



Fakulta elektrotechniky
a informatiky

FLEXIBILNÁ ELEKTRONIKA

Materiály vo flexibilnej elektronike

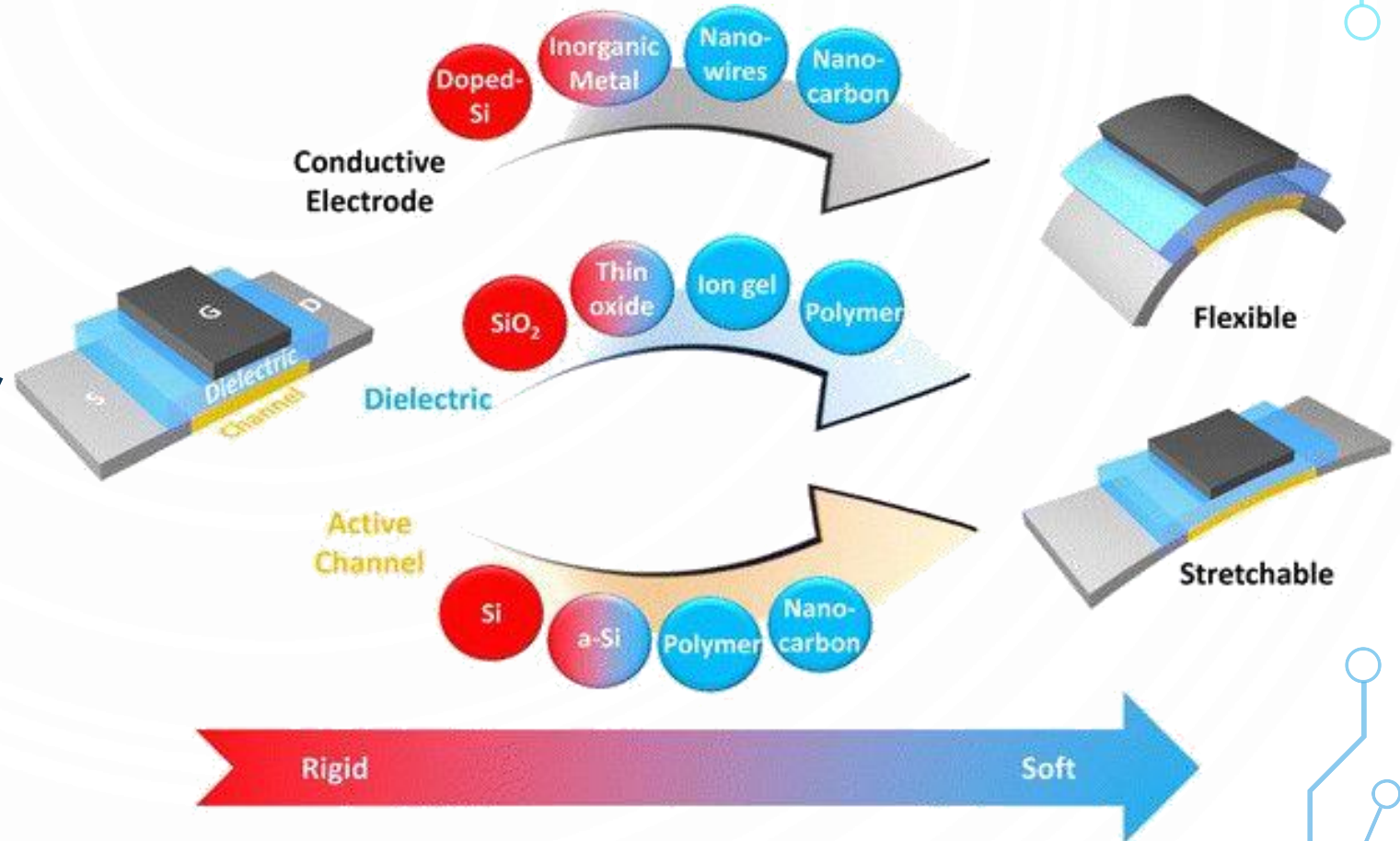
ING. PETER LUKÁCS, PHD.

peter.lukacs@tuke.sk

ÚVOD

Flexibilná elektronika:

- vodivé materiály (vodiče),
- substrát,
- funkčné materiály (polovodiče, dielektriká, izolanty...).



ROZDELENIE MATERIÁLOV

Materiály:

- **organické (konjugované polyméry),**
 - nízkomolekulárne látky (kryštalická štruktúra),
 - monoméry,
 - oligoméry,
 - polyméry (amorfná štruktúra),
- **anorganické (kovy) –** bežná konvenčná elektronika.

Organic electronics

- Flexible
- Foldable
- Light
- Low-cost
- High throughput



Inorganic electronics

- Rigid
- Hard
- Heavy
- Expensive
- Many more steps



ORGANICKÉ MATERIÁLY

Vodivé polyméry

- predstavujú konjugované oligoméry a polyméry ako
 - polypyrol,
 - polytiofén,
 - poly (para-fenylén-vinylén),
 - poly (3, 4-etyléndioxytiofén)-poly (styrénsulfonát) (PEDOT:PSS),
 - pentacén,
 - polyanilín (PANI).

Napriek výhodným vlastnostiam vodivých polymérov je ich vodivosť niekoľko násobne nižšia, než v prípade kovov.

ORGANICKÉ MATERIÁLY

Vodivé polyméry

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.

ORGANICKÉ MATERIÁLY

Vodivé polyméry

PEDOT:PSS

ionomérov,

sodného. Sp

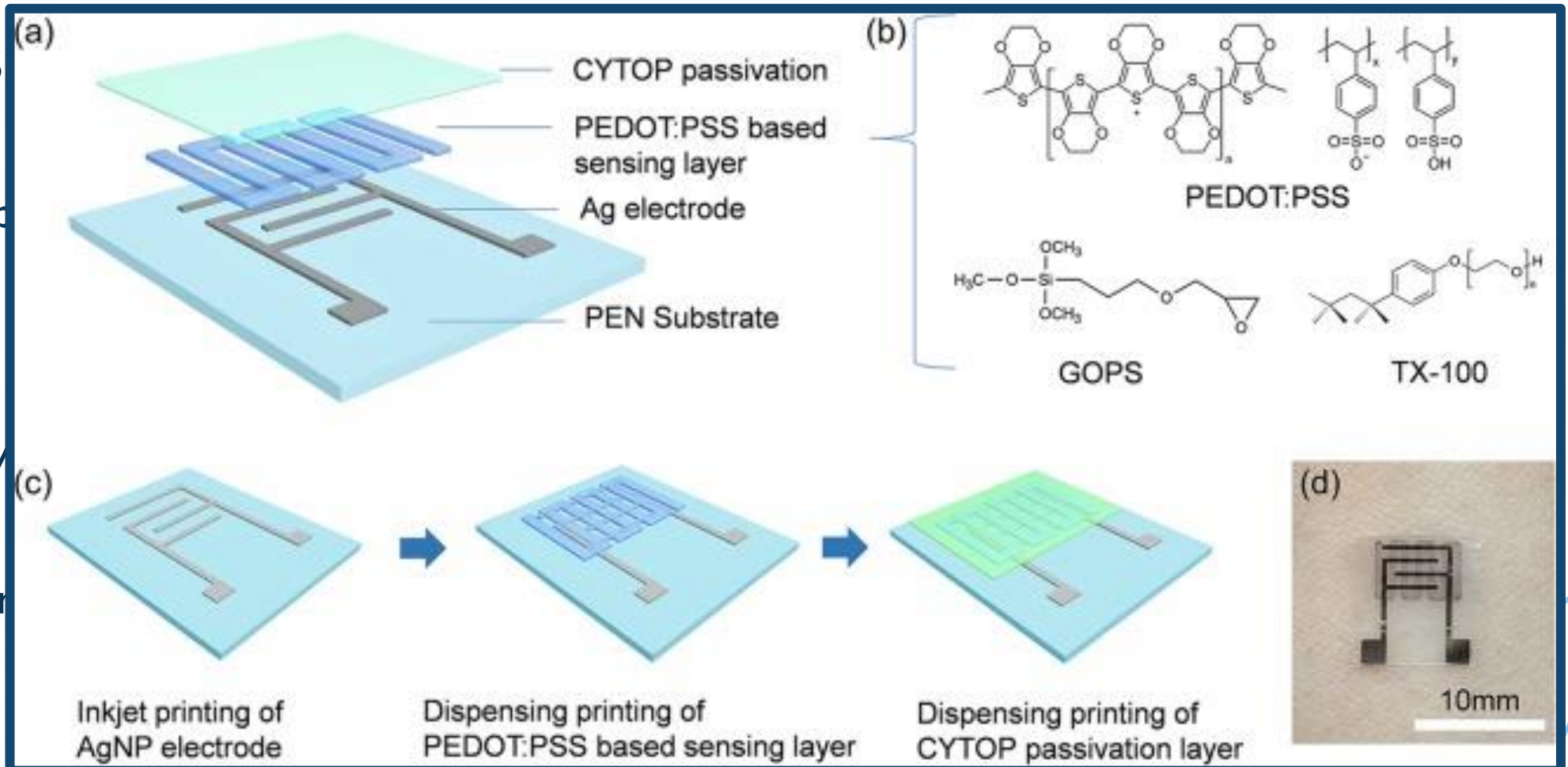
prieľadný

Nevýhodou

väčšiny kov

zvýšiť jeho

oxidu zinočr



ORGANICKÉ MATERIÁLY

Polovodiče na báze polymérov

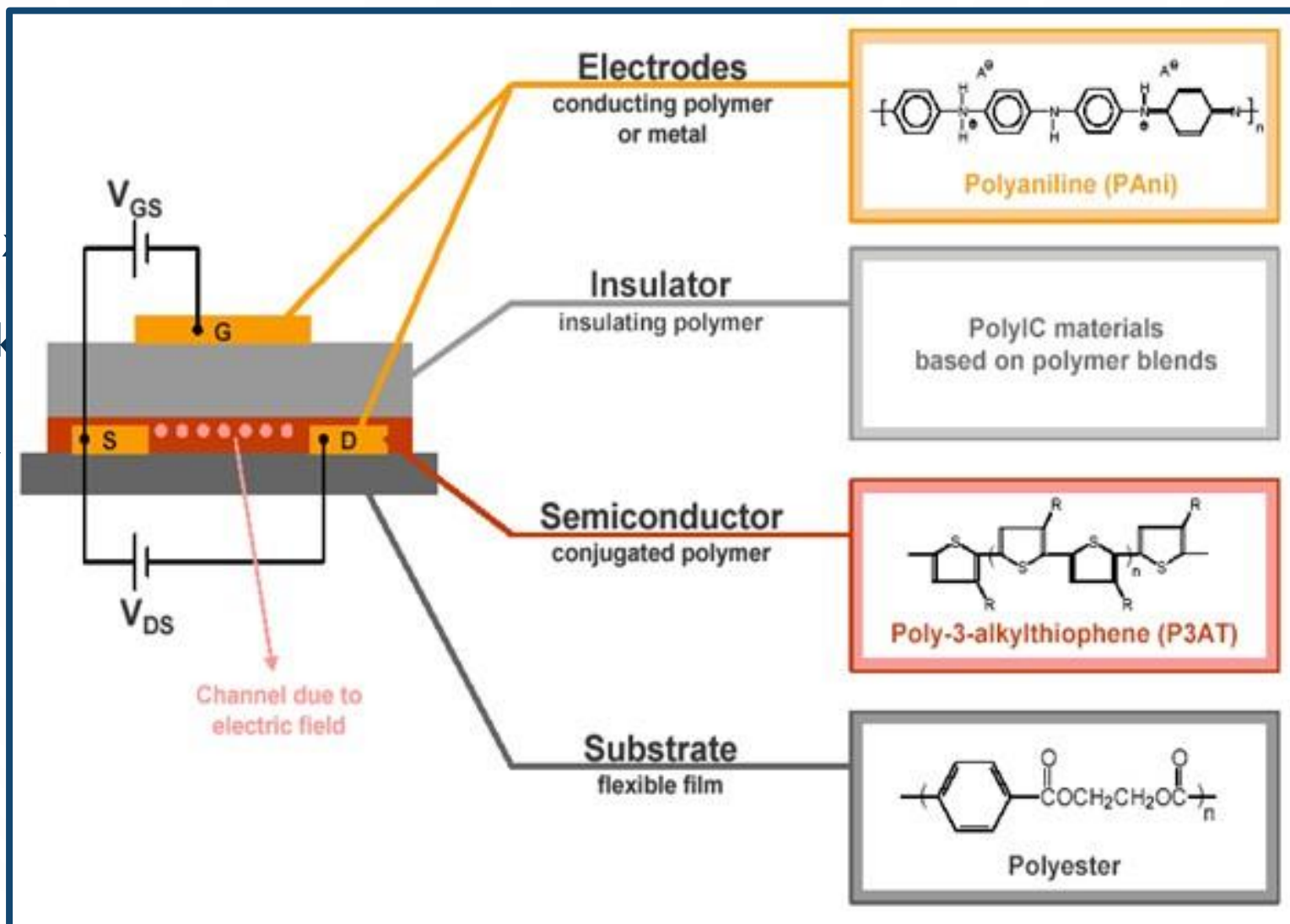
- poly(3,3- didodecylquaterthiophene)) (PQT-1 2),
- poly(3-hexyltiofén) (P3HT),
- poly(3-alkyltiofén) (P3AT),
- pentacén,
- materiály na báze grafénu v podobe nanorúrok.

Grafén je názov jednoatómovej planárnej 2D vrstvy, ktorú vytvárajú atómy uhlíka v hybridnom stave sp^2 , usporiadané do pravidelných šesťuholníkov. Dĺžka väzieb medzi jednotlivými atómami je 0,142 nm. Je základnou štruktúrou grafitu, fullerénov a uhlíkových nanorúrok. Nano-atramenty na báze grafénu sa vyznačujú vysokou vodivosťou a elimináciou oxidácie. Využívajú sa predovšetkým v oblasti výroby senzorov, biomedicíny ako aj oznamovacej a zobrazovacej techniky

ORGANICKÉ MATERIÁLY

Polovodiče

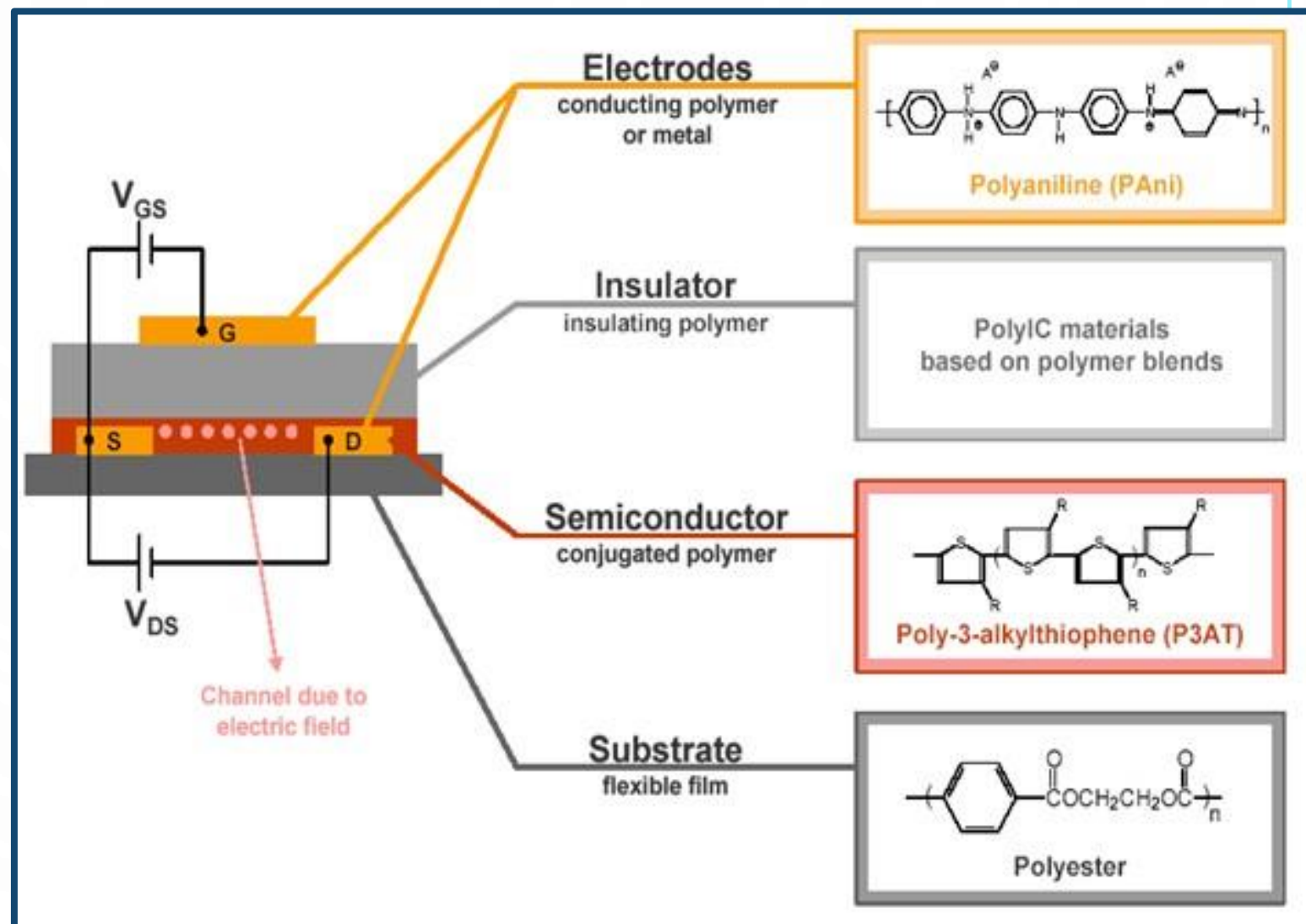
- poly(3,3-
- poly(3-he
- poly(3-alk
- pentacén,
- materiály



ORGANICKÉ MATERIÁLY

Izolanty na báze polymérov

- Poly(4-vinylfenol) (PVP),
- Polyvinyl alkohol (PVA),
- Polyakrylát (PMMA),
- Polystyrén (PS).



POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Požiadavky na flexibilné substráty:

- **Optické vlastnosti** – displeje používajúce podsvietenie (LCD, LED) potrebujú opticky čisté substráty.
- **Drsnosť povrchu** – nehomogenita povrchu má nepriaznivý vplyv v prípade tenkých vrstiev. Okrem iného, drsnosť povrchu priamo súvisí s adhéziou nanesej vrstvy.
- **Tepelné a termodynamické vlastnosti** – teplota skleného prechodu (T_g) musí byť kompatibilná s maximálnou výrobnou teplotou (T_{max}). Teplotný nesúlad medzi substrátom, nanášanými vrstvami a prvkami, môže spôsobiť poškodenie obvodu pri nahrievaní a ochladzovaní počas procesu výroby. Prípustné hodnoty sa dajú vyjadriť nasledovne $|\Delta CTE \cdot \Delta T| \leq 0,1-0,3\%$, kde ΔCTE je rozdiel v koeficientoch tepelnej rozťažnosti medzi substrátom a nanášanými vrstvami a ΔT je zmena teploty počas spracovania. Pri obvodoch s vysokým prúdovým zaťažením je dôležitá vysoká tepelná vodivosť a dostatočné chladenie.

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Požiadavky na flexibilné substráty:

- **Chemické vlastnosti** – substrát nesmie uvoľňovať žiadne škodlivé a nebezpečné materiály a musí byť chemicky odolný. Substráty by mali poskytovať čo najlepšiu ochranu proti prenikaniu atmosférických plynov. Okrem týchto vlastností musí byť substrát kompatibilný so všetkými lepidlami a chemikáliami používanými v procese nanášania vrstiev.
- **Mechanické vlastnosti** – flexibilné substráty musia byť mechanicky odolné pri malej hrúbke.
- **Elektrické a magnetické vlastnosti** – relatívna permitivita, dielektrické straty, atď’.

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Substráty

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

- polyetylén (PE),
- polypropylén (PP),
- polyvinylchlorid (PVC),
- polystyrén (PS),
- polyamid (PA),
- polyetyléntereftalát (PET),
- polyetylénnaftalát (PEN),
- polyimid (PI).



Väčšina polymérnych materiálov má tepelnú odolnosť nižšiu, než 200 °C, čím v prípade tepelného spôsobu spekania prechádzajú do stavu viskózneho pseudoplastického kvapaliny.

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyester (PET)

- Polyestery tvoria veľkú skupinu polymérov, ktorých spoločným znakom je prítomnosť esterových väzieb v hlavnom makromolekulárnom reťazci. Polyestery je možné klasifikovať dvoma základnými typmi: **polyestery termoplastické**, lineárne a **polyestery reaktoplastické**, rozvetvené.
- Najvýznamnejším z termoplastických polyesterov je v súčasnosti polykondenzát kyseliny tereftalovej a etylénglykolu, **polyetyléntereftalát (PET)**. PET je surovina určená hlavne na výrobu vlákien a taktiež na výrobu fólií.

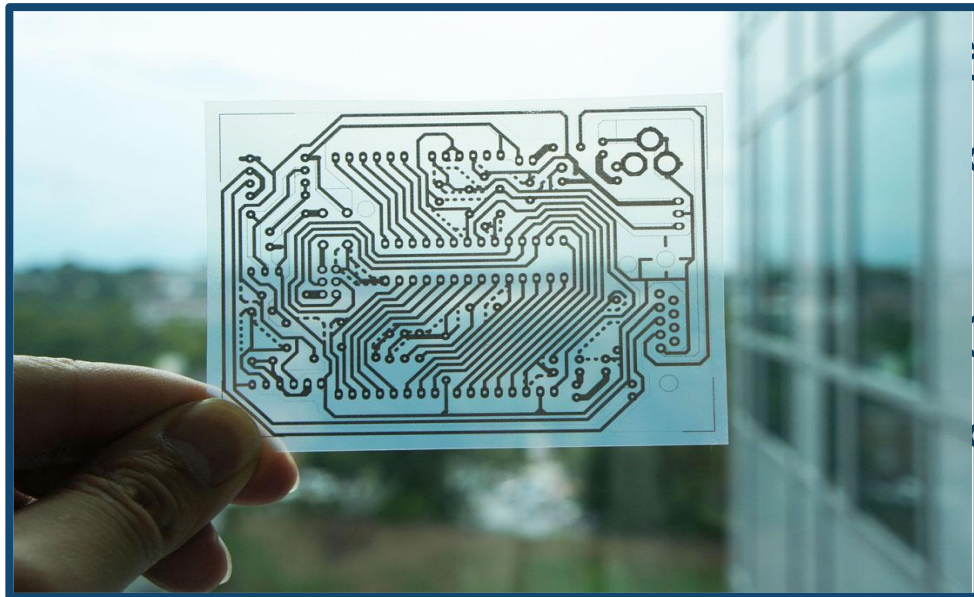
POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyester (PET)

- 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.
- **Veľká výhoda je nízka cena.**
- Hlavnou výhodou PET fólie **Mylar[®]** je jej priehľadnosť, vďaka čomu sa najčastejšie používa pre aplikácie, kde sa vyžaduje priehľadnosť substrátu, napr. výroba displejov.

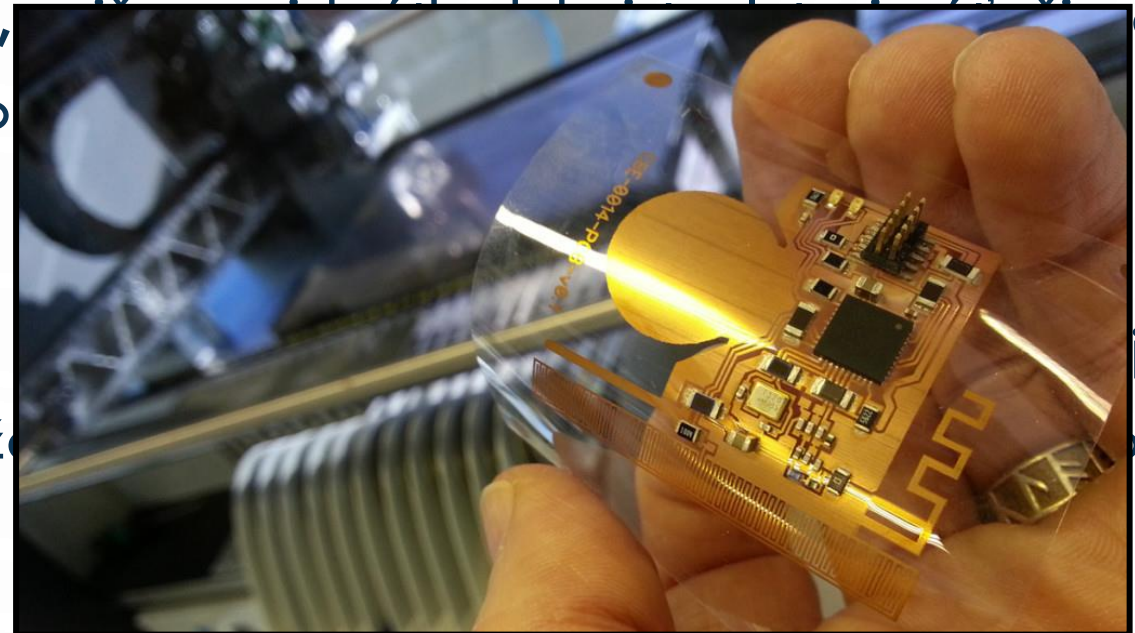
POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyester (PET)



- Hlavnou výhodou PET fólie Mylar® je používa pre aplikácie, kde sa vyžadujú vysoké teploty, napríklad pri výrobe displejov.

Vlastnosť	Hodnota
Drsnosť povrchu R_a [nm]	38
Hustota [g/cm^3]	1,39
Viskozita	0,56
Teplota tavenia [$^{\circ}\text{C}$]	254
Koeficient tepelnej rozťažnosti [$\text{cm}/\text{cm}/^{\circ}\text{C}$]	$43,18 \cdot 10^{-6}$



POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyimid (PI)

- **Polyimid** je kondenzačný polymér, ktorý vykazuje mimoriadnu tepelnú, termooxidačnú a chemickú odolnosť, tvarovú stálosť a vynikajúcu rovnováhu mechanických a elektrických vlastností.
- Polyimidová fólia **Kapton[®]** od spoločnosti DuPont[™] je jedna z **najčastejšie používaných materiálov** pre substráty v oblasti flexibilnej elektroniky. Kapton[®] je syntetizovaná polymerizáciou aromatického dianhydridu a aromatického diamínu. Má výbornú teplotnú stabilitu, odolnosť voči rozpúšťadlám a adhéziu.
- 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.

Nevýhodou je vysoká cena!

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyimid (PI)



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

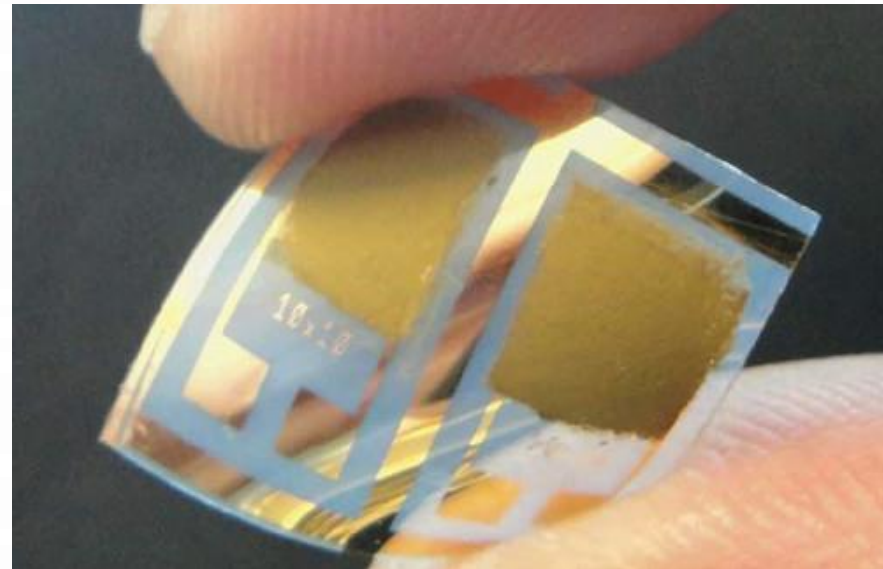
Kapton HN je univerzálna polyimidová fólia, ktorá sa vyznačuje výbornou tepelnou stabilitou v rozmedzí od -269 až do 400°C. Kapton® HN môže byť laminovaný, metalizovaný, formovaný alebo potiahnutý lepidlom.

Nevýhodou je vysoká cena!

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polyetylén naftalát (PEN)

- **PEN (Polyethylene naphthalate) fólia** je polymérny substrát, ktorý je odolný voči vode, pare a rozpúšťadlám. Používa sa pre teploty do 160 °C. Táto fólia je dobrým elektrickým izolantom. Používa sa pre ohybné káble a DPS, tlačené spoje a pre aplikácie v strojoch. Využívajú sa aj v membránových snímačoch, fóliových klávesniciach a tlačidlových displejoch.



POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Substráty na báze papiera

- 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. Nanesením špeciálnych vrstiev na papier sa eliminujú opisované nežiaduce vlastnosti materiálu. Na tento účel sa používa nanášanie vrstiev polyetylénu, polypropylénu, PET, vosku príp. hliníka.
- Ich nevýhodou je anizotropia fyzikálnych vlastností.

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

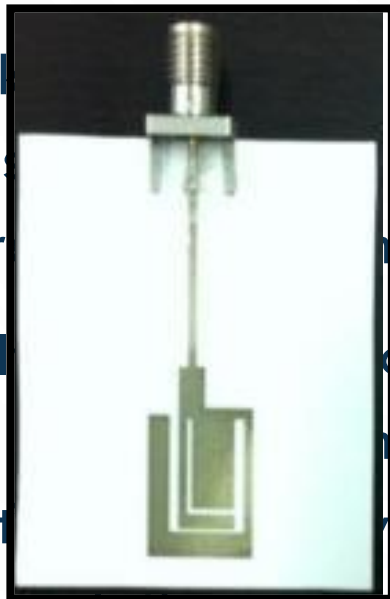
Substráty na báze papiera

- V súčasnosti vyrába jeden z najznámejších aramidových papierov firma DuPont a nazýva sa Nomex[®].
- Nomex[®] 410 je kalandrovaný izolačný aramidový papier, ktorý ponúka vysokú dielektrickú pevnosť, mechanickú odolnosť, flexibilitu a pružnosť. Nomex[®] 411 je nekalandrovaný predchodca aramidového papiera Nomex[®] 410.
- V porovnaní s polyimidovou fóliou má papierový substrát niekoľko násobne nižšiu cenu, čo je často kľúčovým 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.

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Substráty na báze papiera

- V súčasnosti vyrába jeden z najznámejších aramidových papierov firma DuPont a nazýva sa Nomex[®].
- Nomex[®] 410 je izolujúci dielektrický papier, ktorý ponúka vysokú dielektrickú pevnosť a odolnosť voči teplotným zmenám. Nomex[®] 411 je nekalandrovaný aramidový papier, ktorý ponúka vysokú pružnosť a pružnosť. Nomex[®] 410.
- V porovnaní s polystyrénom má Nomex[®] substrát niekoľko násobne nižšiu cenu, čo je často hlavným faktorom pri výbere substrátu. Ďalšou výhodou papiera je možnosť úpravy jeho vlastností. 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.



POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

Polymérne fólie s nanosenou vodivou vrstvou

- Pyralux fólie sú flexibilné fólie vyrábané pomocou polyimidových fólií DuPont Kapton, ktoré sú na jednej alebo oboch stranách potiahnuté medeným filmom. Tento medený film je na základný materiál buď nanosený pomocou lepidla alebo v prípade bezlepidlových flexibilných fólií, je medená vrstva na nosný materiál nalisovaná. Nevýhodou nelepených Pyralux fólií je ich väčšia hrúbka a zdĺhavosť lepenia. Navyše lepidlá sú menej šetrné k životnému prostrediu a majú horšiu rozmerovú stabilitu. Všetky Pyralux fólie sú dostupné s valcovanou, žíhanou alebo s elektrolytickou med'ou. Okrem toho je med' oboch typov tiež k dispozícii v dvojitej aplikácii (na oboch stranách medenej fólie sú nanosené čiastočky elektrolytickej medi).

POLYMÉRNE MATERIÁLY - SUBSTRÁTY

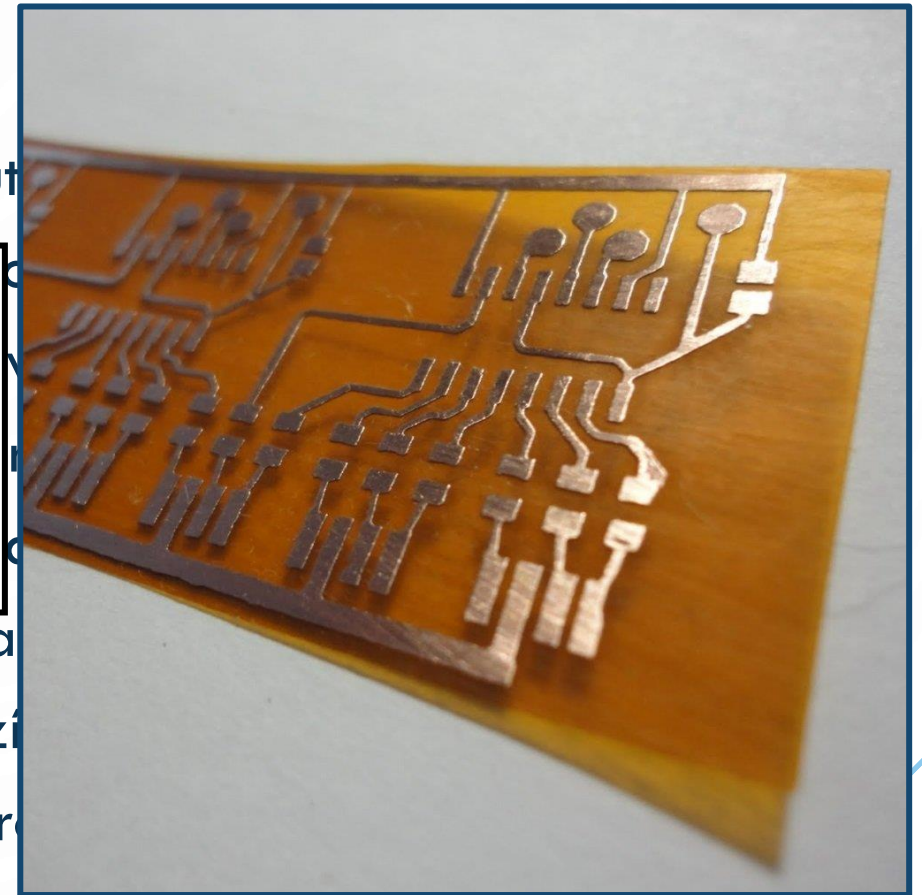
Polymérne fólie s nanosenou vodivou vrstvou

- Pyralux fólie sú flexibilné fólie vyrábané pomocou ktorých sú na jednej alebo oboch stranách potiahnuté



Všetky Pyralux fólie sú dostupné s valcovanou, žihavou

Okrem toho je medzi oboch typov tiež k dispozícii fólie, ktorých na oboch stranách medenej fólie sú nanosené čiastočky elektrických



Ďakujem za pozornosť.



**Faculty of Electrical Engineering
and Informatics**

Peter Lukacs, Ph.D.

Department of Technologies in Electronics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
peter.lukacs@tuke.sk