

# Substráty používané v technológii InkJet Printing

<sup>1</sup>Peter LUKÁCS, <sup>2</sup>Alena PIETRIKOVÁ

<sup>1,2</sup> Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

<sup>1</sup>peter.lukacs@tuke.sk, <sup>2</sup>alena.pietrikova@tuke.sk

**Abstrakt** — Táto práca ponúka všeobecný prehľad substrátov používaných v technológii InkJet Printing, ktorá predstavuje modernú techniku depozície špeciálnych atramentov na báze nanočastíc kovov na rôzne, zvyčajne flexibilné substráty. Z dôvodu neustálej miniaturizácie elektronických obvodov sa technológia InkJet Printing posúva do popredia najmä z dôvodu možnosti precíznej tlače so šírkou čiar nižšou než 50 µm. Z tohto dôvodu je potrebné sa venovať povrchovým vlastnostiam používaných substrátov, ktoré majú výrazný vplyv na výslednú kvalitu nanosennej štruktúry. Pre účely substrátov sa používajú najčastejšie polymérne fólie, ako sú polyimid a polyester, a taktiež papierové substráty, ktoré predstavujú ekologickú formu elektroniky. Technológia InkJet Printing je vhodná na výrobu tzv. jednorazovej elektroniky, keďže umožňuje nanášať organické materiály vo forme atramentov na ekologické a lacné podložky. Vďaka precíznej a jednoduchej tlači má opisovaná technológia široké uplatnenie v oblasti výrobných technológií v elektronike.

**Kľúčové slová** — InkJet Printing, nanočastice, polyméry, polyimid, polyester

## I. ÚVOD

Vývoj nanotechnológií prináša nové možnosti nanášania vodivých, polovodičových a izolačných vrstiev na ohybné substráty v podobe atramentov na báze nanočastíc ušľachtilých kovov a organických materiálov. Technológia InkJet Printing je známa už mnoho desaťročí ako technológia tlače v kancelárskych tlačiarňach. Práve vývoj nanotechnológií umožnil použitie nanoatramentov v technológii InkJet Printing na výrobu elektronických štruktúr na flexibilných substrátoch. Technológia InkJet Printing prináša nové možnosti efektívnej tlače nanoatramentov na flexibilné substráty vo forme veľmi tenkej vrstvy nanoseného atramentu na substrát, vysokého rozlíšenia tlače a malej šírky čiar. V oblasti elektroniky ide o novinku, ktorej progresívny rozvoj sa aktuálne začína. Práve tieto aspekty umožňujú tlačiť aj veľmi jemné štruktúry, kde vysoká presnosť tlače zohráva kľúčovú úlohu.

## II. SUBSTRÁTY POUŽÍVANÉ V TECHNOLÓGII INKJET PRINTING

Medzi najčastejšie používané polyméry, z ktorých sa vyrábajú fólie (substráty) pre elektroniku patria najmä [1]:

- 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 viskóznej pseudoplastickej kvapaliny. Pre 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.

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 zmáčavosť substrátu,
- odolnosť voči teplotnému namáhaniu a v tej súvislosti malý koeficient tepelnej rozťažnosti,
- nízka cena, resp. dostupnosť pre výrobcov.

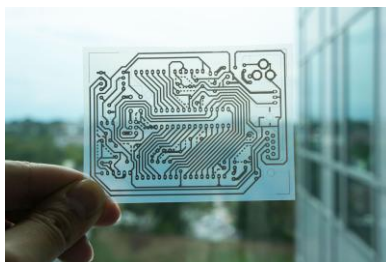
#### A. Polyester

Polyesterová fólia Mylar<sup>®</sup> sa často používa ako substrát v oblasti flexibilnej elektroniky vďaka svojim výhodným mechanickým, elektrickým a teplotným vlastnostiam. PET fólia Mylar<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> sú uvedené v Tab. 1 [2].

Tabuľka 1  
Vybrané fyzikálne a elektrické parametre PET fólie Mylar<sup>®</sup> [2]

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

Hlavnou výhodou PET fólie Mylar<sup>®</sup> je jej priehľadnosť, vďaka čomu sa najčastejšie používa pre aplikácie, kde sa vyžaduje priehľadnosť substrátu, napr. výroba displejov. Príklad použitia PET fólie Mylar<sup>®</sup>, na ktorý je nanosený motív technológiou InkJet Printing, je znázornený na Obr. 1 [3].



Obr. 1 Príklad použitia PET fólie Mylar<sup>®</sup> [3].

#### B. Polyimid

Polyimidová fólia Kapton<sup>®</sup> od spoločnosti DuPont<sup>™</sup> je jedna z najčastejšie používaných materiálov pre substráty v oblasti flexibilnej elektroniky. Kapton<sup>®</sup> je syntetizovaná polymerizáciou aromatického dianhydridu a aromatického diamínu. Má výbornú teplotnú stabilitu, odolnosť voči rozpúšťadlám a adhéziu. Kapton<sup>®</sup> sa používa taktiež na výrobu filmov potiahnutých vodivou fóliou, ako napr. med'. Takéto fólie sa nazývajú Pyralux<sup>®</sup> [4].

Spoločnosť DuPont<sup>™</sup> ponúka rôzne typy polyimidových fólií Kapton<sup>®</sup>, ktoré sa líšia od seba mechanickými, elektrickými, chemickými a povrchovými vlastnosťami. Za najčastejšie používanú polyimidovú fóliu Kapton<sup>®</sup> v technológii InkJet Printing sa používa Kapton<sup>®</sup> HN.

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. Vybrané fyzikálne a elektrické vlastnosti opisovanej fólie sú uvedené v Tab. 2 [5].

Nevýhodou polyimidovej fólie je jej vysoká cena, ktorá zohráva často krát dôležitú úlohu pri výbere vhodného substrátu. Lacnejšiu variantu predstavujú polymérne substráty PET a PEN.

Tabuľka 2  
Vybrané fyzikálne a elektrické parametre fólie DuPont™ Kapton® HN [5]

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 <sup>3</sup> ]	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 <sup>17</sup>	1,5.10 <sup>17</sup>	1,4.10 <sup>17</sup>	1,0.10 <sup>17</sup>

Obr. 2 znázorňuje UWB anténu vyrobenú technológiou InkJet Printing na polyimidovom substráte Kapton® HN 200 hrúbky 50,8 μm.



Obr. 2 UWB anténa vyrobená technológiou InkJet Printing na polyimidovom substráte Kapton® HN.

### C. 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 tlačenu 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. Nanosením 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 voči zvýšeným teplotám, pri ktorých sa spekajú nanočastice. Ich nevýhodou je však anizotropia fyzikálnych vlastností [6].

Ďalšou možnosťou nanášania vrstiev technológiou InkJet Printing je použitie aramidového papiera pre 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

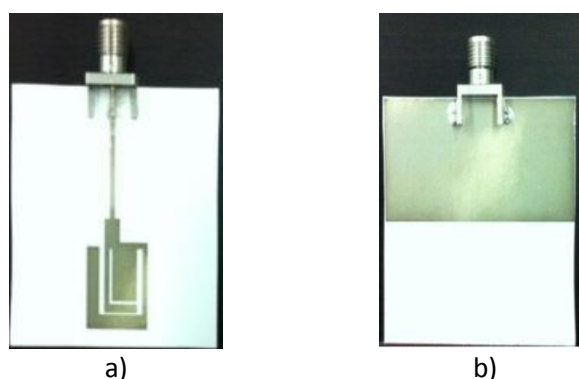
pevnosť, mechanickú odolnosť, flexibilitu a pružnosť. Nomex<sup>®</sup> 411 je nekalandrovaný predchodca aramidového papiera Nomex<sup>®</sup> 410. Fyzikálne a elektrické vlastnosti oboch substrátov sú uvedené v Tab. 3 [7], [8].

Tabuľka 3  
Fyzikálne a elektrické vlastnosti aramidových papierov Nomex<sup>®</sup> 410 a 411 [7], [8]

Parameter	Nomex <sup>®</sup> 410				Nomex <sup>®</sup> 411			
Hrúbka [mm]	0,13	0,18	0,25	0,38	0,13	0,18	0,25	0,38
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	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 – 60Hz	2,4	2,7	2,7	3,2	1,2	1,2	1,2	1,3
Stratový činiteľ – 60Hz	0,006	0,006	0,006	0,007	0,003	0,003	0,003	0,003

MD – pozdĺžny smer, XD – priečny smer

Obr. 3 znázorňuje UWB anténu vyrobenú technológiou InkJet Printing na papierovom substráte [9].



Obr. 3 UWB anténa na papierovom substráte a) pohľad zhora, b) pohľad zhora [9].

V porovnaní s polyimidovou fóliou má papierový substrát niekoľko násobne nižšiu cenu, čo je často krát 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 krát používa vo VF oblasti pre výrobu antén, kde tento parameter zohráva kľúčovú úlohu.

### III. ZÁVER

Práca ponúka prehľad najčastejšie používaných substrátov v technológii InkJet Printing, medzi ktoré patria polymérne polyimidové a polyesterové fólie. Pojednáva o fyzikálnych a elektrických vlastnostiach opisovaných substrátov, pričom sa zameriava na možnosti náhrady polymérnych fólií papierovými, ktoré majú niekoľko násobne nižšiu cenu pri zachovaní požadovaných parametrov. Hlavná nevýhoda polyimidových substrátov spočíva vo vysokej cene, ktorá predstavuje často krát kľúčový faktor pri výbere substrátu. Túto nevýhodu je možné eliminovať použitím cenovo dostupnejších substrátov, ako je polyester, príp. aramidový papier. Papierové substráty predstavujú novú generáciu jednorazovej elektroniky, ktorá použitím depozičnej technológie InkJet Printing a vhodných substrátov prináša novú éru spotrebnej elektroniky.

### POĎAKOVANIE



Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICAL pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: **26220220182**, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Táto práca vznikla na základe podpory projektu VEGA: 1/0218/13.

## REFERENCIE

- [1] LIPTÁKOVÁ, Tatiana – ALEXEY, Pavol – GONDÁR, Ernest et al.: Polymérne konštrukčné materiály. Žilina: EDIS vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2012. 188 s. ISBN 978-80-554-0505-6.
  - [2] DUPONT TEIJIN FILMS: Mylar® polyester film, Physical-Thermal Properties [online]. USA: DuPont Teijin Film, 2003. Dostupné na internete: <[http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Physical\\_And\\_Thermal\\_Properties.pdf](http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Physical_And_Thermal_Properties.pdf)>.
  - [3] 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.
  - [4] SANKIR, Nurdan Demirci: Flexible Electronics: Materials and Device Fabrication: Dizertačná práca. Virginia: Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. 172 s.
  - [5] 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>>.
  - [6] ÖSTERBACKA, Ronald. – TOBJÖRK, Daniel: Paper Electronics. In: Advanced Materials. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2011. 23 (17), s. 1935-1961. ISSN 1521-4095.
  - [7] DUPONT: DuPont™ Nomex® Paper Type 410 [online]. Dostupné na internete: <[http://www2.dupont.com/Nomex\\_Energy\\_Solutions/zh\\_CN/assets/downloads/AP\\_2010/NomexType410\\_DataSheet.pdf](http://www2.dupont.com/Nomex_Energy_Solutions/zh_CN/assets/downloads/AP_2010/NomexType410_DataSheet.pdf)>.
  - [8] DUPONT: DuPont™ Nomex® Type 411 [online]. Dostupné na internete: <[http://www.redseal.com/download/H\\_93498\\_3\\_\\_NOMEX\\_Type\\_411\\_Tech\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.redseal.com/download/H_93498_3__NOMEX_Type_411_Tech_Data_Sheet.pdf)>.
  - [9] 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.
-