôvodu obalenia nanočastíc kovu izolačnou vrstvou. Nízka hodnota rezistivity sa dosiahne až po procese spekania. Vo všeobecnosti je žiaduce, aby teplota a čas spekania boli čo najnižšie, no atramenty s nanočasticami kovu si vyžadujú teplotu vyššiu než 200 °C v trvaní niekoľkých desiatok minút. Táto teplota a čas spekania zabezpečia dokonalú elimináciu ochrannej vrstvy z okolia nanočastíc a pripraví termodynamicky vhodné podmienky pre zabezpečenie dokonalého procesu spekania.

Príprava atramentov na báze nanočastíc striebra pozostáva z troch krokov:

1. V prvom kroku sa organické zložky, ako sú dispergátory, riedidlá a spojivá zmiešajú s nanočasticami striebra s dostatočným množstvom organického rozpúšťadla, ako je alkohol alebo acetón.
2. V druhom kroku sa disperzia nanočastíc striebra v atramente dosiahne mechanickým miešaním alebo ultrazvukovými vibráciami.
3. V treťom kroku sa odparia rozpúšťadlá z atramentu. Výsledná viskozita atramentu sa upravuje vhodnou kombináciou organických zložiek v atramente [11].

Typické dispergenty, ktoré sa používajú na výrobu atramentov pre technológiu InkJet Printing, sú na báze polárnych kvapalín z kategórie rôznych uhl'ovodí-

Tabuľka 3

Fyzikálne a elektrické vlastnosti aramidových papierov Nomex® 410 a 411 [8], [9]

Parameter	Nomex® 410				Nomex® 411			
	0,13	0,18	0,25	0,38	0,13	0,18	0,25	0,38
Hrúbka [mm]	0,13	0,18	0,25	0,38	0,13	0,18	0,25	0,38
Hustota [g/cm ³]	0,88	0,95	0,96	1,02	0,30	0,31	0,31	0,31
Pevnosť v ťahu [N/cm] MD	141	227	296	462	18	27	35	55
Pevnosť v ťahu [N/cm] XD	71	116	161	252	9	14	20	33
Predĺženie [%] MD	16	20	22	20	3,6	3,8	3,4	3,7
Predĺženie [%] XD	13	15	18	16	4,8	5,6	5,2	5,3
Relatívna permitivita – 60 Hz	2,4	2,7	2,7	3,2	1,2	1,2	1,2	1,3
Stratový činiteľ – 60 Hz	0,006	0,006	0,006	0,007	0,003	0,003	0,003	0,003

MD – pozdĺžny smer, XD – priečny smer

kov alebo etylénglykolov (napr. toluén alebo glycerol), ktoré sa ľahko a bezo zvyšku odparia v procese spracovania. Tieto dispergenty sa často používajú v kombinácii napr. s vodou. Úlohou dispergentov je separovať nanočastice, resp. zabrániť ich zhlukovaniu. Ako kvalitné médium pre nanočastice striebra sa často používajú kombinácie rôznych rozpúšťadiel a dispergentov, ako napr. voda/alkohol, voda/glykol a viaczložkové médiá, ktoré pozostávajú z vody, okysličených organických rozpúšťadiel a glycerolu [12].

2) Vodivé atramenty na báze organických materiálov

Organické materiály predstavujú neoddeliteľnú súčasť flexibilnej elektroniky. Majú mnoho výhod, ako napr. nízka cena, flexibilita, široký rozsah aplikovateľnosti a dobré elektrické parametre, ktoré sa využívajú najmä pri výrobe RFID elementov, displejov, LED diód a inej „jednorazovej“ elektroniky. Tieto atramenty sa môžu aplikovať tiež pomocou InkJet Printing technológie. Pojem organická

elektronika znamená použitie vodivých polymérov, plastov a malých molekúl. Organická elektronika môže byť rozdelená na tri skupiny:

- organické dielektriká,
- organické polovodiče,
- organické vodiče, skladajúce sa z koloidných nanokryštálov kovov a nanočastíc kovov.

Vodivé polyméry predstavujú konjugované oligoméry a polyméry, ako polypyrol, polytiofén, poly (para-fenylén-vinylén), poly (3, 4-etyléndioxytiofén)-poly (styrénsulfonát) (PEDOT:PSS), pentacén a polyanilín (PANI) [13], [14]. Napriek výhodným vlastnostiam vodivých polymérov je ich vodivosť niekoľkonásobne nižšia, než v prípade kovov.

PEDOT:PSS je najpoužívanejší vodivý polymér, ktorý sa vyrába kombináciou dvoch ionomérov, a to PEDOT: poly (3, 4-etyléndioxytiofén) a PSS: sulfonát polystyrénu sodného. Spojením týchto dvoch nabitých makromolekúl vzniká vodivý polymér, ktorý je priehľadný a v prípade tenkých vrstiev vykazuje známky

plasticity. Nevýhodou PEDOT:PSS je jeho malá vodivosť, ktorá je 10^4 krát nižšia, než vodivosť väčšiny kovových materiálov. Pridaním vhodným organických rozpúšťadiel je možné zvýšiť jeho vodivosť. Ďalším spôsobom zvýšenia vodivosti tohto polyméru je pridanie oxidu zinočnatého (ZnO), vplyvom čoho je možné jeho vodivosť až zdvojnásobiť [14], [15].

Ďalšou skupinou atramentov, ktoré sa používajú v technológii InkJet Printing, sú polovodičové atramenty. Sú to najmä poly (3,3-didodecylquaterthiophene) (PQT-12), poly(3-hexyltiofén) (P3HT) a pentacén. Technológia InkJet Printing umožňuje vytvárať nanášaním týchto atramentov tlačene OFET (Organic Field-Effect Transistor – organický, pol'om riadený tranzistor) a TFT (Thin-Film Transistor – tenkovrstvový tranzistor). Ďalšou možnosťou je použitie materiálov na báze uhlíka, ako je grafén alebo uhlíkové nanorúrky (Nanotubes), príp. kombinácia organických polovodičových materiálov (PQT-12, P3HT) a grafénu [13].

Pre výrobu elektronických štruktúr, príp. prvkov technológiou InkJet Prin-

180 x 115 mm

ting, sa často vyžaduje nanosenie izolačnej vrstvy na substrát, príp. na už nanosenú vodivú alebo polovodičovú vrstvu. Na tieto účely sa používajú atramenty na anorganickú, ale aj organickú bázu. Anorganické izolačné atramenty sú na báze nanočastíc zirkónia (Zr), oxidu titaničitého (TiO₂), titaničitanu bárnateho (BaTiO₃), oxidu kremičitého (SiO₂) a oxidu hlinitého (Al₂O₃). Medzi izolačné atramenty na báze organických materiálov je možné zaradiť poly(4-vinylfenol) (PVP), polyvinyl alkohol (PVA), polyakrylát (PMMA), polystyrén (PS) [13].

Záver

Hlavnou výhodou technológie InkJet Printing je široká škála použiteľných materiálov vo forme substrátov, ako aj atramentov na tlač vodivých, polovodičových, izolačných, ako aj funkčných vrstiev. Spojením opisovaných materiálov a vysokej presnosti depozície predstavuje táto technológia účinný nástroj nielen na laboratórne účely, ale aj na sériovú výrobu elektronických štruktúr na materiály používané v každodennom živote.

Referencie:

- [1] Sankir, N. D.: *Flexible Electronics: Materials and Device Fabrication: Dizertačná práca*. Virginia: Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. 172 s.
- [2] Liptáková, T.; Alexy, P.; Gondár, E. et al.: *Polymérne konštrukčné materiály*. Žilina: EDIS vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2012. 188 s. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [3] DUPONT: DuPont™ Kapton® HN polyimide film [online]. USA: DuPont, 2011. Dostupné na internete: <<http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/membranes-films/assets/DEC-Kapton-HN-datasheet.pdf>>.
- [4] Lukacs, P.; Pietrikova, A.; Potenci, J.; Tomaszewski, G.: „UWB antenna based on nanoparticles of silver on polyimide substrate,“ in *Electronics Technology (ISSE), 2015 38th International Spring Seminar on*, vol., no., pp.408-413. ISBN 978-1-4799-8860-0.
- [5] DUPONT TEIJIN FILMS: Mylar® polyester film, *Physical-Thermal Properties* [online]. USA: DuPont Teijin Film, 2003. Dostupné na internete: MicroFab Technologies, Inc.: *Ink-Jet Microdispensing Basic Setup* [online]. USA: MicroFab Technologies, Inc., 2012. Dostupné na internete: <http://www.microfab.com/images/pdfs/manuals/Ink-JetMicrodispensingSet-up_UserGuide_2012.pdf>.
- [6] Kawahara, Y.; Hodges, S.; Cook, S. B. et al.: *Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices*. In: *UbiComp, Zurich: 2013*. s. 363–372. ISBN 978-1-4503-1770-2.
- [7] Österbacka, R.; Tobjörk, D.: *Paper Electronics*. In: *Advanced Materials*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2011. 23 (17), s. 1935–1961. ISSN 1521-4095.
- [8] DUPONT: DuPont™ Nomex® Paper Type 410 [online]. Dostupné na internete: <http://www2.dupont.com/Nomex_Energy_Solutions/zh_CN/assets/downloads/AP_2010/Nomex-Type410_DataSheet.pdf>.
- [9] DUPONT: DuPont™ Nomex® Type 411 [online]. Dostupné na internete: <http://www.redseal.com/download/H_93498_3_NOMEX_Type_411_Tech_Data_Sheet.pdf>.
- [10] Abutarboush, F. H.; Shamin, A.: *Paper-Based Inkjet Printed Tri-Band U-Slot Monopole Antenna for Wireless Applications*. In: *Antennas and Wireless Propagation Letters*, London: IEEE Antennas and Propagation Society, 2012. 11, s. 1234–1237. ISSN 1536-1225.
- [11] Felba, J.; Schaefer, H.: *Materials and Technology for Conductive Microstructures*. In: *Nanopackaging: Nanotechnology and Electronics Packaging*. USA: Springer Science+Business Media, 2008. s. 239–263. ISBN 978-0-387-47326-0.
- [12] Kamyshny, A.; Steinke, J.; Magdassi, S.: *Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics*. In: *The Open Applied Physics Journal*, 2011. 4, s. 19–36. ISSN 1874-1835.
- [13] Caglar, U.: *Studies of Inkjet Printing Technology with Focus on Electronics Materials: Dizertačná práca*. Tampere: Tampere University of Technology: 2009. 81 s.
- [14] Vilkmán, M.: *Structural investigations and processing of electronically and protonically conducting polymers: Dizertačná práca*. Helsinki: VTT, 2010. 68 s.
- [15] Charlot, B.; Sassine, G.; Garraud, A. et al.: *Micropatterning PEDOT-PSS layers*. In: *Microsystem Technologies*, 2013. 19, s. 895–903. ISSN 1432-1858.

peter.lukacs@tuke.sk

180 x 55 mm