

Ing. Michal Hanic

**NÁVRH A PRÍPRAVA MERACIEHO PRACOVISKA PRE
CHARAKTERIZÁCIU ORGANICKÝCH TRANZISTOROV PRI
RÔZNYCH TEPLOTÁCH**

Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika

Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedeckej hodnosti *philosophiae doctor* (PhD.)

Miesto a dátum: V Bratislave, August 2023

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

Fakulta Elektrotechniky a Informatiky

Ústav Elektroniky a Fotoniky

Ing. Michal Hanic

**NÁVRH A PRÍPRAVA MERACIEHO PRACOVISKA PRE
CHARAKTERIZÁCIU ORGANICKÝCH TRANZISTOROV PRI
RÔZNYCH TEPLOTÁCH**

Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika

Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedeckej hodnosti *philosophiae doctor* (PhD.)

Miesto a dátum: V Bratislave, August 2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave Elektroniky a Fotoniky, Fakulte Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Uchádzač: Ing. Michal Hanic
Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky
a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

Oponenti:

doc. Ing. Mikuláš Bittera, PhD.
Ústav elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

doc. Mgr. Martin Kopáni, PhD.
Ústav lekárskej fyziky, biofyziky, informatiky a telemedicíny, Lekárska

Fakulta

Univerzita Komenského v Bratislave,
Sasinkova 2, 81108 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 31.8.2023, o 11 hod. pred skúšobnou komisiou obhajoby dizertačných prác v zasadačke Ústavu Elektroniky a Fotoniky, Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

S dizertáciou je možné sa oboznámiť na pedagogickom oddelení Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Prof. Ing. Viera Stopjaková, PhD.

Predseda programovej komisie

študijného odboru Elektrotechnika

Obsah

1.	Úvod	1
1.1	Tézy dizertačnej práce.....	6
2.	Experimentálne výsledky	7
2.1	Návrh meracej aparatury.....	7
2.1.1	Platforma DLTS	9
2.1.1.1	Kryogénny systém.....	9
2.1.1.2	Vákuový systém	10
2.1.2	Merací systém.....	11
2.1.2.1	Vákuová komora s elektronickou jednotkou	15
2.1.2.2	Kontaktovací systém	21
2.1.2.3	Optická hlava	24
2.1.2.4	Optický detektor	25
2.1.2.5	Teplotný stolček - držiak vzoriek	30
2.1.2.6	Ovládacia jednotka.....	31
2.2	Výrobný proces OTFT prvkov	32
2.3	Merania teplotných závislostí prúdov organického tranzistora v ustálenom režime	34
2.4	Merania teplotných závislostí prúdov organického tranzistora v tranzientnom režime	41
3.	Vlastný prínos	43
4.	Záver	44
5.	Conclusion	46
6.	Schlussfolgerung	48
7.	Publikačná činnosť	51
8.	Zoznam použitej literatúry	57

1. Úvod

V priebehu minulého storočia sme pozorovali obrovský pokrok v ľudskej spoločnosti hlavne vďaka pokroku vo vede a technike. Svoju hlavnú úlohu tu zohráva hlavne moderná elektronika ktorá využíva polovodiče pre aktívne elektronické prvky. Kremík, ako hlavný a najčastejší reprezentant polovodičov, je neodmysliteľnou súčasťou všetkých zariadení a rozvinutá spoločnosť si nedokáže predstaviť existenciu bez tohto materiálu. Napriek tomu sa v posledných desaťročiach pozornosť výskumu orientuje aj na alternatívne materiály. Okrem anorganických materiálov na báze karbidov (napr. SiC), nitridov (napr. GaN), prípadne oxidov (napr. Ga₂O₃) sa pozornosť sústreďuje aj na organické polovodiče. Jedná sa o skupinu materiálov využívajúce organické molekuly ako stavebné jednotky. Tieto materiály vykazujú niektoré vlastnosti podobné tým ktoré majú anorganické polovodiče a tak ich môžeme označiť organickými polovodičmi. Molekulárne materiály však poskytujú nové možnosti deponovania tenkých vrstiev, keďže neexistuje silná kovalentná väzba medzi molekulami. Na základe čoho je možné takýto organický polovodič odparovať vo vysokom vákuu aj pri pomerne nízkych teplotách, prípadne rozpustiť v organických rozpúšťadlách a využiť „mokré technológie“ na vytváranie tenkých polovodičových vrstiev. Treba poznamenať, že tieto materiály sa dajú zaradiť medzi intrinzné (nedopované) polovodiče a dopácia sa zatiaľ neukázala ako vhodný spôsob zlepšenia elektrických vlastností.

Ako prvý úspech v tejto oblasti sa dá považovať príprava MIS diódy (z *angl.* Metal-Oxide-Semiconductor diode, dióda kov-oxid-polovodič) využívajúcej polyacetány ako organický polovodič [1]. Táto práca z roku 1983 slúži ako overenie konceptu využitia organických materiálov ako možnej

alternatívy ku klasickým anorganickým polovodičom. O tri roky neskôr pán Tsumura, Kozuka a Ando, ktorí boli výskumníci zo súkromnej spoločnosti Mitsubishi Chemical publikovali prípravu organického poľom riadeného tranzistora (v *angl.* organic field-effect transistor, OFET) s polytiofénom ako organickým polovodičom [2]. Vzhľadom k tomu že efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja dosahovala iba úroveň 10^{-5} cm²/V.s, tak to bol revolučný výsledok preukazujúci potenciál tejto technológie. Za zmienku stojí poznamenať, že aj prvý organický solárny článok pripravil a opísal Tang v roku 1986 [3]. Prvá organická elektroluminiscenčná dióda (v *angl.* organic light-emitting diode, OLED) bola publikovaná dvojicou Tang a Van Slyke o rok neskôr, teda v roku 1987 [4]. Organický solárny článok a aj OLED vznikli vo výskumných oddeleniach súkromnej spoločnosti, čo v tomto prípade bola spoločnosť Eastman Kodak Company. Tieto úspechy boli začiatkom novej éry výskumu, kde sa pozornosť zamerala na využitie organických materiálov v známych štruktúrach elektronických prvkov. Nasledovalo desaťročné intenzívne výskum nových materiálov. Kým prvé elektronické prvky využívali nerozpustné polyméry ktoré sa deponovali ako monoméry a následne sa zosieťovali priamo na podložke slúžiace ako substrát, tak neskoršia príprava polo vodivých rozpustných polymérov [5] značne uľahčila prípravu aktívnych vrstiev elektronických prvkov. Bolo tak možné navrhnuť rôzne technológie deponovania (napr. využitie tlačiarenských technológií), ktoré zaistili zníženie nákladov prípravy elektronických prvkov. Avšak aj napriek tomu sa väčšina výskumných pracovísk zatiaľ pozerala na organické polovodiče s nepochopením a pochybnosťami. Preto ako ďalší dôležitý míľnik vo vývoji organickej elektroniky sa dá považovať publikácia od Gillesa Horowitza [6], kde opisoval organický tranzistor na základe upraveného konceptu klasickej fyziky polovodičov. Táto publikácia nie je dôležitá tým, že

by zaviedla nový fyzikálny náhľad na problém, ale práve naopak. Navrhovala že v organických materiáloch prístup pásmovej teórie známej z fyziky polovodičov je správny aj napriek tomu že tieto materiály nie sú dopované. Dôsledkom toho boli začaté rozsiahle výskumy využitie týchto materiálov a boli realizované výrazné investície súkromného sektora. V priebehu jedného desaťročia tak nastal dôležitý pokrok v oblasti organickej elektroniky, ktorá sa tak etablovala ako novovznikajúci odbor. A to nie len v akademickej, respektíve výskumnej sfére, ale aj komerčnej. Organické solárne články dnes dosahujú účinnosť nad 18% [7], čo je výrazne lepšie ako bežne využívané solárne články na báze amorfného alebo nanokryštalického kremíka. Displeje využívajúce OLED sa stali novou generáciou nielen pre ich využitie v televíznej technike, ale hlavne pre prenosné zariadenia vyžadujúce nízku spotrebu energie. Rovnako aj svietidlá na báze OLED si našli svoje miesto na trhu. Práve toto očakávané široké uplatnenie organickej elektroniky v ľudskej spoločnosti je tou hybnou silou súčasného vývoja. Technológie používané pre organickú elektroniku sľubujú kvalitné a cenovo dostupnejšie elektronické zariadenia, ktoré budú poskytovať aj pridanú hodnotu ako napr. priehľadnosť, nižšiu hmotnosť, ohybnosť, atď. V neposlednom rade je využitie organickej elektroniky aj výrazne menšou environmentálnou záťažou v porovnaní s anorganickou elektronikou a to ako z pohľadu energetickej náročnosti technologických procesov výroby, tak aj neskoršej recyklácie zariadení z týchto materiálov. Môžeme preto očakávať rozvoj budúceho trhu s organickou elektronikou hlavne v týchto oblastiach, ktoré sú zobrazené aj na obrázku 1:

- Pamäte a logické obvody: nízka výrobná cena a flexibilita sú zaujímavé hlavne pre aplikácie „smart“ obalov (rádiofrekvenčných identifikátorov, RFID)

- Displeje: vysoká kvalita oproti LCD displejom a nízka cena oproti anorganickým LED stavia OLED do popredia. Navyše ohybné substráty poskytujú mechanickú odolnosť displejov.



Obr. 1. Významné oblasti trhu s organickou elektronikou [8].

- OLED osvetlenie: lacné a energeticky efektívne osvetlenie s farebným spektrom príjemným pre človeka je hľadanou alternatívou pre anorganické LED
- Fotovoltika: lacné organické materiály sa už dnes stali plnohodnotnou náhradou pre kremíkové fotovoltaické panely.
- Lekárska elektronika: monitoring pacientov a prevencia chorôb vytvárajú trh pre senzorké aplikácie ktoré musia byť cenovo dostupné.

Aj keď tieto predpoklady robia organickú elektroniku sľubným variantom vývoja elektroniky a techniky, elektronické obvody založené na organických tranzistoroch sú zatiaľ len v štádiu výskumu. Rovnako ako pre organické solárne články a OLED displeje aj tu nastal výrazný pokrok v technológiách, avšak

ukazuje sa že pre vyžadované zlepšenie elektrických vlastností je potrebné najprv lepšie pochopiť fyzikálnu podstatu týchto elektronických prvkov. Napriek počiatočnému nadšeniu sa ukázalo, že fyzikálna podstata transportu náboja je odlišná od klasických anorganických polovodičov. Navyše sa ukázal problém s miniaturizáciou prvkov. Organické tranzistory so submikrónovým kanálom prestali vykazovať riadenie toku prúdu v kanáli pomocou elektrického poľa aplikovaného cez hradlovú elektródu. Výskum ukázal že limitujúcim faktorom je parazitný odpor na rozhraní kov/organický polovodič na kontaktoch source a drain. Tento nežiadúci jav sa označuje ako kontaktný odpor a je jedným z hlavných limitujúcich faktorov pre miniaturizáciu prvkov alebo zvýšenie pracovnej frekvencie pripravených obvodov využívajúcich organické poľom riadené tranzistory. A aj práve vďaka výraznému pokroku v chemickom inžinierstve, ktorý nám poskytol organické polovodiče s efektívnou pohyblivosťou uplatniteľnou v praktických aplikáciách, sa práve kontaktný odpor stáva doteraz málo preskúmaným a napriek tomu výrazne limitujúcim javom.

1.1 Tézny dizertačnej práce

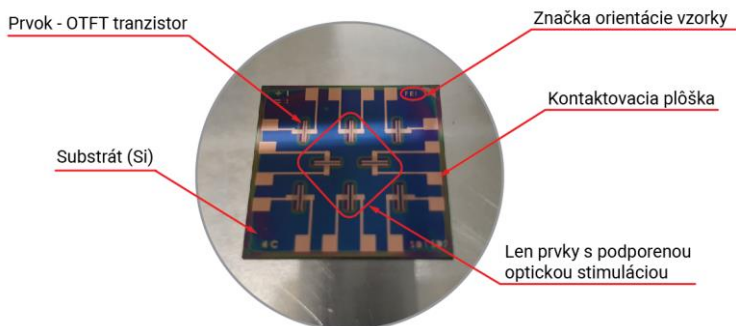
Štandardné prístupy charakterizácie polovodičov častokrát nie sú vhodné pre organické materiály a tak je potrebné vyvinúť nové metodológie alebo nové experimentálne systémy pre charakterizáciu elektrických či fyzikálnych parametrov organických polovodičov alebo elektronických prvkov na nich založených. Preto ciele dizertačnej práce boli stanovené nasledovne:

1. Vykonať prehľad súčasného stavu znalostí o organických polovodičoch, ich elektrických vlastnostiach, a technike pre meranie pri nízkych teplotách.
2. Vykonať návrh a zostrojiť komoru krogénneho systému pre elektrické merania organických tranzistorov s možnosťou merania rôznych prvkov na jednom substráte bez prerušenia vakuu či zmeny teploty meraných prvkov.
3. Vykonať elektrické merania v ustálenom stave na organickom tranzistore s pentacénom ako organickým polovodičom a kovovými elektródami z Au alebo Ag pri rôznych teplotách. Určiť aktivačné energie základných elektrických parametrov tranzistora.
4. Vyhodnotiť kontaktný odpor organických tranzistorov s pentacénom ako organickým polovodičom a kovovými elektródami z Au alebo Ag. Určiť teplotnú závislosť kontaktných odporov a vyhodnotiť ich aktivačné energie pre prvky s rôznymi kovovými elektródami.
5. Overiť možnosť merania tranzientných prúdov po pripojení napäťového skoku na organický tranzistor s pentacénom ako organickým polovodičom pri rôznych teplotách. Pozorovať tranzientné prúdy pre sériu rôznych dĺžok kanála za účelom rozlíšenia injekčných a transportných javov.

2. Experimentálne výsledky

2.1 Návrh meracej aparatúry

Hlavným cieľom tejto časti práce je návrh a realizácia unikátnej meracej aparatúry, ktorej účelom je umožniť meranie a charakterizáciu elektrických parametrov organických polovodičových štruktúr pri nízkych respektíve kryogénnych teplotách. Našimi cieľovými štruktúrami sú hlavne tenko vrstvomé organické tranzistory (OTFT). V experimentoch sme použili štruktúry OTFT vytvorené na kremíkovom substráte rozmerov 18x18 mm s hrúbkou 0,5 mm, ktorá je zobrazená na obrázku 2. Počet prvkov na štruktúre je 8, pričom elektródy týchto prvkov sú formou kontaktných plôšok s rozmermi 2x2 mm. Týchto 16 kontaktov je vyvedených po vonkajších okrajoch substrátu. Každá strana substrátu obsahuje 4 kontaktné plôšky. Spodná časť kremíkového substrátu slúži ako hradlová elektróda, na ktorú je potrebné pripojiť elektrický kontakt.



Obr. 2. Vzorka substrátu s 8 prvkami OTFT na báze pentacénu.

Meracia aparatúra má spĺňať nasledujúce požiadavky pri zabezpečení vysokej presnosti a opakovateľnosti meraní:

- Merania pri teplotných rozsahoch od (130K do 400K)
- Zabezpečenie ochranej atmosféry meraných štruktúr voči vplyvom okolitého prostredia
- Jednoduchá obsluha systému aparatury
- Možnosť automatizácie systému aparatury cez PC
- Modifikovateľnosť pre rôzne typy experimentov
- Možnosť nakontaktovania veľkého počtu prvkov na jednej vzorke – štruktúre
- Funkcia výberu a pripojenia konkrétneho prvku na štruktúre pre merací systém ako je Analyzátor Keysight B1500A a podobne
- Jednoduché kontaktovanie prvkov na štruktúrach pri výmene vzorky
- Teplotná stabilita štruktúr pri meraniach
- Eliminovanie elektromagnetického rušenia z okolitého prostredia
- Zabezpečenie stabilných svetelných podmienok pri meraniach
- Možnosť optickej stimulácie prvkov na štruktúre
- Monitorovanie intenzity optického žiarenia v komore
- Nízke energetické nároky a napájacia kompatibilita systému aparatury

Pri návrhu a neskôr aj realizácii systému meracej aparatury sme zvolili platformu, ktorá je postavená na kryostate a využíva pre dosiahnutie kryogénnych teplôt tekutý dusík LN₂. K tejto voľbe sa pristúpilo najmä z dôvodu, že je to veľmi výhodný východiskový bod pre požadované experimentálne účely, nakoľko z fyzikálneho hľadiska sú pre naše experimentálne potreby dostačujúce tepelné rozsahy do 77K (-196.15°C). Na základe neskorších experimentov sa presne ukáže, aké nízke teplotné rozsahy sú reálne potrebné a vyžadované pre dané experimenty. Už teraz však vieme odhadnúť, že v rámci sledovaných vplyvov na elektrické parametre pri

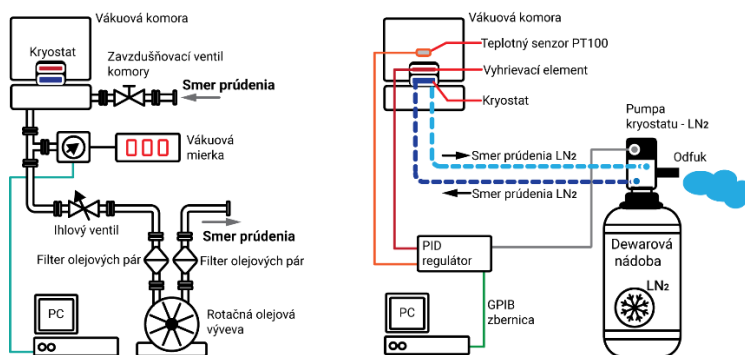
charakterizácií organických polovodičových prvkov OTFT nebude potrebné ísť nižšie ako je 100K (-173.15°C), čím sa potvrdilo, že voľba kryostatu s LN₂ je aktuálne dobrou voľbou. Aby sa proces prototypovania stal efektívnejší, využili sme už jestvujúci komerčný kryogénny systém DLTS (**Deep Level Transient Spectroscopy**) a to DL8000 od spoločnosti BIO-RAD Micromasurement (ďalej len systém DLTS). Z tohto systému DLTS sa využíva iba kryogénna časť a vákuový systém bez analyzačnej časti. Ako už bolo spomenuté v teoretickej časti pre zabezpečenie ochrannej atmosféry meraných štruktúr a pre dosiahnutie nízkych teplôt v danom rozsahu je dôležité vákuum. V našom prípade v zmysle daných teplotných rozsahov, nie je nevyhnutné dosahovať ultravysoké vákuum (UHV) alebo vysoké vákuum (HV). Pre potreby tohto systému je postačujúce nízke až stredné vákuum na úrovni 1 Pa až 0,1 Pa, respektíve 1×10^{-2} torr až 1×10^{-3} torr. Toto vieme dosiahnuť pomocou rotačnej olejovej vývevy alebo membránovej vývevy. Hlavnou výhodou membránovej vývevy je, že je bez olejová. Tým nekontaminuje vnútorný komorový systém a súčasti meracej aparatúry spätným prúdením olejových pár, ako je to v prípade olejovej rotačnej vývevy, kde je nutné inštalovať lapač olejových pár. Tento po istej dobe následne vymieňať a čistiť. Značnou výhodou membránovej vývevy je, že z veľkej časti je bez údržbová.

2.1.1 Platforma DLTS

2.1.1.1 Kryogénny systém

V systéme DLTS je použitý prietokový kryostat. Jeho teplota sa nastavuje ovládaním prietoku kryogénnej kvapaliny (LN₂) a elektrického ohrevu (vyhrievací rezistor) pomocou proporcionálneho, integračného a derivačného (PID) regulátora. Týmto spôsobom je možné dosiahnuť teplotnú stabilitu s presnosťou lepšou ako 0,1K. Meranie teploty kryostatu sa

deje prostredníctvom teplotného senzora PT100, ktorý má v závislosti od vyhotovenia teplotný rozsah -200°C až 850°C . Meranie teploty prostredníctvom PT100 sa realizuje štvorvodičovou metódou, ktorá je vyvedená do PID regulátora. V prípade dostatočnej úrovne vákuua je kryostat schopný dosiahnuť teploty okolo 90K. Kryogénny systém DLTS je zobrazený na obrázku 3 a pozostáva z kryostatu umiestneného v spodnej časti priestoru vákuovej komory. Tekutý dusík je touto pumpou preháňaný cez kryostat a je tak vytvorený cirkulačný okruh. Pumpa kryostatu je poháňaná elektrickým motorom, ktorý je riadený priamo cez PID regulátor. Na dosiahnutie vysokých teplôt a stabilizácie teploty obsahuje kryogénny systém elektrický ohrev pomocou vyhrievacieho rezistoru, ktorý je taktiež riadený priamo z PID regulátora.



Obr. 3. Bloková schéma vákuového systému vľavo a kryogénneho systému vpravo.

2.1.1.2 Vákuový systém

Vákuový systém DLTS, ktorý je zobrazený na obrázku 2.2 pracuje s tlakom okolo 1,3 Pa. Tým vytvára prostredie v ktorom môže kryostat dosahovať teploty 90K ako už bolo spomenuté vyššie. Systém je tvorený vákuovou komorou so zavzdušňovacím ventilom, ktorá je následne prepojená

prostredníctvom T kusu s vákuovou mierkou a ďalej pokračuje cez ihlový ventil a filter olejových pár do rotačnej olejovej vývevy. Vákuové rozvody sú z nerezovej ocele s prírubami KF16 a KF25. Úlohou zavzdušňovacieho ventilu je dorovnať tlak vo vákuovej komore aby ju bolo možné otvoriť. Prostredníctvom vákuovej mierky sa monitoruje úroveň vakuu v systéme, keď táto hodnota dosiahne požadovanú stabilnú hodnotu je možné spustiť kryostat. Úroveň vakuu sa zobrazuje na prednom displeji a taktiež sa táto hodnota prenáša do PC. Ihlový ventil slúži pre reguláciu prietoku a čerpacej rýchlosti. V prípade ak sa vákuová komora vyčerpá na požadovanú úroveň je možné uzavrieť ihlový ventil úplne, čím sa zamedzí spätnému prúdeniu olejových pár do komory. Toto je nežiadúce z dôvodu kontaminácie olejom všetkých vnútorných častí vákuovej komory vrátane vzorky. Filter olejových pár, prípadne lapač olejových pár zamedzuje spätnému prúdeniu olejových pár. Rotačná olejová výveva vytvára v systéme požadované vákuum na úrovni približne 1,3 Pa.

2.1.2 Merací systém

Mohlo by sa zdať, že postaviť systém meracej aparatury na časti existujúceho systému, sa proces návrhu výrazne zjednoduší, ale nie je to celkom tak. Dosiahli sme síce zjednodušenie vo forme upustenia od návrhu a vývoja kryogénnej a vákuovej časti, no komplikácie prišli pri návrhu jednotlivých funkčných častí meracej aparatury do jestvujúcej technickej platformy. Pôvodné riešenie pre účely meraní systémom DLTS, je výrazne technicky jednoduchšie a zároveň aj veľkostne menšie. Dôsledkom toho bolo nevyhnutné vyrobiť nový merací systém s novou komorou. Týmto vznikol problém s rozhraniami jestvujúceho systému, s ktorými budú interagovať jednotlivé časti vyvíjanej meracej aparatury. Najvýznamnejšie a zároveň kritické rozhrania z pohľadu ich funkčnosti sú:

- *Teplotný stolček – držiak vzoriek*
je kritickým článkom z pohľadu prenosu teploty na vzorku substrátu, pričom tvorí rozhranie s kryostatom jestvujúceho systému. V tomto prípade návrhu bolo potrebné vyriešiť mnoho problémov spojených s teplotnými mostami. Teda tepelnou vodivosťou, elektrickou vodivosťou, elektrickou izoláciou, taktiež aj mechanické problémy. Od kvality návrhu a realizácie držiaka vzoriek závisí výsledná účinnosť celkového systému meracej aparatury.
- *Spodná príruha komory*
je taktiež kritickou časťou z pohľadu vákuu a je potrebné ju dobre technologicky zvládnuť. Príruba komory spolu s prírubou systému DLTS tvorí rozhranie dôležité z pohľadu hodnoty vákuu.
- *Podstava kontaktovacieho systému*
je rozhranie tvorené podstavou kontaktovacieho systému spolu s distančnými stĺpkami DLTS systému, ku ktorým sa podstava pripieňuje. Pritom je potrebné, aby bola umožnená prípadná pozičná korekcia vzhľadom na výslednú polohu držiaka vzorky, najmä pre správne nakontaktovanie pružinových testovacích hrotov.

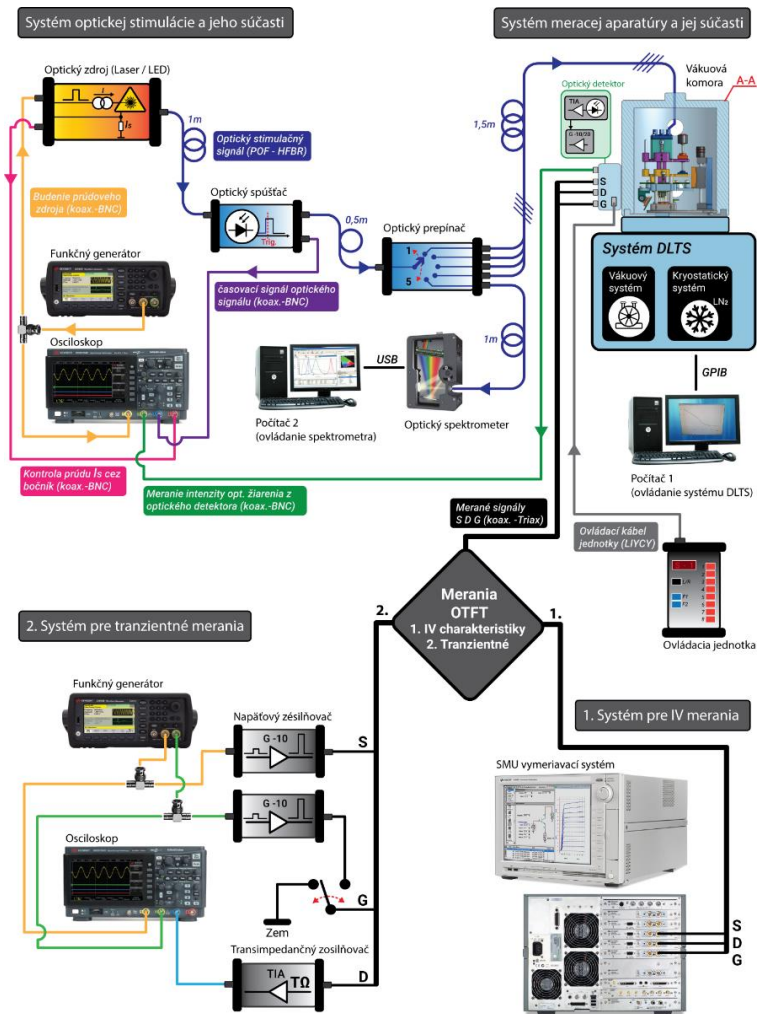
Ako už bolo spomenuté, meracia aparatura slúži pre charakterizáciu organických polovodičových štruktúr. Aby bolo možné vykonávať tieto merania za potrebných podmienok musí merací systém aparatury obsahovať, niekoľko dôležitých častí, ktoré sú popísané nižšie. Na obrázku 4 je zobrazená bloková schéma jednotlivých častí systému meracej aparatury, kde je zároveň prezentovaná funkčnosť jednotlivých častí ako jeden výsledný systémový celok.

- *Vákuová komora*

Nevyhnutná pre vytvorenie požadovaných podmienok pre realizáciu meraní.

- *Kontaktovací systém*

Vytvára elektrické rozhranie pre prepojenie meranej vzorky s analyzačným systémom.



Obr. 4. Bloková schéma s popisom prepojenia jednotlivých častí systému meracej aparatury.

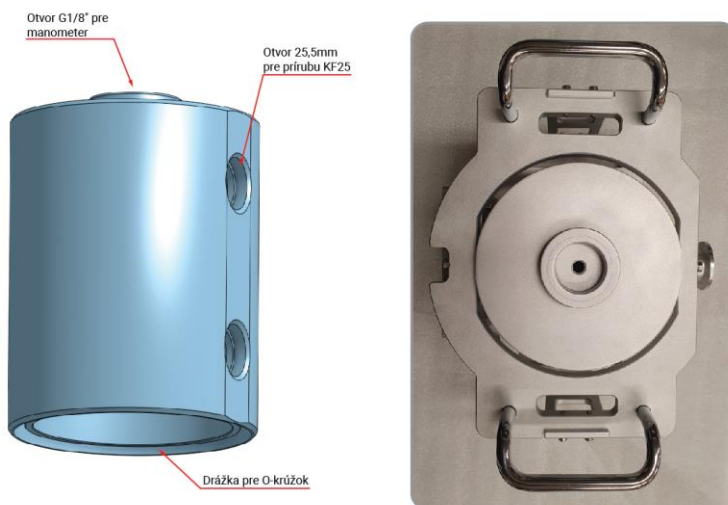
- *Držiak vzoriek*
Zabezpečuje požadovanú teplotu meranej vzorky.
- *Optická hlava*
Slúži pre optickú stimuláciu meranej vzorky prostredníctvom optických vlákien.
- *Optický detektor*
Jeho úlohou je snímanie optického žiarenia vo vákuovej komore počas meraní.
- *Ovládacia jednotka*
Vykonáva ovládanie celého systému meracej aparatúry.
- *Podporné systémy*
Zabezpečujú sekundárne úlohy, ktoré slúžia pre rozšírenie možností meraní vzoriek. Takými to sú

optický zdroj (slúži pre vytvorenie optického žiarenia a jeho naviazanie do optického vlákna), **optický spúšťač** (jeho úlohou je detekcia optického žiarenia v optickom vlákne a taktiež vyslať signál vo forme elektrického impulzu), **optický prepínač** (zabezpečuje prepínanie medzi jedným vstupným optickým vláknom a piatimi výstupnými vláknami smerujúcimi do optickej hlavy a optického spektrometra), **napäťový zosilňovač** (slúži pre napäťové zosilnenie vstupného signálu v požadovanom rozsahu).

2.1.2.1 Vákuová komora s elektronickou jednotkou

Veľkosť, respektíve objem komory sa odvíja od rozmerov kontaktovacieho systému a technických požiadaviek vyplývajúcich z účelu meraní. Komora

musela obsahovať dostatok možností pre modifikácie, ktoré vychádzajú z rôznych typov meraní, ktoré sa majú realizovať. Na komore je umiestnená elektronická jednotka. Prostredníctvom tejto jednotky sa zapína a vypína celý systém meracej aparatúry. Jednotka obsahuje taktiež aj napájací a komunikačný konektor umiestnený na jej bočnej strane. Finálna verzia vákuovej komory (obrázok 5), obsahuje niekoľko otvorov, v ktorých budú rozhrania pre elektrické a optické signály, alebo čerpanie/napúšťanie plynov. V spodnej časti komora sa nasadzuje na prírubu DLTS systému pre vytvorenie vákuua pre kontaktovací systém s kryostatom.

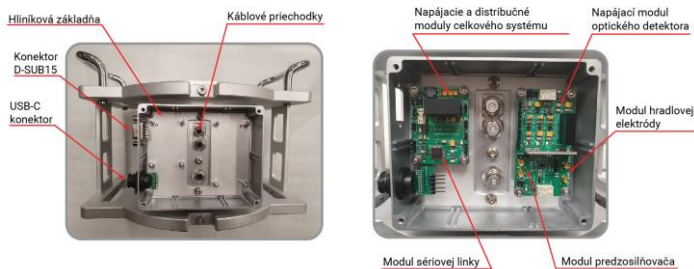


Obr. 5. Vľavo návrh samotnej komory pred výrobou. Vpravo je vyrobená komora osadená do manipulačnej klietky.

V hornej časti komory bol vytvorený otvor do ktorého bol inštalovaný vákuový merač tlaku. Tento poskytuje iba informatívnu hodnotu o veľkosti vákuu ak by bola elektronická vákuová mierka vypnutá. Dva otvory na bočnej strane komory boli vytvorené pre inštaláciu vákuových prírub KF25. Ich účelom je poskytnúť prístup do komory pre rôzne typy elektrických, optických, plynových či iných rozhraní. Samotná komora bola vyrábaná z duralovej guľatiny pomocou CNC obrábacích systémov.

- **Elektronická jednotka**

Elektronická jednotka je zobrazená na obrázku 6. Jej puzdro je vyrobené z hliníka. Táto jednotka je inštalovaná priamo na vonkajšej strane plášťa komory v mieste, kde sú vytvorené otvory pre 3 káblové priechodky.



Obr. 6. Elektronická jednotka. Vľavo bez modulov, vpravo s osadenými modulmi.

V spodnej časti puzdra je vyfrézovaný otvor pre spomínané 3 káblové priechodky. V puzdre je inštalovaná hliníková základňa s výrezmi pre presné osadenie dosiek plošných spojov (ďalej len **DPS**) s jednotlivými modulmi. Veľkosť puzdra bola zvolená, tak aby sa tam zmestili všetky potrebné časti, no zároveň aby svojou veľkosťou veľmi nezasahovalo do okolitého priestoru. Na jej bočnej strane boli vytvorené otvory pre

napájací konektor typu USB-C a komunikačný konektor D-SUB15 ovládacej jednotky. Horný kryt puzdra obsahuje hlavný vypínač (ON/OFF) celého systému meracej aparatury, ovládacie prvky optického detektora, a izolované BNC konektory. Cez ne sa pripája merací systém (analyzátor B1500A) ku kontaktovaciemu systému a následne k jednotlivým prvkom štruktúry, prostredníctvom elektród drain, source a hradlovej elektródy. Elektronická jednotka obsahuje napájacie a distribučné moduly, modul sériovej komunikačnej linky, modul pripájania hradlovej elektródy a modul predzosilňovača optického detektora.

➤ *Napájací a distribučný modul.*

Jeho úlohou je zabezpečiť stabilné napájanie a distribúciu potrebných napätí pre celý merací systém aparatury. Celkovo sa systém napája prostredníctvom USB-C rozhrania s napätím 5 V a prúdovým odberom do 1 A. V zmysle zabezpečenia kvalitného napájania, odolnosti voči rušeniu a interferenciám zo siete, je tento modul realizovaný prostredníctvom DC/DC modulov, ktoré poskytujú napájanie v stanovenej kvalite.

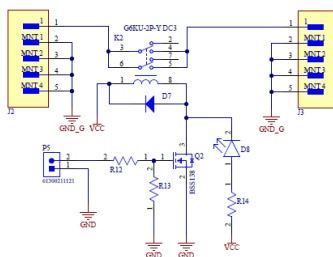
➤ *Modul sériovej komunikácie.*

Tento modul je tvorený integrovaným obvodom FT232BL, ktorého úlohou je vytvoriť rozhranie USB na sériovú linku UART a naopak. Konektor USB-C, prostredníctvom ktorého je celý systém napájaný, slúži zároveň aj ako komunikačné rozhranie sériovej linky. Táto slúži na vytvorenie komunikačného rozhrania medzi PC a elektronickou jednotkou, kde na základe spracovania príkazov v mikropočítači, prebiehajú následne požadované procesné úkony. Pre ovládanie a riadenie automatizačného procesu na PC, je potrebné mať vytvorený ovládací softvér

s grafickým rozhraním, pričom tento softvér musí okrem komunikácie s elektronickou jednotkou komunikovať a riadiť kryogénnu jednotku DLTS systému a analyzačný systém.

➤ *Modul pripájania hradlovej elektródy.*

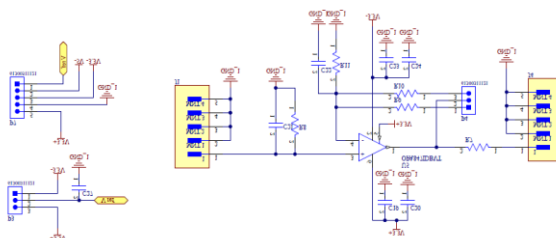
Tento obvod slúži pre pripájanie a odpájanie hradlovej elektródy vzorky substrátu s OTFT prostredníctvom relé K2, ktoré sú riadené z ovládacej jednotky v režime ON/OFF. Táto možnosť je zavedená z dôvodu, že pri niektorých meracích procesoch je potrebné mať hradlovú elektródu odpojenú. Vstup aj výstup signálu v obvode je riešený cez koaxiálne konektory MMCX. Signál sa do modulu hradlovej elektródy privádza zo spodnej strany substrátu nakontaktovaného v šuplíku v rámci držiaka vzorky vo vákuovej komore. Výstup signálu je smerovaný von cez izolovaný BNC konektor. Hradlová signálna zem, nie je spájaná ani inak prepájaná. Je priamo vyvedená prostredníctvom izolovaného BNC konektora von z riadiacej jednotky. Schéma zapojenia modulu pripájania hradlovej elektródy je zobrazená na obrázku 7. Na obrázku 9 je zobrazená DPS modulu pripájania hradlovej elektródy spolu s ďalšími modulmi.



Obr. 7. Schéma zapojenia modulu pripájania hradlovej elektródy.

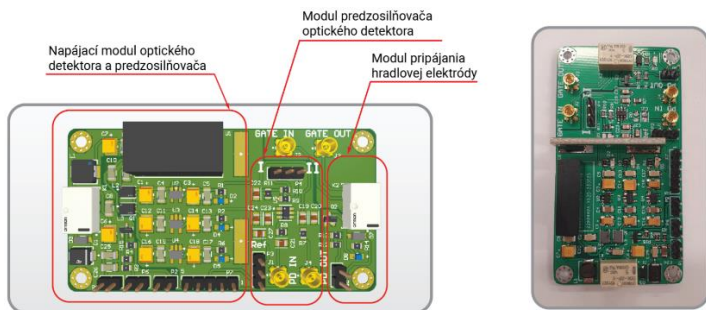
➤ *Modul predzosilňovača optického detektora.*

Úlohou predzosilňovača je zosilniť signál z optického detektora umiestneného v komore na požadovanú úroveň. Jedná sa o zapojenie operačného zosilňovača v neinvertujúcom režime s možnosťou prepínania zosilnenia v rozsahu 10 až 20 krát. Ide o pomerne jednoduché zapojenie (obrázok 8), ktoré bolo pred samotnou realizáciou odsimulované prostredníctvom programu TINA od spoločnosti Texas Instruments. Simulácia bola vykonaná ako súčasť optického detektora v spoločnom zapojení s transimpedančným zosilňovačom. Prepínanie zisku je možné realizovať pomocou prepínača, ktorý bol vyvedený na predný panel riadiacej jednotky. Ako operačný zosilňovač bol použitý OPA357.



Obr. 8. Schéma zapojenia modulu predzosilňovača optického detektora.

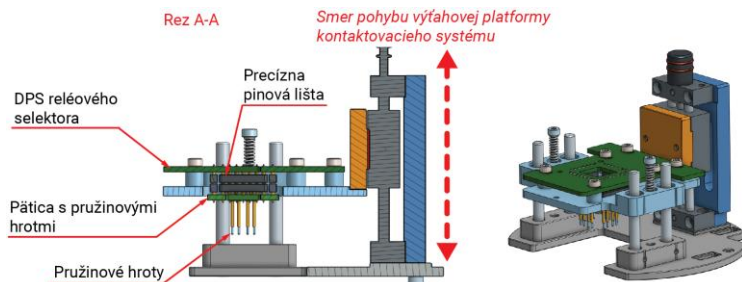
Na obrázku 9 je zobrazená DPS modulu predzosilňovača optického detektora spolu s ďalšími modulmi.



Obr. 9. Návrh DPS obsahujúci všetky uvedené moduly. Vpravo je reálne osadená doska všetkých modulov.

2.1.2.2 Kontaktovací systém

Hlavnou funkciou kontaktovacieho systému meracej aparatury je umožniť elektrickú charakterizáciu jednotlivých prvkov OTFT na štruktúre. V zmysle požiadaviek bolo potrebné aby systém bol schopný nakontaktovať všetky prvky štruktúry súčasne a následne elektronicky vybrať konkrétny prvok. Pri návrhu konštrukcie kontaktovacieho systému, sa vychádzalo z rozmerov substrátu štruktúry ktorú bolo potrebné kontaktovať, rozmiestnenia kontaktovacích plôšok na substráte a rozmerov podstavy vákuového systému DLTS, kde sa konštrukcia mala inštalovať. Taktiež boli zohľadnené v návrhu aj ďalšie systémové časti ako optická hlava a optický detektor. Na obrázku 10, je zobrazené mechanické prevedenie systému s popisom kľúčových častí. Časť kontaktovacieho systému delíme na 2 funkčné celky a to na mechanickú a elektrickú časť.



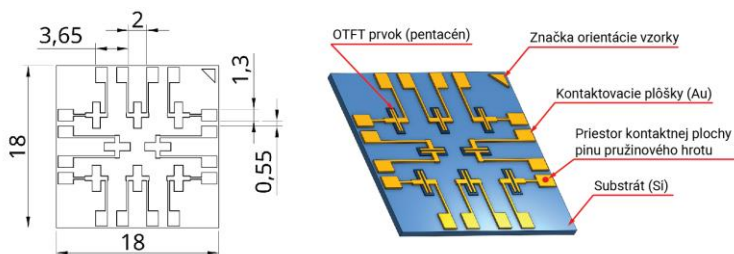
Obr. 10. Spôsob osadzovania pružinových hrotov do päťice.

- **Mechanická časť**

Pri teplotných meraniach vykonávaných v širokých teplotných rozsahoch s vyššími dynamickými zmenami nie je možné používať kontakty na báze pevných spojov pre vznik mechanických pnutí, ktoré by mohli zapríčiniť poškodenie vzorky alebo kontaktov. Použitím pružinových hrotov sa vyriešilo mnoho problémov pri kontaktovaní ako je mechanické pnutie spojov, stabilný elektrický kontakt, presne definovaný prítlak a podobne.

- *Kontaktovacia päťica*

V rámci návrhu kontaktovacej päťice pružinových hrotov sa vychádzalo jednak z rozmerov substrátu vzorky, ale najmä z polohy rozmiestnenia jednotlivých kontaktovacích plošok na substráte, cez ktoré sú nakontaktované prvky OTFT. Na obrázku 11 je zobrazená topológia OTFT na substráte s popisom ich rozloženia, používaná pre výrobu masiek OTFT. Všetky vyznačené rozmery sú v jednotkách milimetrov.

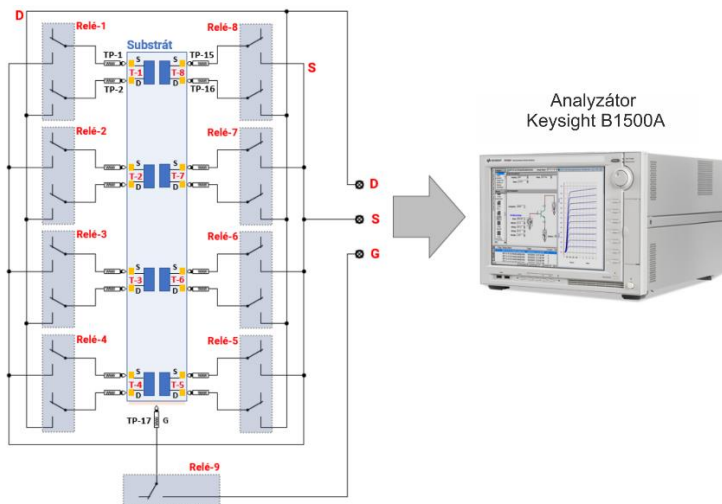


Obr. 11. Spôsob osadzovania pružinových hrotov do päťice.

V rámci návrhu kontaktovacej päťice, boli použité pozlátené pružinové hroty. Celkovú silu F_c respektíve celkovú hmotnosť m_c bolo potrebné rozložiť na povrch vzorky substrátu rovnomerne, aby sa zabezpečil rovnaký prítlak pozdĺž celého obvodu vzorky. Z tohto dôvodu bolo nevyhnutné aby pružinové hroty boli osadené kolmo zvierajúc uhol 90° , rovnobežne medzi sebou a v rovnakej výške. Riešením pre osadenie hrotov s požadovanou presnosťou a precíznosťou bolo osadenie pružinových hrotov do päťice, ktorá je na báze dosky plošného spoja, ktorá zároveň vytvára rozhranie medzi mechanickou a elektronickou časťou.

- **Elektronická časť**

Elektronickú časť kontaktovacieho systému tvorí doska reléového selektora, ktorý zabezpečuje prepínanie signálnej cesty signálov source (S), drain (D) a hradlovej elektródy gate (G) medzi pružinovými hrotmi a analyzátorom B1500A, prípadne iným systémom. Konkrétnou voľbou kanála cez multiplexor a relé sa určuje, ktorý prvok na štruktúre vzorky bude elektricky pripojený k analyzátoru. Pri návrhu elektronickej časti reléového selektora sa vychádzalo z blokovej schémy zobrazenej na obrázku 12.

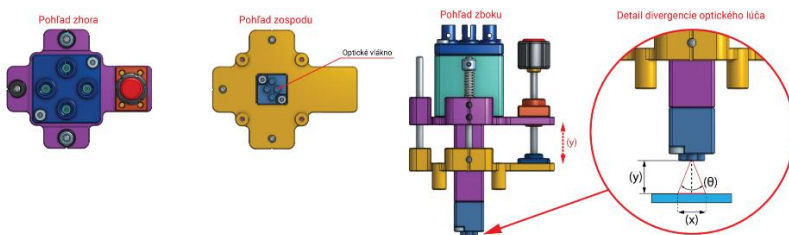


Obr. 12. Bloková schéma reléového selektora s analyzátorom Keysight B1500A.

2.1.1.2.3 Optická hlava

Pre možnosť optickej stimulácie prvkov na štruktúre, bolo potrebné navrhnuť systém, ktorý by to umožňoval. V tomto návrhu vznikol pojem *optická hlava*, ktorým sa výsledný diel označuje. Pri návrhu bolo potrebné zväžiť priestorové a technologické možnosti vyplývajúce z daného stavu. Pri tom systém optickej stimulácie nesmel nijakým spôsobom ovplyvňovať a zasahovať do funkčnosti spomínaných častí. Optická hlava musela byť súčasťou kontaktovacieho systému. Tým, že kontakty prvkov OTFT boli vyvedené po vonkajšej strane substrátu a v strednej časti sa nenachádzala žiadna prekážka, bolo jasné, že optická hlava musela byť umiestnená do strednej časti kontaktovacieho systému. Z daných požiadaviek a malého priestoru vyplynulo, že pre prívod optického žiarenia bude musieť byť použité optické

vlákno. Pre čo najlepšie naviazanie optického výkonu do každého prvku na substráte, bolo rozhodnuté opticky stimulovať 4 zo všetkých 8 OTFT prvkov. Použitie optického vlákna pre každý prvok má svoje výhody, nakoľko je veľmi dobre definovateľná plocha dopadajúceho optického výkonu vzhľadom na divergenciu zväzku optického lúča. Vzťah divergencie lúča od vzdialenosti optickej hlavy a vzorky je zobrazený na obrázku 13. Tiež sú zobrazené aj jednotlivé pohľady optickej hlavy na rozhrania vstupu a výstupu optického žiarenia. Pre zachovanie flexibility systému sme rozhodli, že optické vlákna nebudú k optickej hlave pripevnené napevno, ale prostredníctvom optických konektorov. Ako optické vlákno bolo zvolené plastové optické vlákno POF (z angl. Plastic optical fiber) s priemerom jadra 980 μm a celkovým priemerom optického vlákna 2,2 mm od spoločnosti Broadcom. K tomuto typu vlákna je dodávaný aj systém konektorov a spojok od rovnakého výrobcu s typovým označením HFBR, ktorý je taktiež používaný v meracej aparatúre.



Obr. 13. Zobrazenie vzťahu divergencie k zmene vzdialenosti vertikálnej výšky optickej hlavy od základne s pohľadmi na rozhrania vstupu a výstupu optického žiarenia.

2.1.2.4 Optický detektor

Snímanie intenzity optického žiarenia poskytuje informáciu o veľkosti optického žiarenia ktorým je prvok na vzorke substrátu stimulovaný a taktiež aj v akom pracovnom bode daný prvok pracuje. Hlavnou úlohou optického

detektora bola možnosť kvantifikácie intenzity optického žiarenia vo vákuovej komore, ktoré je tam privedené cez optické vlákna. Na základe tejto informácie je možné riadiť veľkosť privádzaného optického výkonu žiarenia. Návrh optického detektora bolo možné rozdeliť na návrh mechanickej časti a na návrh elektronickej časti.

- **Mechanická časť**

Pri mechanickej stránke bolo potrebné dodržať požiadavky nadradených častí ako je napríklad kontaktovací systém sa držiak vzorky, kde sa vyžadovalo aby optický detektor nijakým spôsobom nezasahoval do funkčnosti týchto častí. Detektor bolo potrebné umiestniť čo najbližšie ku vzorke substrátu s možnosťou nastavovania polohy detektora v malom rozsahu a možnosťou aretácie zvolenej polohy. Optický detektor je osadený na obojstrannej doske plošného spoja, aby sa zmestila do inštalovaného priestoru. Držiak optického detektora spolu s DPS boli navrhované súčasne s cieľom zabezpečiť čo najlepšiu manipuláciu v stiesnenom priestore.

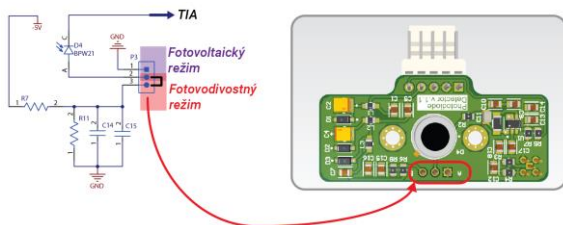
- **Elektronická časť**

Elektronickú časť optického detektora možno rozdeliť z pohľadu funkčnosti na návrh častí samotného detektora, transimpedančného zosilňovača, predzosilňovača a napájacieho zdroja. Predzosilňovač a napájací zdroj už boli popísané v kapitole 2.1.2.1, kde sú tieto dve časti ako moduly umiestnené.

Detektor

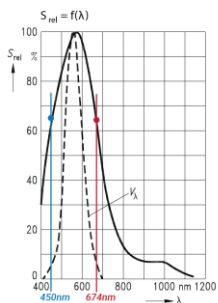
Kritéria pre výber vhodnej fotodiódy ako optického detektora boli stanovené na základe plánovaných optických meraní. Vzhľadom, že optické merania mali byť realizované na prvkoch OTFT, ktoré boli pripravované na báze

materiálov ako pentacén a dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT), sa rozsah detekčného spektra vlnových dĺžok odvíjal od absorpčných charakteristík týchto materiálov. Pre materiál pentacén sa najväčšia absorpcia optického žiarenia nachádza v oblasti vlnovej dĺžky približne 674nm, čomu zodpovedá červená farba. Materiál ako je DNNT má najväčšiu absorpciu optického žiarenia v oblasti vlnovej dĺžky približne 450 nm, čomu zodpovedá modrá farba. Vzhľadom na to, že spomínané organické materiály majú absorpčné spektrá prevažne v oblastiach VIS a UV, tak fotodióda bola zvolená na maximálnu citlivosť v tejto oblasti. Ďalším kritériom bolo, že frekvenčný rozsah meraní, bude na frekvenciách rádovo jednotky Hz až jednotky kHz s pomerne veľmi nízkou intenzitou optického žiarenia. Zapojenia optického detektora bolo zvolené tak, aby mohol pracovať vo fotovoltaickom aj fotovodivostnom režime. Výber vhodného režimu fotodiódy sa odvíja od typu merania. Každý pracovný režim fotodiódy má svoje výhody a nevýhody. V tomto návrhu je prevažne používaný fotovoltaický režim, nakoľko sa preferovali vlastnosti ako nulový prúd za tmy, lepšia lineárna závislosť a nízky šum, no otestovaný bol aj fotovodivostný režim pre frekvenčné merania. Uvedenie fotodiódy do konkrétneho režimu prebieha na základe pripojenia anódy fotodiódy buď k zemi (fotovoltaický režim), alebo k závernému napätiu (fotovodivostný režim). Pripojenie fotodiódy bolo realizované formou prepajky na DPS ako to môžeme vidieť na obrázku 14. V nevyhnutnom prípade je možné zmeniť aj hodnoty súčiastok ako sú rezistory a kondenzátory za účelom odladenia požadovaných parametrov detektora.

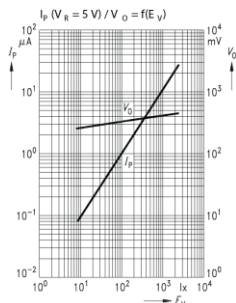


Obr.14. Zobrazenie spôsobu výberu pracovných režimov fotodiódy a jej prepojenia.

Na základe požiadaviek návrhu ako detektor, bola použitá fotodióda BPW21 od spoločnosti AMS OSRAM [123], ktorá je určená pre použitie vo viditeľnom spektre v lineárnych a precíznych aplikáciách zameraných na meranie intenzity svetla a analýzy farieb. Relatívna spektrálna charakteristika citlivosti fotodiódy BPW21 je zobrazená na obrázku 15, kde je vidieť, že obsahuje požadované vlnové dĺžky 450 nm a 674 nm. Obrázok 16 zobrazuje závislosť výstupného prúdu a napätia fotodiódy na intenzite optického žiarenia.



Obr. 15. Relatívna spektrálna charakteristika citlivosti fotodiódy BPW21 s vyznačenými vlnovými dĺžkami požadovaných absorpčných spektier.

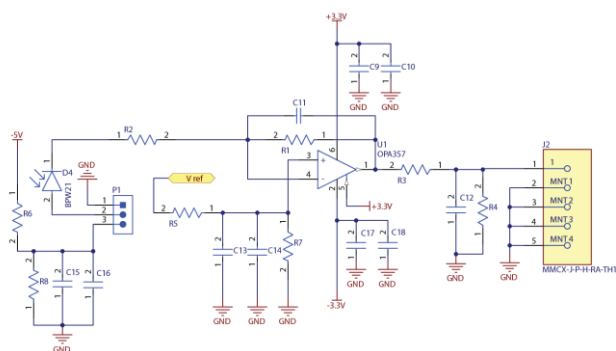


Obr. 16. Závislosť výstupného prúdu a napätia fotodiódy na intenzite optického žiarenia.

Optický signál môže byť v niektorých prípadoch veľmi slabý. Z tohto dôvodu je potrebné mať veľkú aktívnu plochu diódy na dosiahnutie veľkej citlivosti a rozlíšenia. Od veľkosti aktívnej plochy diódy, ktorá je $7,45 \text{ mm}^2$ sa odvíja aj kapacita diódy. Tá je značná (580 pF). Pri takto veľkej kapacite diódy nie je vhodná pre snímanie veľmi rýchlych priebehov, nakoľko časové odozvy nábežnej hrany t_R a dobežnej hrany t_F sú približne $1,5 \mu\text{s}$. V prípade potreby zvýšenia rýchlosti fotodiódy by bola dióda zapojená vo fotovodivostnom režime s pripojeným záverným napätím na anóde. Pri napätí 10 V by kapacita diódy klesla na približne 175 pF .

➤ *Transimpedančný zosilňovač*

Pre prevod fotoprúdu generovaného fotodiódou na napätie bol použitý operačný zosilňovač (ďalej OZ) OPA357 od spoločnosti Texas instruments. Tento prevodník prúdu na napätie (tiež označovaný ako transimpedančný zosilňovač) bol použitý s cieľom vnieść čo najmenší šum do obvodu. Bol koncipovaný pre zapojenie fotodiódy vo fotovodivostnom aj fotovoltaickom režime. Schéma zapojenia návrhu transimpedačného zosilňovača a jeho súčastí je na obrázku 17.

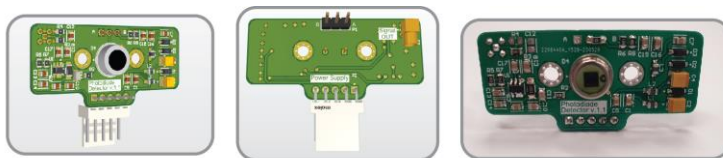


Obr. 17. Schéma zapojenia transimpedančného zosilňovača.

Fotoprúd I_D generovaný fotodiódou D_4 preteká cez rezistor R_1 , na ktorom vytvorí úbytok napätia rovný výstupnému napätiu V_{OUT} . Veľkosť tohto napätia je definovaná vzťahom 1. Zisk zosilnenia transimpedančného zosilňovača je definovaný veľkosťou rezistora R_1 .

$$V_{OUT} = -I_D \cdot R_1 \quad (1)$$

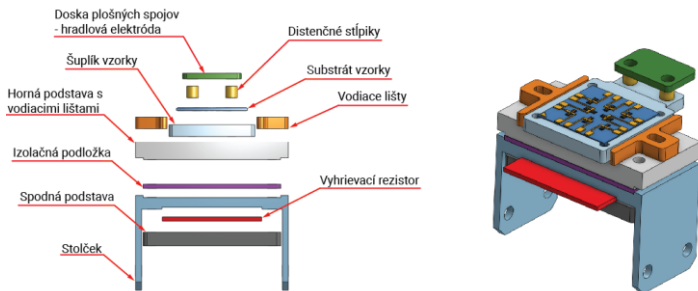
Výstup bol vyvedený prostredníctvom koaxiálneho konektora MMCX odkiaľ smeruje prostredníctvom koaxiálneho kábla RG179 do modulu predzosilňovača umiestneného v elektronickej jednotke na vákuovej komore. Elektronika optického detektora bola zostavená z elektronických komponentov prevažne v prevedení SMD na obojstrannej DPS, ktorú je možné vidieť na obrázku 18.



Obr. 18. Osadená doska plošných spojov elektroniky optického detektora. V ľavo predná strana v 3D, v strede zadná strana v 3D a v pravo je reálne prevedenie.

2.1.2.5 Teplotný stolček - držiak vzoriek

Jednou z kľúčových úloh návrhu meracieho systému bol držiak vzoriek. Držiak slúži nielen pre uchytanie vzoriek ale aj pre prenos požadovanej teploty na vzorku substrátu. 3D návrh prevedenia držiaku vzoriek je zobrazený na obrázku 19, kde sú zároveň aj popísané všetky dôležité časti.

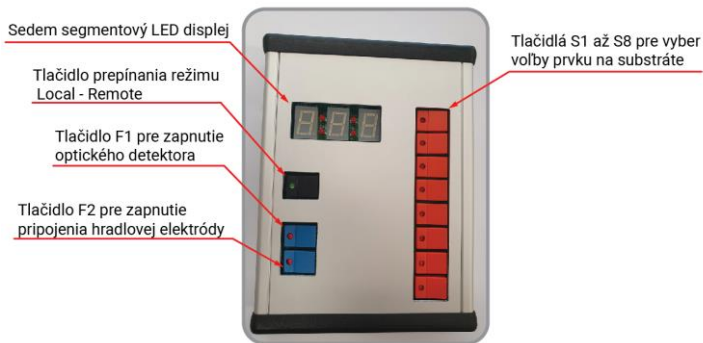


Obr. 19. 3D návrh prevedenia držiaku vzoriek s popismi jednotlivých častí.

Pri jeho návrhu sa vychádzalo z jestvujúceho systému DLTS a to z tvaru a rozmerov kryostatu, na ktorý bolo potrebné nainštalovať držiak vzoriek. Úlohou držiaku vzorky bolo zabezpečiť stabilné mechanické uchytenie vzorky substrátu a jej ochladenie alebo zahriatie na požadovanú teplotu.

2.1.2.6 Ovládacia jednotka

Jej hlavnou úlohou je zabezpečenie správnej funkčnosti jednotlivých častí systému aparatury. A jej primárnou úlohou je prepínanie relé, pomocou ktorých sa volí meraný prvok štruktúry na substráte, pretože analyzátor B1500A v danom okamžiku môže merať iba jeden prvok na štruktúre. Medzi ďalšie funkcie, ktoré ovládacia jednotka riadi je aj ovládanie optického detektora prostredníctvom tlačidla a pripojenia hradlovej elektródy k meraciemu systému tlačidlom (obrázok 20).



Obr. 20. Finálne prevedenie ovládacej jednotky spolu s popisom prvkov.

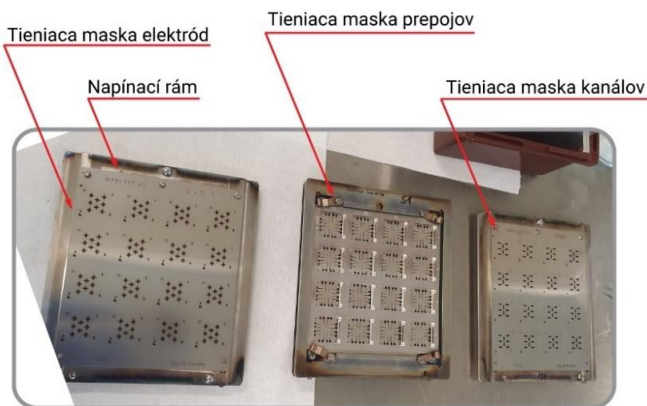
Ovládacia jednotka môže pracovať v dvoch pracovných režimoch a to v lokálnom a vzdialenom. Výber konkrétneho režimu je realizovaný formou tlačidla na ovládacej jednotke. Pri vzdialenom režime, je

ovládacia jednotka riadená za pomoci sériovej linky cez USB zbernicu z PC. Tým je spustený automatizovaný proces podliehajúci ovládaniu pomocou aplikácie. V tomto režime je lokálne ovládanie jednotky zablokované a nie je možné ju riadiť manuálne.

2.2 Výrobný proces OTFT prvkov

Prvky OTFT boli pripravené v topológii s horným kontaktom. Silne dopované kremíkové dosky boli použité ako nosný substrát a zároveň slúžili ako hradlová elektróda. Termický oxid s hrúbkou 110 nm tvoril hradlové dielektrikum. Roztok PMMA bol odstrednený na kremíkových substrátoch, čím bola dosiahnutá hrúbka 30 nm. Organický polovodič pentacén bol deponovaný pomocou depozičného systému SPECTROS 100 z Knudsenovej cely (Al_2O_3 kelímok) pri tlaku nižšom ako 10^{-4} Pa. Hrúbka vrstvy bola 100 nm.

Zlato a striebro boli použité pre kovové elektródy source a drain. Deponovanie elektród bolo realizované cez tieniacu masku definujúcu topológiu metalizácie. Tieniace masky použité pre deponovanie kanála a elektród tranzistora spolu s prepojmami pre kontaktné plochy boli vyrobené podľa predlohy pre každú časť zvlášť, všetky tri masky sú zobrazené v napínacích rámoch na obrázku 21.

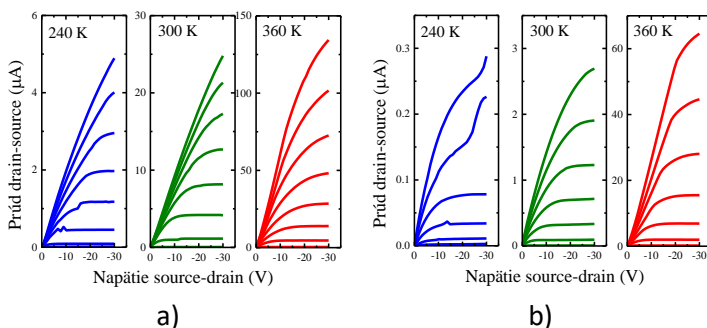


Obr. 21. Tieniace masky použité pre deponovanie jednotlivých častí OTFT tranzistorov.

Pre účely experimentov bolo na jednom substráte vyhotovených osem OTFT prvkov s rôznymi dĺžkami kanálov ako 40 μm , 60 μm , 80 μm , 125 μm , 150 μm , 175 μm a 200 μm , kým šírka kanála bola zachovaná (2,5 mm) pre všetky štruktúry tranzistorov. Elektródy tranzistorov (hrúbka 50 nm) boli vyvedené na kontaktné plošky v tvare štvorcov s rozmermi približne 2x2 mm prostredníctvom prepojov.

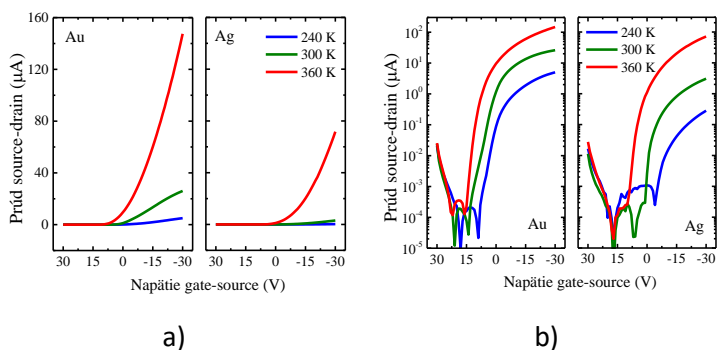
2.3 Merania teplotných závislostí prúdov organického tranzistora v ustálenom režime

Elektrická charakterizácia OTFT prvkov v ustálenom a tranzientnom režime prebiehala na skupine s dĺžkou hradla 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175 a 200 μm . Šírka hradla (2,5 mm) bola zachovaná pri všetkých prvkoch. Použitý kryogénny systém umožňuje rozsah teplôt od 100K do 500K. Vzhľadom na elektrické vlastnosti a materiálové zloženie meraných prvkov bol tento rozsah výrazne skráteneý. Vzhľadom na klesajúce výstupné prúdy pri nízkych teplotách bola minimálna teplota merania zvolená 200K. Najvyššiu meranú teplotou limituje dielektrická vrstva PMMA, ktorej teplota skleného prechodu je 378K. Preto sa rozsah teplôt merania zvolil od 200 do 360K s krokom 20K. Na porovnanie vplyvu kovových kontaktov sa merali OTFT so zlatými (Au) alebo so striebornými (Ag) elektródami source a drain. Výstupné charakteristiky týchto OTFT pre vybrané 3 teploty sú znázornené na obrázku 22.



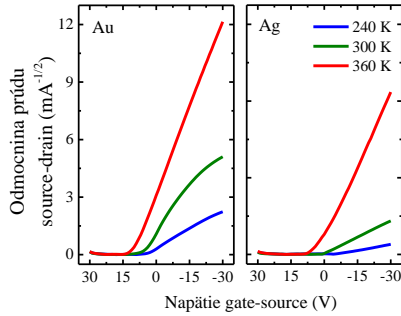
Obr. 22. Výstupné charakteristiky pentacénových OTFT prvkov s dĺžkou kanála 100 μm s a) Au alebo b) Ag elektródami source a drain pre tri vybrané teploty. Napätie gate-source sa mení z 0 do -30 V s krokom -5 V.

Je zjavné že pripravené OTFT prvky vykazujú správanie sa tranzistora, teda lineárny nárast prúdu v lineárnej oblasti a následne ustálenie na konštantnej hodnote prúdu v saturačnej oblasti napätí tranzistora. Na kvantitatívne vyhodnotenie elektrických parametrov tranzistorov použijeme prevodovú charakteristiku ktorej príklad je zobrazený na obrázku 23.



Obr. 23. Prevodové charakteristiky pentacénových OTFT s dĺžkou kanála $100 \mu\text{m}$ s Au alebo Ag elektródami source a drain pre tri vybrané teploty a) v lineárnej mierke, b) v semilogaritmickú mierke. Napätie drain-source bolo -30 V .

Pre vyhodnotenie efektívnej pohyblivosti v saturovanom režime a prahového napätia využijeme vzťah 3, kde nám vystupuje odmocnina prúdu lineárne závislá od priloženého napätia gate-source (obr. 24).



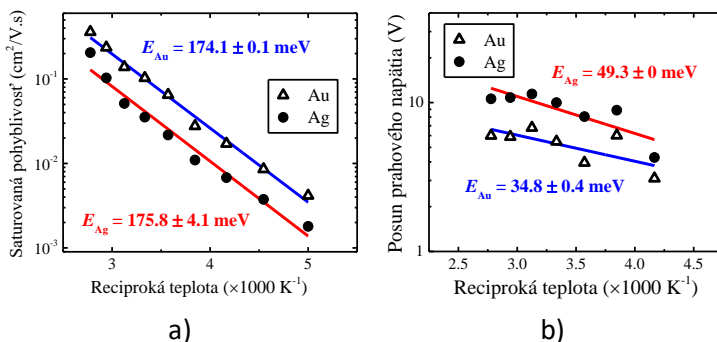
Obr. 24. Prevodové charakteristiky pentacénových OTFT s dĺžkou kanála $100 \mu\text{m}$ s Au alebo Ag elektródami source a drain pre tri vybrané teploty c) a ako odmocnina z prúdu. Napätie drain-source bolo -30 V .

Je zjavné že sa pri napäťovej závislosti odmocniny prúdu s rastúcou teplotou mení sklon krivky ako aj jej ofset. Inými slovami, teplotnú závislosť vykazuje efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja μ_{eff} ako aj posun prahového napätia ΔV_{th} OTFT prvku. Pri efektívnej pohyblivosti predpokladáme preskokový mechanizmus transportu náboja medzi lokalizovanými plytkými stavmi s dodatočným vplyvom záchytu náboja v hlbokých stavoch ($E \gg 3kT$, kde kT je tepelná energia). Prahové napätie taktiež môže vykazovať posun v dôsledku záchytu náboja keďže imobilný náboj sa stáva zdrojom elektrostatického poľa ktoré je potrebné kompenzovať pred samotným vytvorením vodivého kanála tranzistora, kde zmena prahového napätia je úmerná produktu plošnej koncentrácie zachyteného náboja a kapacity hradlového dielektrika na jednotku plochy, $\Delta V_{th} = Q_{trap}C_g$. Pre tieto tepelne aktivované procesy sa predpokladá Arrheniova závislosť typu

$$\mu_{eff} = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_{mob}}{kT}\right), \quad (2)$$

$$\Delta V_{th} = \exp\left(-\frac{E_{th}}{kT}\right), \quad (3)$$

kde E_{mob} je aktivačná energia efektívnej pohyblivosti a E_{th} je aktivačná energia prahového napätia. Arrheniove závislosti pre efektívnu pohyblivosť voľných nosičov náboja v saturovanej oblasti napätia a posun prahového napätia sú vykreslené v obrázku 25. Je zjavné že aktivačné energie efektívnej pohyblivosti sú zhodné (v rámci chyby určenia) pre OTFT prvky s Au alebo Ag elektródami source a drain kontaktov a top aj napriek tomu že efektívna pohyblivosť pre prvky s Ag elektródami nadobúda nižšie hodnoty efektívnej pohyblivosti. Je zjavné že aktivačné energie efektívnej pohyblivosti sú zhodné (v rámci chyby určenia) pre OTFT prvky s Au alebo Ag elektródami source a drain kontaktov a top aj napriek tomu že efektívna pohyblivosť pre prvky s Ag elektródami nadobúda nižšie hodnoty efektívnej pohyblivosti. Z toho vyplýva že v saturovanej oblasti napätia je badateľný vplyv kontaktu, avšak teplotná závislosť transportu náboja je dominantným javom.



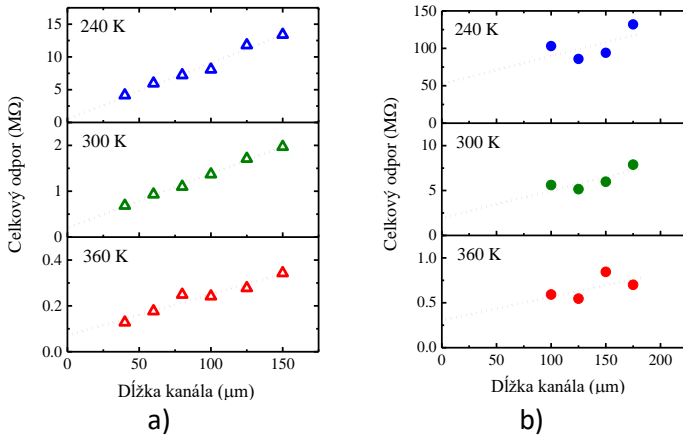
Obr. 25. Arrheniove závislosti pre a) efektívnu pohyblivosť voľných nosičov náboja v saturovanej oblasti napätia a b) posun prahového napätia. Hodnoty premenných sú priemerné hodnoty cez všetky vyhodnotené kanály OTFT prvkov.

Je vhodné poznamenať že podľa dostupných informácií z literatúry je kontaktný odpor dominantným v lineárnej oblasti napätí, kým v saturovanej oblasti napätí dominuje transport náboja. Keďže štruktúra prvkov je rozdielna

len v materiáli kovových kontaktov na rozhraní kov/organický polovodič, tak určená aktivačná energia musí súvisieť s transportom náboja v oblasti kanála OTFT prvku. Vzhľadom na hodnotu približne 175 meV sa jedná o lokalizovaný hlboký stav spôsobujúci záchyt náboja na rozhraní pentacén/PMMA. Vzhľadom na to že určujeme efektívnu hodnotu pohyblivosti, tak tento parameter v sebe obsahuje aj koncentráciu pohyblivých nosičov náboja n_{mob} ktorá sa môže líšiť od celkovej koncentrácie nosičov náboja, $n_{total} = n_{mob} + n_{trap}$, ktorá zahŕňa nielen pohyblivé ale aj zachytené náboje. n_{trap} ,

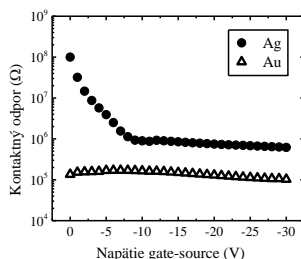
$$\mu_{eff} = \mu_0 \frac{n_{mob}}{n_{mob} + n_{trap}}. \quad (4)$$

Takýto druh transportu náboja sa zvykne označovať aj ako model záchytu a uvoľnenia náboja (MTR, z angl. Multiple Trap and Release). Je zaujímavé, že posun prahového napätia pre OTFT prvky s Au elektródami dosahuje aktivačnú energiu $34,8 \pm 0,4$ meV, respektíve pre prvky s Ag elektródami je aktivačná energia 49,3 meV. To poukazuje na dominantný vplyv plytkých stavov ktoré ovplyvňujú transport náboja pomocou preskokového mechanizmu. Je zjavné, že pozorujeme signifikantné rozdiely medzi efektívnymi pohyblivosťami OTFT prvkov s Au alebo Ag elektródami. Z toho dôvodu sa vyhodnotil kontaktný odpor pomocou metódy rozložených parametrov (TLM). Obrázok 26 znázorňuje závislosť celkového odporu OTFT prvku od dĺžky kanála pre 3 vybrané teploty a napätie gate-source -20 V.



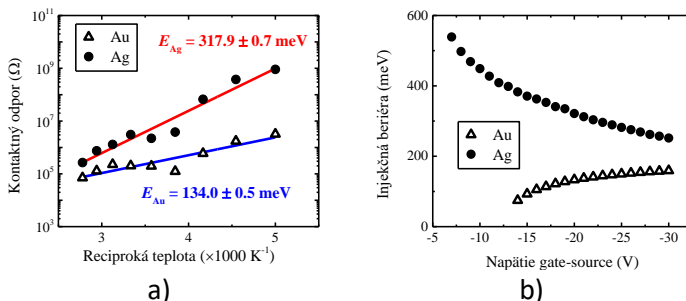
Obr. 26 Vyhodnotenie kontaktného odporu pomocou metódy rozložených parametrov pre sériu OTFT prvkov s a) Au alebo b) Ag elektródami source a drain pre 3 rôzne teploty. Napätie source-drain bolo 1 V. Napätie gate-source bolo -20 V.

Pre nízko-dopované a nedopované polovodiče je známe, že kontaktný odpor je napäťovo závislým parametrom. Je predpoklad že napäťová závislosť bude zapríčinená Schottkyho javom, teda elektrickým poľom podporenou termoemisíou. Obrázok 27 ukazuje napäťovú závislosť OTFT prvkov s Au alebo s Ag elektródami. Je zjavné, že OTFT prvky s Ag elektródami majú nielen výrazne vyšší kontaktný odpor, ale tento parameter je aj napäťovo závislým, kým OTFT prvky s Au elektródami majú nižšiu hodnotu a menej napäťovo závislú.



Obr. 27 Vyhodnotenie napäťovej závislosti kontaktného odporu pomocou metódy rozložených parametrov pre sériu OTFT s Au alebo Ag elektródami source a drain. Napätie source-drain bolo 1 V, zvolená teplota bola 340K.

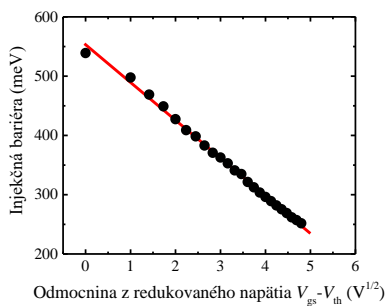
Tieto zistenia nás nabádajú na vyhodnotenie aktivačnej energie kontaktného odporu. Arrheniove závislosti kontaktného odporu pre OTFT s Au a a Ag elektródami sú znázornené na obrázku 28 a).



Obr.28. a) Vyhodnotenie Arrheniovej závislosti kontaktného odporu OTFT prvkov s Au alebo Ag elektródami source a drain pri napätí gate-source -20V. b) Napäťová závislosť aktivačnej energie kontaktného odporu OTFT s Au alebo Ag elektródami source a drain.

Je očividné, že Ag elektródy majú výrazne vyššiu hodnotu aktivačnej energie kontaktného odporu, ktorá môže byť interpretovaná ako hodnota energie injekčnej bariéry na rozhraní kov/organický polovodič. Tento fakt je v súlade s vyhodnotením hodnoty kontaktného odporu ako aj očakávaniami pramienicami z HOMO úrovne pentacénu približne 5 eV a Fermiho energie polykrystalického zlata (Au) s hodnotou 5,1 eV a polykrystalického striebra

(Ag) s hodnotou 4,26 eV [Michelson 1977]. Vzhľadom na skutočnosť že kontaktný odpor R_k je funkciou napätia V_{GS} gate-source tak aktivačná energia kontaktného odporu musí byť taktiež vyhodnotená pre rôzne priložené napätia. Obrázok 28b) ilustruje napätovú závislosť aktivačnej energie kontaktného odporu OTFT prvkov s Au alebo Ag elektródami source a drain. Klesajúcu hodnotu aktivačnej energie od priloženého napätia pre OTFT prvok s Ag s elektródami source a drain sa dá interpretovať ako Schottkyho jav kde je zníženie injekčnej bariéry úmerné odmocnине z aplikovaného vonkajšieho elektrického poľa. Obrázok 29 potvrdzuje lineárny pokles injekčnej bariéry od odmocniny z aplikovaného napätia.

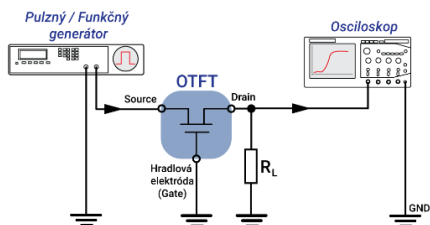


Obr. 29. Aktivačná energia kontaktného odporu (predstavujúca injekčnú bariéru) ako funkcia odmocniny z aplikovaného napätia gate-source redukované o prahové napätie. Červená čiara predstavuje lineárny fit.

2.4 Merania teplotných závislostí prúdov organického tranzistora v tranzientnom režime

Vzhľadom na skutočnosť, že organické polovodičové prvky sú pohyblivosťou nosičov náboja značne pomalšie ako prvky na báze anorganických polovodičov, bolo možné taktiež zrealizovať a vykonať tranzientné merania prúdovej odozvy. Cieľom tejto charakterizácie organických polovodičových

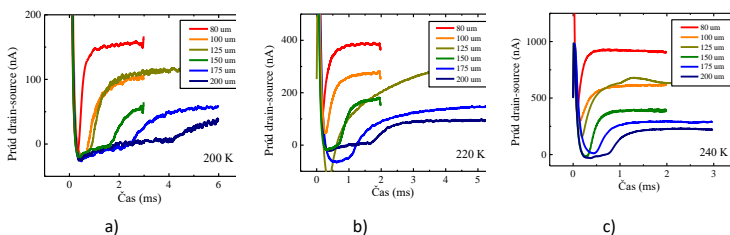
prvkov bolo sledovať zmeny pohyblivosti nosičov náboja vplyvom teplotnej závislosti. Tieto merania tranzientnej prúdovej odozvy sú veľmi dôležité pre lepšie pochopenie transportných mechanizmov v organických polovodičových materiáloch, kde dochádza k zníženiu efektívnej pohyblivosti nosičov náboja vplyvom lokalizovaných stavov respektíve pascí. Pri meraniach tranzientnej prúdovej odozvy sa prúd meria vo veľmi krátkych intervaloch pri aplikácii napäťového skoku vo forme krátkeho pulzu. Za účelom tranzientných meraní bolo vytvorené meracie pracovisko zobrazené na obrázku 30 pozostávajúce z pulzného generátora, osciloskopu, paralelného rezistora, meracích vodičov a OTFT prvkov nakontaktovaných prostredníctvom meracej aparatury.



Obr. 30. Schéma blokového zapojenia meracích prístrojov spolu s prvkom OTFT pre účely merania tranzientnej prúdovej odozvy.

Hodnota rezistora R_L sa menila empiricky, podľa priebehov dosiahnutých na osciloskope, pričom bolo potrebné hodnotu určiť tak, by bola na jednu stranu dostatočne veľká aby príliš neutlmila meraný signál a na druhej strane dostatočne malá aby sa tam prejavil meraný signál bez väčších rušivých interferencií. Z tohto dôvodu bolo určenie správnej hodnoty rezistora kľúčové a hodnota približne varírovala na úrovni 100 k Ω . Úroveň dĺžky pulzov bolo potrebné meniť v závislosti od teploty na ktorej prebiehalo meranie aby sledovaná odozva signálu bola na osciloskope dostatočne viditeľná. Strmosť

napätového pulzu respektíve nábežná hrana pulzu bola 1 μ s. Merania tranzientnej prúdovej odozvy na napätový skok boli merané pre napätia $V_{GS} = V_{DS} = -30$ V. Časové priebehy tranzientných prúdov sú vykreslené v obrázku 31. Je zjavné že zväčšujúca sa dĺžka kanálu spôsobuje výrazné oneskorenie výstupného prúdu čo je zapríčinené časom potrebným na transport náboja cez kanál tranzistora. Vzhľadom na teplotne závislú hodnotu efektívnej pohyblivosti s rastúcou teplotou, je transport náboja rýchlejší a prúdová odozva tranzistora nastane skôr po aplikovaní napätového skoku. Vzhľadom na parazitné kapacity spôsobené prekryvom elektród source a gate dochádza ku nežiadúcemu javu kapacitnej odozvy vo veľmi krátkych časoch a pre tento jav je vyhodnotenie časového priebehu výstupného prúdu náročné a zaťažené veľkou chybou. Pre budúce merania sa bude musieť navrhnúť systém OTFT prvku s nižšou parazitnou kapacitou na potlačenie tohto neželaného javu.



Obr. 31. Tranzientná prúdová odozva na napätový skok pre OTFT prvky s Ag elektródami source a drain pre tri rôzne zvolené teploty a rôzne dĺžky kanálu.

3. Vlastný prínos

Predložená dizertačná práca obsahuje okrem prehľadu súčasného stavu problematiky aj návrh a prípravu meracieho pracoviska, komory krygéneho systému spolu s teplotnou stabilizáciou a súvisiacimi elektronickými

systémami, ktoré by umožnili merania série organických tranzistorov pri rôznych teplotách v jednom meracom cykle. Práca tiež obsahuje prípravu a merania organických tranzistorov v ustálenom stave ako aj merania tranzientnej prúdovej odozvy na napäťový skok a následné vyhodnotenie elektrických vlastností a aktivačných energií pozorovaných procesov.

Dizertant sám navrhol a pripravil meracie pracovisko, komoru krygéneho systému spolu s teplotnou stabilizáciou a súvisiace elektronické systémy. Pri technologických procesoch spojených s prípravou organických tranzistorov dizertant spolupracoval s kolegami z pracoviska a následne dizertant sám vykonával merania a charakterizácie organických tranzistorov ako aj vyhodnotenia elektrických parametrov a aktivačných energií.

4. Záver

Organická elektronika je tu len krátko ale už teraz sa ukazuje ako perspektívna alternatíva pre elektroniku založenú na kremíkovej technológii. Organické polovodiče nám umožňujú nielen nové aplikácie v zobrazovacej technike, obnoviteľných zdrojoch energie či v senzorike, ale taktiež nám poskytujú aj nenáročnú technológiu prípravy a nízke výrobné náklady. Je zaujímavé poznamenať že napriek tomu, že sa už našli komerčné aplikácie prvkov a systémov organickej elektroniky, tak základné fyzikálne pozadie procesov injekcie, transportu, či rekombinácie náboja v organických polovodičoch ešte nie je dobre preskúmané. Štandardné prístupy charakterizácie polovodičov častokrát nie sú vhodné pre organické materiály a tak je potrebné vyvinúť nové metodológie alebo nové experimentálne systémy pre charakterizáciu elektrických či fyzikálnych parametrov organických polovodičov alebo elektronických prvkov na nich založených.

V tejto práci sme sa zamerali na vývoj meracieho systému vhodného na charakterizáciu elektrických vlastností organických tranzistorov pri rôznych teplotách. Prieskum súčasného stavu problematiky v oblasti organickej elektroniky identifikoval kritický problém s injekciou nosičov náboja do prvkov organickej elektroniky. Parazitný sériový odpor reprezentujúci spád potenciálu na rozhraní kov/organický polovodič sa interpretuje ako kontaktný odpor a obvykle sa vyhodnocuje na základe merania série organických tranzistorov s rozdielnymi dĺžkami hradla, tzv. metóda rozložených parametrov. V súčasnosti dostupné meracie pracoviská kombinované s kryogénnymi systémami neumožňujú merania viacerých prvkov v jednom cykle merania. Preto cieľom tejto práce bol návrh a príprava meracieho pracoviska, komory krygénneho systému a súvisiacich elektronických systémov, ktoré by umožnili merania série organických tranzistorov pri rôznych teplotách v jednom meracom cykle. Tento systém bol navrhnutý, pripravený a otestovaný na organických tranzistoroch využívajúcich pentacén ako typického zástupcu organických polovodičov. Pre štúdium vplyvu kontaktu sa merali organické tranzistory so zlatými (Au) alebo so striebornými (Ag) kontaktami keďže rozdielne Fermiho hladiny kovov výrazne vplývajú na veľkosť injekčnej bariéry na rozhraní kov/organický polovodič. Vďaka meraniam v širokom rozsahu teplôt boli identifikované nielen aktivačné energie základných elektrických parametrov organických tranzistorov ako sú efektívna pohyblivosť a prahové napätie, ale aj aktivačná energia kontaktného odporu ktorá reprezentuje injekčnú bariéru pre diery ako majoritné nosiče náboja v organickom polovodiči pentacén. Bola taktiež overená možnosť meraní tranzientnej prúdovej odozvy na napäťový skok za účelom rozlíšenia injekčných a transportných javov. Vzhľadom na vplyv parazitnej kapacity prívodných kontaktov nebolo možné vyhodnotiť časy

transportných a injekčných relaxačných procesov, ale navrhnutý a pripravený experimentálny merací systém tieto merania umožňuje a pre budúce merania bude nutné urobiť optimalizovaný návrh elektródovej štruktúry organických tranzistorov za účelom zníženia parazitnej kapacity. Navrhnutý a pripravený experimentálny systém pre merania organických tranzistorov pri rôznych teplotách tak bude dôležitým nástrojom pri identifikovaní energetickej štruktúry prvkov a určenia limitujúcich faktorov prvkov organickej elektroniky.

5. Conclusion

Organic electronics has only been here for a short time, but it is already showing itself as a promising alternative for electronics based on silicon technology. Organic semiconductors allow us not only new applications in imaging technology, renewable energy sources or in sensors, but also provide us with an undemanding preparation technology and low production costs. It is interesting to note that despite the fact that commercial applications of organic electronics elements and systems have already been found, the basic physical background of charge injection, transport, or recombination processes in organic semiconductors is still not well explored.

Standard semiconductor characterization approaches are often not suitable for organic materials, so it is necessary to develop new methodologies or new experimental systems for the characterization of electrical or physical parameters of organic semiconductors or electronic elements based on them. In this work, we focused on the development of a measurement system suitable for characterizing the electrical properties of

organic transistors at different temperatures. A survey of the current state of affairs in the field of organic electronics identified a critical problem with the injection of charge carriers into organic electronics elements. The parasitic series resistance representing the potential drop at the metal/organic semiconductor interface is interpreted as contact resistance and is usually evaluated based on the measurement of a series of organic transistors with different gate lengths, the so-called decomposed parameters method.

Currently available measuring workstations combined with cryogenic systems do not allow the measurement of several elements in one measurement cycle. Therefore, the goal of this work was the design and preparation of a measuring station, cryogenic system chamber and related electronic systems, which would enable measurements of a series of organic transistors at different temperatures in one measurement cycle. This system was designed, prepared and tested on organic transistors using pentacene as a typical representative of organic semiconductors.

To study the effect of contact, organic transistors with gold (Au) or silver (Ag) contacts were measured, since the different Fermi levels of metals significantly affect the size of the injection barrier at the metal/organic semiconductor interface. Thanks to measurements in a wide range of temperatures, not only the activation energies of the basic electrical parameters of organic transistors, such as the effective mobility and threshold voltage, but also the activation energy of the contact resistance, which represents the injection barrier for holes as the majority charge carriers in the organic semiconductor pentacene, were identified.

The possibility of measuring the transient current response to a voltage jump in order to distinguish injection and transport phenomena was

also verified. Due to the influence of the parasitic capacitance of the supply contacts, it was not possible to evaluate the times of transport and injection relaxation processes, but the designed and prepared experimental measurement system enables these measurements, and for future measurements it will be necessary to make an optimized design of the electrode structure of organic transistors in order to reduce the parasitic capacitance.

The designed and prepared experimental system for measuring organic transistors at different temperatures will thus be an important tool in identifying the energy structure of the elements and determining the limiting factors of the elements of organic electronics.

6. Schlussfolgerung

Organische Elektronik gibt es zwar erst seit Kurzem, sie erweist sich aber bereits als vielversprechende Alternative zur Elektronik auf Basis der Siliziumtechnologie. Organische Halbleiter ermöglichen uns nicht nur neue Anwendungen in der Bildgebungstechnik, erneuerbaren Energiequellen oder Sensoren, sondern verschaffen uns auch eine anspruchslose Herstellungstechnologie und niedrige Produktionskosten. Es ist interessant festzustellen, dass trotz der Tatsache, dass bereits kommerzielle Anwendungen organischer elektronischer Elemente und Systeme gefunden wurden, der grundlegende physikalische Hintergrund der Ladungsinjektions Transport- oder Rekombinationsprozesse in organischen Halbleitern noch nicht gut erforscht ist.

Standardansätze zur Halbleitercharakterisierung sind für organische Materialien oft nicht geeignet, daher ist es notwendig, neue Methoden oder

neue experimentelle Systeme zur Charakterisierung elektrischer oder physikalischer Parameter organischer Halbleiter oder darauf basierender elektronischer Elemente zu entwickeln. In dieser Arbeit konzentrierten wir uns auf die Entwicklung eines Messsystems, das zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften organischer Transistoren bei verschiedenen Temperaturen geeignet ist. Eine Untersuchung zum aktuellen Stand der Dinge im Bereich der organischen Elektronik ergab ein kritisches Problem bei der Injektion von Ladungsträgern in Elemente der organischen Elektronik. Der parasitäre Serienwiderstand, der den Potentialabfall an der Grenzfläche Metall/organischer Halbleiter darstellt, wird als Kontaktwiderstand interpretiert und üblicherweise anhand der Messung einer Reihe organischer Transistoren mit unterschiedlichen Gate-Längen, den sogenannten, ausgewertet Methode der zerlegten Parameter.

Derzeit verfügbare Messarbeitsplätze in Kombination mit Kryosystemen erlauben keine Messung mehrerer Elemente in einem Messzyklus. Ziel dieser Arbeit war daher die Gestaltung und Vorbereitung des Messarbeitsplatzes, der Kryosystemkammer und der zugehörigen elektronischen Systeme, die Messungen einer Reihe organischer Transistoren bei unterschiedlichen Temperaturen in einem Messzyklus ermöglichen würden. Dieses System wurde an organischen Transistoren unter Verwendung von Pentacen als typischem Vertreter organischer Halbleiter entworfen, vorbereitet und getestet.

Um den Kontakteffekt zu untersuchen, wurden organische Transistoren mit Gold- (Au) oder Silber- (Ag) Kontakten gemessen, da die unterschiedlichen Fermi-Niveaus von Metallen die Größe der Injektionsbarriere an der Grenzfläche Metall/organischer Halbleiter

erheblich beeinflussen. Dank Messungen in einem weiten Temperaturbereich konnten nicht nur die Aktivierungsenergien der grundlegenden elektrischen Parameter organischer Transistoren, wie die effektive Beweglichkeit und die Schwellenspannung, sondern auch die Aktivierungsenergie des Kontaktwiderstands, der die Injektionsbarriere für Löcher darstellt, bestimmt werden als Hauptladungsträger im organischen Halbleiter Pentacen identifiziert.

Auch die Möglichkeit, die transiente Stromreaktion auf einen Spannungssprung zu messen, um Injektions- und Transportphänomene zu unterscheiden, wurde ebenfalls verifiziert. Aufgrund des Einflusses der parasitären Kapazität der Versorgungskontakte war es nicht möglich, die Zeiten der Transport- und Injektionsrelaxationsprozesse zu bewerten, aber das entworfene und vorbereitete experimentelle Messsystem ermöglicht diese Messungen und wird für zukünftige Messungen notwendig sein ein optimiertes Design der Elektrodenstruktur organischer Transistoren vornehmen, um die parasitäre Kapazität zu reduzieren.

Das entworfene und vorbereitete experimentelle System zur Messung organischer Transistoren bei verschiedenen Temperaturen wird daher ein wichtiges Werkzeug zur Identifizierung der Energiestruktur der Elemente und zur Bestimmung der limitierenden Faktoren der Elemente der organischen Elektronik sein.

7. Publikačná činnosť

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách (15)

- [1] **HANIC**, Michal - **DONOVAL**, Martin. Elektromagnetické pulzné zariadenie. In ŠVOČ 2012 (elektronický zdroj) : Zborník vybraných prác. Bratislava : FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 337-343. ISBN 978-80-227- 3697-8..
- [2] **HANIC**, Michal [50 %] - **JAGELKA**, Martin [50 %]. Výskumné a vývojové laboratórium riadenia LED technológií. In Fotonika 2012 : 7.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Bratislava, 9. 2. 2012. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.36-39. ISBN 978-80-970493-3-1.
- [3] **HANIC**, Michal [12 %] - **NEVŘELA**, Juraj [11 %] - **MIČJAN**, Michal [11 %] - **JAKABOVIČ**, Ján [11 %] - **DONOVAL**, Martin [11 %] - **FLICKYNGEROVÁ**, Soňa [11 %] - **HORÍNEK**, František [11 %] - **MIKLOVIČ**, Peter [11 %] - **WEIS**, Martin [11 %]. Conductive fabrics and polymers for biomedical applications. In ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014. 1.vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 208-211. ISBN 978-80-554-0881-1.
- [4] **HANIC**, Michal [15 %] - **SLÁDEK**, Ľubomír [15 %] - **HORÍNEK**, František [15 %] - **JAGELKA**, Martin [15 %] - **DONOVAL**, Martin [15 %] - **DAŘÍČEK**, Martin [15 %] - **DONOVAL**, Daniel [10 %]. BIO-monitoring system with conductive textile electrodes integrated into T-shirt. In Radioelektronika 2014 : Proceedings of 24th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, April 15-16, 2014. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s. 275-278. ISBN 978-1-4799-3714-1.
- [5] **HANIC**, Michal [8 %] - **KÓSA**, Arpád [8 %] - **KOVÁČOVÁ**, Soňa [8 %] - **BENKO**, Peter [8 %] - **HAGARA**, Miroslav [8 %] -

- KUBINEC, Peter [8 %] - KOVÁČ, Jaroslav Jr. [8 %] - FLOROVIČ, Martin [8 %] - MARTON, Marián [8 %] - VOJS, Marian [8 %] - POHORELEC, Ondrej [7 %] - HRBÁČEK, Jiří [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [8 %]. Interactive forms of technical education support in primary and secondary schools. In ICETA 2015 : 13th IEEE international conference on emerging eLearning technologies and applications. Starý Smokovec, Slovakia. November 26 - 27, 2015. Danvers : IEEE, 2015, S. 91-97. ISBN 978-1-4673-8534-3. V databáze: IEEE.
- [6] **HANIC**, Michal [50 %] - ŠUBJAK, Ján [25 %] - SEDLÁK, Samuel [25 %]. Progresívne technológie deponovania organických materiálov preorganické polovodičové prvky formou "Solution Shared" s využitím optických meraní v reálnom čase, pre vyhodnotenie procesu schnutia deponovaných vrstiev. In Fotonika 2019 : 14. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 07.-08. február 2019. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2019, S. 72-75. ISBN 978-80-972238-7-8.
- [7] HORÍNEK, František [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - SLÁDEK, Ľubomír [20 %] - **HANIC**, Michal [10 %] - ŠATKA, Alexander [10 %]. Design of electromyography classification system using artificial neural network. In Radioelektronika 2014 : Proceedings of 24th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, April 15-16, 2014. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s. 279- 282. ISBN 978-1-4799-3714-1.
- [8] REŽO, Vratislav [20 %] - **HANIC**, Michal [20 %] - WEIS, Martin [20 %] - DONOVAL, Martin [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %]. Environmental chamber for measuring gas sensors. In ADEPT 2022 : 10th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-24, 2022. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2022, S. 81-84. ISBN 978-80-554-1884- 1.
- [9] REŽO, Vratislav [34 %] - **HANIC**, Michal [33 %] - WEIS, Martin [33 %]. Small currents measurement in organic field-controlled transistors. In ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice,

Slovakia. October 23-26, 2022. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022, S. 53-55. ISBN 978-1-6654-6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966746 ; IEEE: 9966746 ; SCOPUS: 2-s2.0-8514459594.

- [10] SLÁDEK, Lubomír [25 %] - **HANIC**, Michal [25 %] - VANČO, Peter [15 %] - ŠTIBRANÝ, Tomáš [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %]. ECG and HRV measurement using textile electrodes integrated in Tshirt. In YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 104-107. ISBN 978-80-971697-0-1.
- [11] SOBOTA, Michal [20 %] - NOVOTA, Miroslav [20 %] - MIČJAN, Michal [20 %] - **HANIC**, Michal [20 %] - WEIS, Martin [20 %]. Organic charge-modulated field-effect transistor for biosensing applications. In ADEPT 2022 : 10th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-24, 2022. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2022, S. 93-96. ISBN 978-80-554-1884-1.
- [12] VAVRINSKÝ, Erik [40 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - HORÍNEK, František [5 %] - POPOVIČ, Marián [5 %] - **HANIC**, Michal [15 %] - JAGELKA, Martin [5 %]. Monitoring of EMG to force ratio using new designed precise wireless sensor system. In YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, p. 93-98. ISBN 978-80-971697-0-1.
- [13] VAVRINSKÝ, Erik [50 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - HORÍNEK, František [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %] - **HANIC**, Michal [5 %] - MIKLOVIČ, Peter [5 %] - POPOVIČ, Marián [5 %] - TVAROŽEK, Vladimír [5 %]. Simultaneous EMG, MMG and EIM measurement of human muscles using a single wireless holter. In ADEPT 2015 : 3rd international conference on advances in electronic and photonic technologies. Štrbské Pleso,

High Tatras, Slovakia. June 1-4, 2015. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2015, S. 144-147. ISBN 978-80-554-1033-3. Kategória publikácie do 2021: AFD

- [14] MATUŠKA, Michal [10 %] - HUDAČ, Samuel [10 %] - JANČO, Marek [10 %] - ONDREJKA, Patrik [10 %] - POHORELEC, Ondrej [10 %] - ŽIŠKA, Milan [10 %] - VOJS, Marian [20 %] - **HANIC**, Michal [10 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %]. E-learning as a support for student team projects. In ICETA 2015 : 13th IEEE international conference on emerging eLearning technologies and applications. Starý Smokovec, Slovakia. November 26 - 27, 2015. Danvers : IEEE, 2015, S. 263-268. ISBN 978-1-4673-8534-3. V databáze: IEEE.
- [15] VAVRINSKÝ, Erik [50 %] - STOPJAKOVÁ, Viera [10 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - MIHÁLOV, Jozef [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %] - **HANIC**, Michal [5 %] - TVAROŽEK, Vladimír [5 %]. New approaches in electrodermal activity monitoring. In ADEPT 2016 : 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2016, S. 199-202. ISBN 978-80-554-1226-9. Kategória publikácie do 2021: AFD

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu (4)

- [1] **HANIC**, Michal [30 %] - JELEŇ, Michal [25 %] - NOVÁČEK, Martin [10 %] - WEIS, Martin [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %] - HORÍNEK, František [5 %] - DAŘÍČEK, Martin [5 %] - DONOVAL, Daniel [5 %]. Snímanie biosignálov elektródami na báze moderných flexibilných materiálov. In EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : konferencia ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013. Roč. 19, mimoriadne č (2013), s.37-39. ISSN 1335-2547
- [2] **HANIC**, Michal [15 %] - SLÁDEK, Ľubomír [15 %] - WEIS, Martin [15 %] - JAKABOVIČ, Ján [15 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - DONOVAL, Daniel [10 %]. Vodivé tkaniny a polyméry pre biomedicínske aplikácie. In EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku

konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 82-86. ISSN 1335-2547.

- [3] VAVRINSKÝ, Erik [40 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - HORÍNEK, František [5 %] - POPOVIČ, Marián [5 %] - HANIC, Michal [15 %] - JAGELKA, Martin [5 %]. Monitoring of EMG to force ratio using new designed precise wireless sensor system. In Lékař a technika. Roč. 44, č. 3 (2014), s. 17-22. ISSN 0301-5491 (2014: 0.101 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS. Kategória publikácie do 2021: ADM
- [4] VAVRINSKÝ, Erik [35 %] - STOPJAKOVÁ, Viera [20 %] - DONOVAL, Martin [10 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - SVOBODOVÁ, Helena [10 %] - MIHÁLOV, Jozef [5 %] - HANIC, Michal [5 %] - TVAROŽEK, Vladimír [5 %]. Design of sensor systems for long time electrodermal activity monitoring. In Advances in Electrical and Electronic Engineering. Vol. 15, No. 2 (2017), s. 184-191. ISSN 1336-1376 (2017: 0.274 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85025587157 ; WOS: 000409044400008 ; CC: 000409044400008.

D1 Dokument práv duševného vlastníctva

- [1] VAVRINSKÝ, Erik [35 %] - STOPJAKOVÁ, Viera [20 %] - DONOVAL, Martin [10 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - SVOBODOVÁ, Helena [10 %] - MIHÁLOV, Jozef [5 %] - HANIC, Michal [5 %] - TVAROŽEK, Vladimír [5 %]. Design of sensor systems for long time electrodermal activity monitoring. In Advances in Electrical and Electronic Engineering. Vol. 15, No. 2 (2017), s. 184-191. ISSN 1336-1376 (2017: 0.274 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85025587157 ; WOS: 000409044400008 ; CC: 000409044400008.
- [2] JAKABOVIČ, Ján [25 %] - WEIS, Martin [25 %] - KUZMA, Anton [10 %] - JUHÁSZ, Peter [10 %] - NOVOTA, Miroslav [10 %] - MIČJAN, Michal [10 %] - HANIC, Michal [10 %]. Štruktúra na extrakciu svetla z aktívnej oblasti organických elektroluminiscenčných diód na báze vodivých polymérov a spôsob jej výroby : Úžitkový vzor č. 8807, Dátum o zápise ÚV : 1. 7. 2020, Vestník ÚPV SR č. 7/2020. Banská Bystrica : Úrad priemyselného

vlastníctva SR, 2020. 9 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/229-2018>>. Kategória publikácie do 2021: AGJ

I2 Iný výstup publikačnej činnosti ako časť publikácie alebo zborníka

- [1] DONOVAL, Daniel [40 %] - WEBER, Bedřich [30 %] - KOTRÍKOVÁ, Lýdia [20 %] - **HANIC**, Michal [10 %]. Vzácná návšteva z európskej komisie na ÚEF FEI STU. In Spolok absolventov a priateľov FEI STU - EF SVŠT. Ročenka 2012. Bratislava : STU v Bratislave, 2013, s.99-100. ISBN 978-80-227-3869-9. Kategória publikácie do 2021: GII

- [2] DONOVAL, Daniel [40 %] - WEBER, Bedřich [30 %] - **HANIC**, Michal [20 %] - KOTRÍKOVÁ, Lýdia [10 %]. Pomôže našej elektronike prezentácia výsledkov? In Spolok absolventov a priateľov FEI STU - EF SVŠT. Ročenka 2012. Bratislava : STU v Bratislave, 2013, s.100-102. ISBN 978-80-227-3869-9. Kategória publikácie do 2021: GII

8. Zoznam použitej literatúry

- [1] Ebisawa, Fumihito, Takeshi Kurokawa, and Shigetoshi Nara. "Electrical properties of polyacetylene/polysiloxane interface." *Journal of applied physics* 54.6 (1983): 3255-3259.
- [2] Tsumura, Akira, Hiroshi Koezuka, and T. J. A. P. L. Ando. "Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film." *Applied Physics Letters* 49.18 (1986): 1210-1212.
- [3] Tang, Ching W. "Two-layer organic photovoltaic cell." *Applied physics letters* 48.2 (1986): 183-185.
- [4] Tang, Ching W., and Steven A. VanSlyke. "Organic electroluminescent diodes." *Applied physics letters* 51.12 (1987): 913-915.
- [5] Jen, Kwan-Yue, G. G. Miller, and Ronald L. Elsenbaumer. "Highly conducting, soluble, and environmentally-stable poly (3-alkylthiophenes)." *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications* 17 (1986): 1346-1347.
- [6] Horowitz, Gilles. "Organic field-effect transistors." *Advanced materials* 10.5 (1998): 365-377.
- [7] Green, Martin, et al. "Solar cell efficiency tables (version 57)." *Progress in photovoltaics: research and applications* 29.1 (2021): 3-15.
- [8] Prevaté z <https://www.innovationlab.de/en/printed-electronics/about-us/flexible-organic-sensors>
- [9] Forrest, Stephen R. *Organic electronics: foundations to applications*. Oxford University Press, USA, 2020.
- [10] Prevaté z <https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units>
- [11] Prevaté z <https://ams-osram.com/products/photodetectors/photodiodes/osram-metal-can-to39-ambient-light-sensor-bpw-21>