

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2019

Ing. Lukáš MRAČEK

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika

Ing. Lukáš Mraček

**Zlepšení stability organického elektrochemického
tranzistoru omezením vlivu redoxní fronty**

Školitel: Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 19. 11. 2015

Datum odevzdání práce: 16. 1. 2019

Plzeň, 2019

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne 16. 1. 2019

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat svému školiteli doc. Ing. Aleši Hamáčkovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování, za přátelský přístup při mentorování mé osoby po celou dobu mého doktorského studia a vůbec za možnost stát se členem Katedry technologií a měření na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Dále mé poděkování patří i všem kolegům z Katedry technologií a měření. Spolupráce s nimi byla vždy přínosem pro můj profesní i osobní rozvoj.

Zvláštní poděkování patří prof. RNDr. Stanislavu Nešpůrkovi, DrSc. za jeho konzultace při vyhodnocování a interpretaci výsledků v průběhu řešení práce.

Tato disertační práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607 a grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2018-016 „Diagnostika a materiály v elektrotechnice“.

Anotace

S objevem vodivých polymerů v 70. letech minulého století se otevřely nové možnosti výzkumu v oblasti organické elektroniky. Později se tyto materiály začaly využívat v kombinaci s tištěnou elektronikou. Právě oblasti tištěné elektroniky je věnován výzkum popsáný v této práci. Oblast tištěné elektroniky je ovšem velice rozsáhlá, a proto bylo veškeré úsilí směřováno pouze na jednu specifickou oblast a to na organický elektrochemický tranzistor. Předložená práce se zaměřuje na konstrukci organického elektrochemického tranzistoru, charakterizaci, zlepšení jeho stability a spínacích charakteristik.

V úvodu jsou popsány charakteristiky a vlastnosti organických konjugovaných vodivých polymerů, které umožňují konstruovat řadu elektronických součástek, včetně organického elektrochemického tranzistoru. V následující kapitole je popsán samotný organický elektrochemický tranzistor, je provedeno vymezení vůči ostatním typům organických tranzistorů, popsán princip funkce, uvedeny používané topologie a představeny nejčastěji používané materiály. Část této kapitoly je rovněž věnována aplikacím, ve kterých se lze nejčastěji s organickými elektrochemickými tranzistory setkat. Další kapitola se již věnuje počátečním experimentům prováděným na první a druhé generaci organických elektrochemických tranzistorů, popisu charakterizace a prezentaci prvotních výsledků. Navazující kapitola se již plně věnuje třetí generaci organických elektrochemických tranzistorů. Jednotlivé podkapitoly se věnují postupně vlivu elektrolytu, stabilitě a dalším vhodným materiálům pro organické elektrochemické tranzistory. Výsledkem práce je návrh vhodného materiálového uspořádání, napěťových poměrů pro provozování organického elektrochemického tranzistoru s dostatečnou stabilitou a rychlostí spínání pro aplikace plně tištěného spínacího prvku.

Klíčová slova:

organický elektrochemický tranzistor, poly(3,4-ethylenedioxythiofen) poly(styrenesulfonat) (PEDOT:PSS), iontová kapalina, spínací prvek

Annotation

With the discovery of conductive polymers in the 1970s, new opportunities for organic electronics research opened up. Later, these materials began to be used in combination with printed electronics. The field of printed electronics is devoted to the research described in this thesis. However, the field of printed electronics is very extensive, and therefore all effort was spent on one specific area, namely the organic electrochemical transistor. The presented work focuses on the construction of the organic electrochemical transistor, the characterization, the improvement of its stability and switching characteristics.

In the introduction are described characteristics and properties of organic conjugated conductive polymers, which allow the construction of a series of electronic components, including an organic electrochemical transistor. It is described the organic electrochemical transistor itself in the following chapter, namely, comparison with other types of organic transistors, description of function principle, topologies and frequently used materials. Part of this chapter is devoted to applications where the organic electrochemical transistors can be used. Next chapter is devoted to the preliminary experiments of the first and second generations of organic electrochemical transistors, the description of basic characteristics and functionality. The next chapter deals with the third generation of organic electrochemical transistors. The individual subchapters deal with electrolyte influence, stability, and other suitable materials for organic electrochemical transistors. The result of this work is the selection of materials and the design of organic electrochemical transistor with high switching ratio, long-time stability, and fast *ON-OFF* transition. All activities were aimed to get a fully printed stable switching element.

Keywords:

organic electrochemical transistor, poly(3,4- ethylenedioxythiophene) poly(styrene sulphonate) (PEDOT:PSS), ionic liquid, switching element

Obsah

OBSAH.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	12
1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	14
2 ORGANICKÉ KONJUGOVANÉ POLYMERY	15
2.1 VODIVOST A PŘENOS NÁBOJE V KONJUGOVANÝCH POLYMERECH	15
2.2 PRINCIP PŘENOSU NOSIČŮ NÁBOJE.....	17
2.3 DOPOVÁNÍ KONJUGOVANÝCH POLYMERŮ.....	18
2.3.1 Chemické dopování.....	20
2.3.2 Elektrochemické dopování.....	21
2.3.3 Dopování injekcí náboje.....	21
3 PRINCIP FUNKCE A APLIKACE OECT	22
3.1 PRINCIP FUNKCE ORGANICKÉHO ELEKTROCHEMICKÉHO TRANZISTORU	24
3.2 TOPOLOGIE OECT.....	27
3.2.1 Laterální topologie	27
3.2.2 Vertikální topologie	28
3.3 MATERIÁLY PRO OECT.....	29
3.3.1 Kanál	29
3.3.2 Kontakty.....	33
3.3.3 Elektrolyt	33
3.4 SENZOROVÉ APLIKACE OECT	35
3.5 SPÍNAČE A DALŠÍ OBVODY ZALOŽENÉ NA OECT	36
3.5.1 Optimalizace OECT pro spínače a další obvody.....	36
3.5.2 Pracovní režim OECT.....	37
3.5.3 Logické obvody s OECT.....	37
4 PRVNÍ A DRUHÁ GENERACE OECT.....	38
4.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERIZACE OECT.....	38
4.2 PRVNÍ GENERACE OECT	41
4.3 DRUHÁ GENERACE OECT.....	45
4.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ DOSAŽENÝCH NA PRVNÍ A DRUHÉ GENERACI OECT	48

5 TŘETÍ GENERACE OECT.....	49
5.1 OECT – VLIV ELEKTROLYTU.....	54
5.1.1 Tuhý elektrolyt.....	55
5.1.2 Tuhý elektrolyt – dlouhodobé měření.....	58
5.1.3 Kapalný elektrolyt.....	62
5.2 OECT – ŠÍŘENÍ REDOXNÍ FRONTY A STABILITA.....	77
5.2.1 Vliv redoxní fronty na chování OECT.....	78
5.2.2 Způsoby omezení vlivu redoxní fronty.....	81
5.3 VLIV TEPLoty NA STEJNOSMĚRNÝ PROUD I_{DS}	86
5.4 OECT – PEDOT:TOS.....	88
6 ZÁVĚR.....	93
LITERATURA.....	96
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA.....	105
A. PŘÍLOHA – PŘEHLED PARAMETRŮ OECT (LITERATURA).....	I

Seznam symbolů a zkratk

e (C)	Elementární náboj $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C	
E_A (eV)	Aktivační energie	
E_g (eV)	Šířka zakázaného pásu	
h (J·s)	Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s	
I_0 (A)	Proud ve výchozím stavu	
I_{DS} (A)	Proud procházející kanálem mezi elektrodami drain a source	
k_B (J·K ⁻¹)	Boltzmannova konstanta $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J·K ⁻¹	
ρ (kg·m ⁻³)	Hustota	
η (mPa·s)	Viskozita	
g_m (S)	Transkonduktance	
σ (S·m ⁻¹)	Měrná vodivost	
t (s)	Čas	
τ (s)	Časová konstanta	
t_{OFF} (s)	Čas vypnutí tranzistoru	
t_{ON} (s)	Čas zapnutí tranzistoru	
T (K)	Teplota	
T_0 (K)	Charakteristická teplota	
V_{DS} (V)	Napětí mezi elektrodami drain a source	
V_{GS} (V)	Napětí mezi elektrodami gate a source	
V_{th} (V)	Prahové napětí	
AJP	Aerosol Jet Print	Tisk materiálů ve formě aerosolu
BSA	Bovine serum albumin	Hovězí sérový albumin
DMSO	Dimethylsulfoxid	Dimethylsulfoxid
DNA	Deoxyribonucleic acid	Deoxyribonukleová kyselina
EDOT	3,4-Ethylenedioxythiophene	3,4-Ethylenedioxythiophene
EEG	Electroencephalography	Elektroencefalogram
EG	Ethylene glycol	Ethylenglykol
EGOFET	Electrolyte gated OFET	OFET s elektrolytem místo dielektrika
EKG	Electrocardiography	Elektrokardiogram

EOG	Electrooculography	Elektrookulogram
FET	Field effect transistor	Tranzistor řízený polem
HOMO	Highest occupied molecular orbital	Nejvyšší obsazený molekulový orbital
IL	Ionic liquid	Iontová kapalina
LUMO	Lowest unoccupied molecular orbital	Nejnižší neobsazený molekulový orbital
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor	Tranzistor řízený polem se strukturou kov – oxid – polovodič
OECT	Organic electrochemical transistor	Organický elektrochemický tranzistor
OFET	Organic field effect transistor	Organický tranzistor řízený polem
OTFT	Organic thin film transistor	Organický tenkovrstvý tranzistor
PA	Polyacetylene	Polyacetylen
PANI	Polyaniline	Polyanilin
Parylene C	poly(chloro-p-xylylene)	poly(chloro-p-xylylen)
PBS	Phosphate buffered saline	Fosfátem pufovaný fyziologický roztok
PEDOT	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)-poly(styrensulfonat)
PEDOT-S	Poly(4-(2,3-dihydrothieno[3,4-b]-[1,4]dioxin-2-yl-methoxy)-1-butanefulfonic acid)	Poly(4-(2,3-dihydrothieno[3,4-b]-[1,4]dioxin-2-yl-methoxy)-1-butanefulfonová kyselina)
PEDOT:Tos	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) tosylate	Poly(3,4-ethylenedioxythiopen)-tosylát
PET	Poly(ethylene terephthalate)	Poly(ethylen tereftalát)
ppm	Parts per million	Počet částic na jeden milion
PPy	Polypyrrole	Polypyrrol
PSS	Poly(styrene sulfonate)	Poly(styrensulfonat)
PT	Polythiophene	Polythiopen
PTAA	Poly(triarylamine)	Poly(triarylamin)
P3HT	Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)	Poly(3-hexylthiopen-2,5-diyl)

RTIL	Room temperature ionic liquid	Iontová kapalina (kapalná při pokojové teplotě)
SMU	Source measure unit	Zdroj s měřicí jednotkou
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis	Simulační program s důrazem na integrovaný obvod
WECT	Wire electrochemical transistor	Drátový elektrochemický tranzistor

Úvod

Materiály na organické bázi se v současné době začínají uplatňovat v elektrotechnických aplikacích v oblastech, kde dosud byly používány materiály anorganické. Intenzivní výzkum začal v roce 1967 a rychle se rozvinul po objevení zvýšené vodivosti dopovaného polyacetyleny v roce 1977 [1]. Autorům (Shirikawa, Heeger, MacDiarmid) byla za objev dopování polymerů v roce 2000 udělena Nobelova cena. Dnes je možné syntetizovat polymerní materiály v různých formách a širokém rozsahu vodivostí od izolantů až po vodiče. Nespornou výhodou těchto materiálů je jejich rozpustnost v běžných rozpouštědlech, což umožňuje využití rozličných depozičních metod. Mezi tyto metody patří například sítotisk, odstředivý tisk nebo tisk pomocí inkoustových tiskáren aj., který je možné aplikovat i na flexibilní substráty jako například papír či poly(ethylen tereftalát) (PET) folie. To umožňuje výrobu tištěných elektronických součástek a obvodů.

Vývoj v oblasti součástek založených na bázi organických polymerních materiálů probíhá v několika směrech, a proto je toto odvětví dnes velice rozsáhlé. Uvedeme několik příkladů hlavních skupin. Jsou to například baterie, elektrochromní a světlo emitující displeje, světlo emitující diody, antikoroziční a antistatické nátěry, solární články, chemické a biologické senzory, nelineární prvky založené na proudech omezených prostorovým nábojem a v neposlední řadě také tranzistory. Oblast tranzistorů můžeme dále členit do několika skupin: organický tranzistor řízený polem („OFET – Organic Field Effect Transistor“), organický tenkovrstvý tranzistor („OTFT – Organic Thin Film transistor“), organický tranzistor řízený polem s elektrolytem místo řídicí elektrody („EGOFET – Electrolyte Gated Field Effect Transistor“) a elektrochemický organický tranzistor („OECT – Organic ElectroChemical Transistor“).

Tato práce je zaměřena na organický elektrochemický tranzistor (OECT), jehož příprava a vlastnosti byly poprvé publikovány v roce 1984 [2]. Tento typ tranzistoru využívá jak elektronové tak i iontové vlastnosti organických materiálů ke své funkci. Jeho vývojem se dnes zabývá několik vědeckých týmů po celém světě. Je možné jej použít v mnoha aplikacích: senzory, paměti, spínače a logické obvody. Předkládaná práce se vymezuje na oblast spínačů a logických obvodů. Klade si za cíl zlepšit základní parametry OECT, jako je spínací poměr a rychlost spínání volbou vhodné topologie, materiálového složení a geometrie součástky.

V úvodu práce jsou ve stručnosti popsány organické konjugované materiály, jejich vlastnosti, elektrická vodivost a proces dopování.

Třetí kapitola popisuje princip funkce OECT a topologie, ve kterých je možné OECT vyrobit a shrnuje současný stav vývoje tranzistoru. Jsou zmíněny nejen spínače a elektronické obvody, ale i senzorové elementy.

Čtvrtá kapitola ve zkratce prezentuje výsledky měření dosažených na prvních dvou generacích OECT.

Poslední kapitola se plně věnuje třetí generaci OECT. Jsou zde prezentovány výsledky experimentů a popsány nejběžnější problémy, které se u tohoto typu tranzistoru vyskytují. Jsou zde popsány možnosti, jak tyto problémy odstranit, nebo alespoň omezit s cílem připravit součástku se zvýšenou stabilitou a spolehlivostí. Kromě toho je velká část této kapitoly věnována testování vhodných elektrolytů, které rovněž zlepší chování samotného OECT.

1 Cíle disertační práce

Před započítím prací byly stanoveny následující cíle, které jsou následně v disertační práci řešeny:

Vyhodnocení vlivu elektrolytu na chování OECT

Vliv elektrolytu na výsledné chování OECT je značný. Volba vhodného elektrolytu je klíčovým krokem, který je nutné vyřešit. Existuje celá řada elektrolytů, které lze použít v kombinaci s OECT. Mohou to být elektrolyty kapalně, gelové nebo tuhé. Každý typ elektrolytu má své výhody a nevýhody. V rámci této práce bude probíhat testování především kapalných elektrolytů, konkrétně iontových kapalin, jelikož se na základě prvotních testů ukázaly jako vhodným materiálem v kombinaci s OECT.

Stabilizace vlastností a studium procesů probíhajících v OECT

Velkým problémem současných OECT je stálost a stabilita jejich vlastností. Provozem dochází k jejich postupné degradaci. Tento jev je nejvíce přikládán za vinu šíření redoxní fronty. Jedním z cílů této práce je tedy navrhnout takové řešení, ať již úpravou topologie, volbou vhodných materiálů nebo jinými technikami, které bude řešit problém se stabilitou OECT. S tím souvisí i studium a hlubší pochopení procesů, které probíhají v OECT a ovlivňují jeho funkci.

Volba dalších materiálů pro kanál OECT

Na základě dostupných prací v oblasti OECT je nejvíce používaným materiálem pro jejich kanál poly(3,4-ethylenedioxythiofen) (PEDOT) dopovaný pomocí poly(styrenulfonát) (PSS). Otázkou tedy je, jaké další materiály lze využít jako alternativu k PEDOT:PSS. Dalším cílem této disertační práce tedy je využít jiný materiál/y a ověřit jeho/jejich vhodnost v kombinaci s OECT.

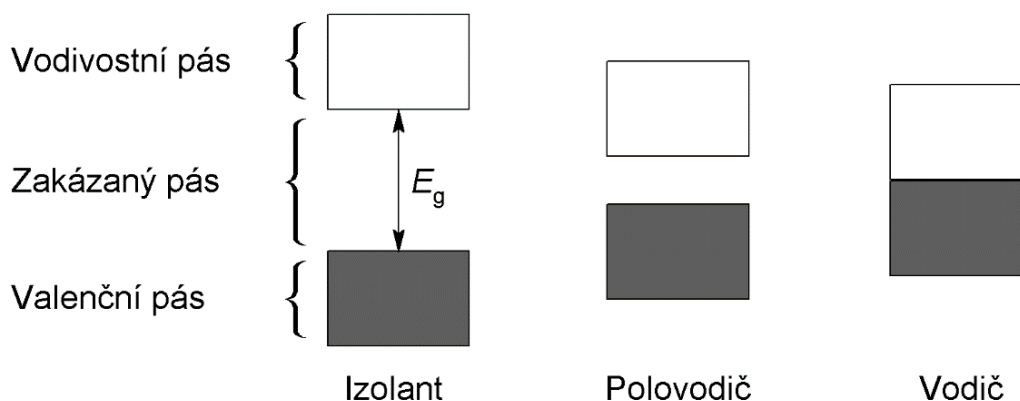
2 Organické konjugované polymery

Polymerní materiály byly dlouhou dobu považovány za izolanty, jako příklad lze uvést polystyren, polyetylen a další. Objev polymerů s vlastní vodivostí, nebo jinak konjugovaných polymerů, zcela změnil tuto vědní oblast. Jako zástupce konjugovaných polymerů lze uvést polyacetylen, polyanilin, polypyrrol, polythiofen a jejich deriváty. Konjugované polymery jsou někdy nazývány též jako „syntetické kovy“ vzhledem k některým, kovům podobným, charakteristikám.

Obecně je vodivost nedopovaných konjugovaných polymerů $10^{-7} - 10^{-11} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ [3]. Dopované, chemicky a tepelně upravené polymery vykazují elektrickou vodivost řádu až $10^3 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ [4]. Obecně můžeme konjugované organické materiály zařadit do kategorie polovodičů. Velkým problémem je nízká pohyblivost nosičů náboje, která je převážně určována mechanismem přeskoků elektronů a děr (hopping).

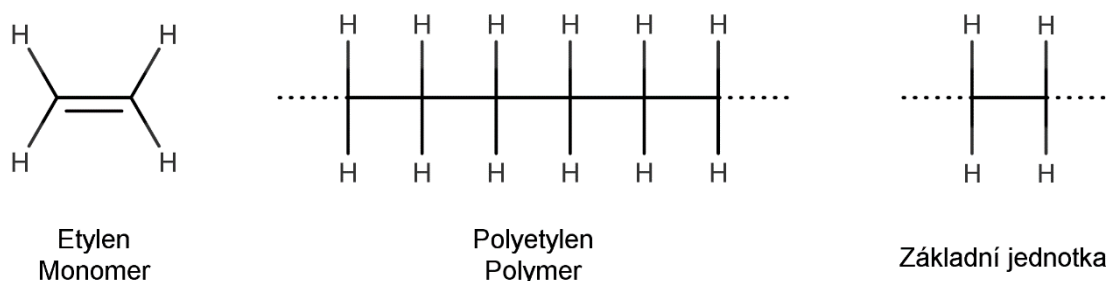
2.1 Vodivost a přenos náboje v konjugovaných polymerech

Za vedení elektrického proudu v materiálu jsou zodpovědné elektrony a díry. Aby se elektron stal volným, musí se pohybovat ve vodivostním pásu. Jeho přechod z valenčního pásu do vodivostního pásu s vyšší energií je možné realizovat tepelně, světelně (fotovodivost) nebo pomocí příměsí, kdy dochází k posunu Fermiovy energie. Energetický rozdíl mezi nejnižší energií vodivostního pásu a nejvyšší energií valenčního pásu je definován jako zakázaný pás s energií E_g (eV). Z velikosti zakázaného pásu lze určit, zda se jedná o izolant, polovodič nebo vodič, viz Obr. 1. Izolanty, jako guma, bakelit, dřevo, saturované polymery aj., mají zakázaný pás velice široký. V případě saturovaných polymerů izolačního typu může být šířka zakázaného pásu větší než 8 eV. U vodičů se zakázaný pás nevyskytuje, valenční a vodivostní pásy jsou spojeny a u dobrých vodičů, jako je měď, stříbro nebo zlato, se dokonce překrývají.



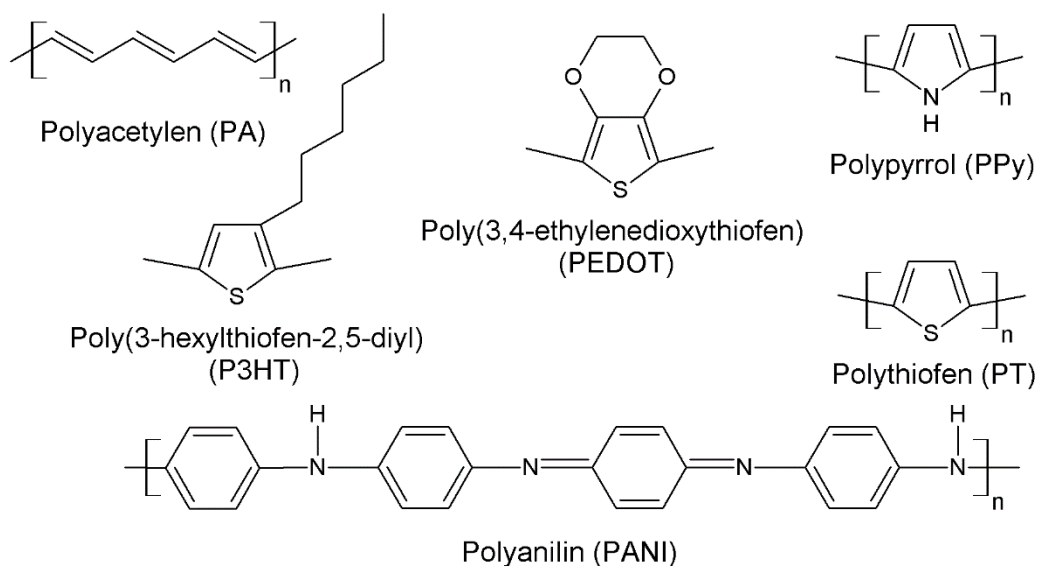
Obr. 1 Pásový model vodivosti.

Saturované polymery, jako například polyetylen, viz Obr. 2, jsou z pohledu elektrických vlastností zajímavé jako izolanty. Je to zapříčiněno tím, že všechny čtyři valenční elektrony uhlíku se účastní kovalentních σ -vazeb. Nezbývá tedy žádný volný elektron, který se může podílet na přenosu náboje. Na rozdíl od saturovaných polymerů mají konjugované polymery jiné uspořádání. Vyznačují se střídáním jednoduchých a dvojných vazeb podél řetězce molekuly. Tři ze čtyř valenčních elektronů uhlíku jsou v sp^2 hybridizovaném orbitalu a podílejí se na σ -vazbách. Zbývající čtvrtý elektron v p_z orbitalu vytváří π -vazbu. Překryv π -orbitalů podél polymerního řetězce umožňuje přenos náboje. Profesor B. Rånby nazval vodivé konjugované polymery „čtvrtou generací polymerních materiálů“ [5].



Obr. 2 Monomer, polymer a základní jednotka polyetyleny.

I v případě polymerních materiálů lze použít pásový model, viz Obr. 1. Polyacetylen, Obr. 3, je nejjednodušším konjugovaným polymerem. Uhlíkové atomy v polymerním řetězci jsou vázány střídavými jednoduchými a dvojnými vazbami. Ke každému uhlíkovému atomu je vázán vodíkový atom pomocí σ -vazby (dle chemické nomenklatury se vodíkové atomy neznázorňují). I když konjugované polymery mají volné elektrony, vyznačují se poměrně širokým zakázaným pásem (3 – 4 eV) a jsou tedy polovodivé. Koncentrace nosičů náboje je malá a klesá se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. Na Obr. 3 jsou ukázány nejběžnější konjugované polymery.



Obr. 3 Molekulové struktury nejběžnějších konjugovaných polymerů.

π -konjugované polymery jsou většinou P typu vzhledem k vysokému ionizačnímu potenciálu, jako např. PEDOT:PSS. To umožňuje snadnou oxidaci polymeru, čímž vznikne nadbytečná koncentrace děr. Pokud má polymer nízkou elektronovou afinitu, bude typu N. Organické polovodiče typu N jsou méně stabilní v porovnání s polymery typu P důsledkem menší chemické stability. Polymery typu N se dají připravit ze struktur typu P záměnou některých atomů v molekule, např. atomy vodíku, případně uhlíku atomem fluoru.

2.2 Princip přenosu nosičů náboje

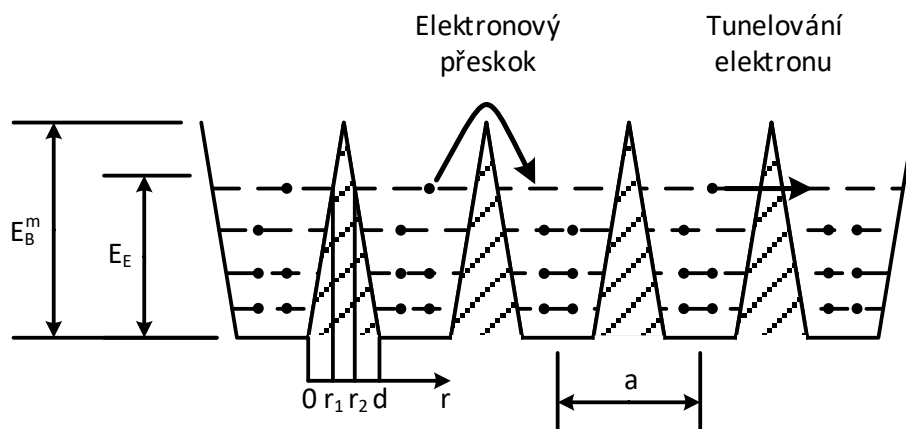
Přenos nosičů náboje je u organických polovodičů odlišný od krystalických anorganických polovodičů. Hlavním důvodem je to, že organické materiály jsou tvořeny množstvím různě dlouhých molekul, které jsou v objemu polovodiče většinou neuspořádané a vytvářejí tzv. polymerní síť. Pohyb nosičů náboje je tak řízen kombinací několika jevů. Delokalizovaný náboj se nejnáze pohybuje přes π -orbitaly podél polymerního řetězce. Ten má ale omezenou délku, případně může být nějakým způsobem porušeno střídání jednoduchých a dvojných vazeb. Pohyb náboje je omezen a náboj je lokalizovaný. K dalšímu pohybu může docházet buď tunelováním, nebo přeskoky mezi řetězci. Dalším typem přenosu nosičů náboje je transport mezi přidanými částicemi, tzv. perkolace [3].

Přeskoky nosičů mezi molekulami silně ovlivňují pohyblivost nosičů náboje μ . Energie potřebná k přeskoku mezi polymerními řetězci E_B^m je dána velikostí vazeb mezi molekulami. Její velikost je jen několik desetin elektronvltu. Mezi molekulami totiž působí jen velmi slabé

Van der Waalsovy síly. K přeskokům dochází s pravděpodobností úměrnou Boltzmannovu faktoru $\exp(-E_B^m/kT)$. Pohyblivost je možné určit dle vztahu

$$\mu = (ed^2v_p/kT)\exp(-E_B^m/kT), \quad (1)$$

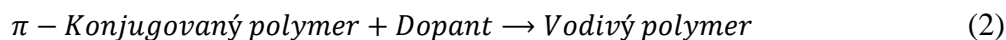
kde d je šířka bariéry, E_B^m její výška a v_p střední přeskoková frekvence. Ilustrativní ukázka přeskoků/tunelování viz Obr. 4 [6].



Obr. 4 Schéma intermolekulárního přenosu elektronu [6].

2.3 Dopování konjugovaných polymerů

Oproti saturevaným polymerním materiálům je v případě konjugovaných polymerů snížena energie zakázaného pásu na hodnoty 3–6 eV. Je možné je označit již za slabé polovodiče, ale jejich vodivost je stále nízká. Další zvýšení vodivosti je možné získat dopováním, což je velice efektivní proces, kterým lze dosáhnout zvýšení jejich vodivosti až o několik řádů.



Dopování konjugovaných polymerů má za následek zvýšení vodivosti vlivem zvýšení koncentrace nosičů n . Dopování se provádí oxidací pomocí akceptorů (odebrání elektronu), čímž vzniká díra v řetězci nebo redukcí pomocí donorů (přidání elektronu), čímž vzniká volný elektron v řetězci. Výslednou vodivost vodivého polymeru ovlivňuje kromě množství dopantu i jeho rovnoměrné rozložení a v neposlední řadě také jeho základní vlastnosti.

Začleněním dopantu do polymerní matrice mohou vzniknout nové defekty. Vzhledem k tomu, že je tento proces reversibilní, nezpůsobují tyto defekty trvalou změnu polymerní matrice a nedochází tak ke stálé degradaci polymeru. V jednom materiálu může proběhnout jak

redukční, tak i oxidační reakce, neboli redox reakce. Dopováním vzniknou defekty, které se nazývají: polarony a bipolarony.

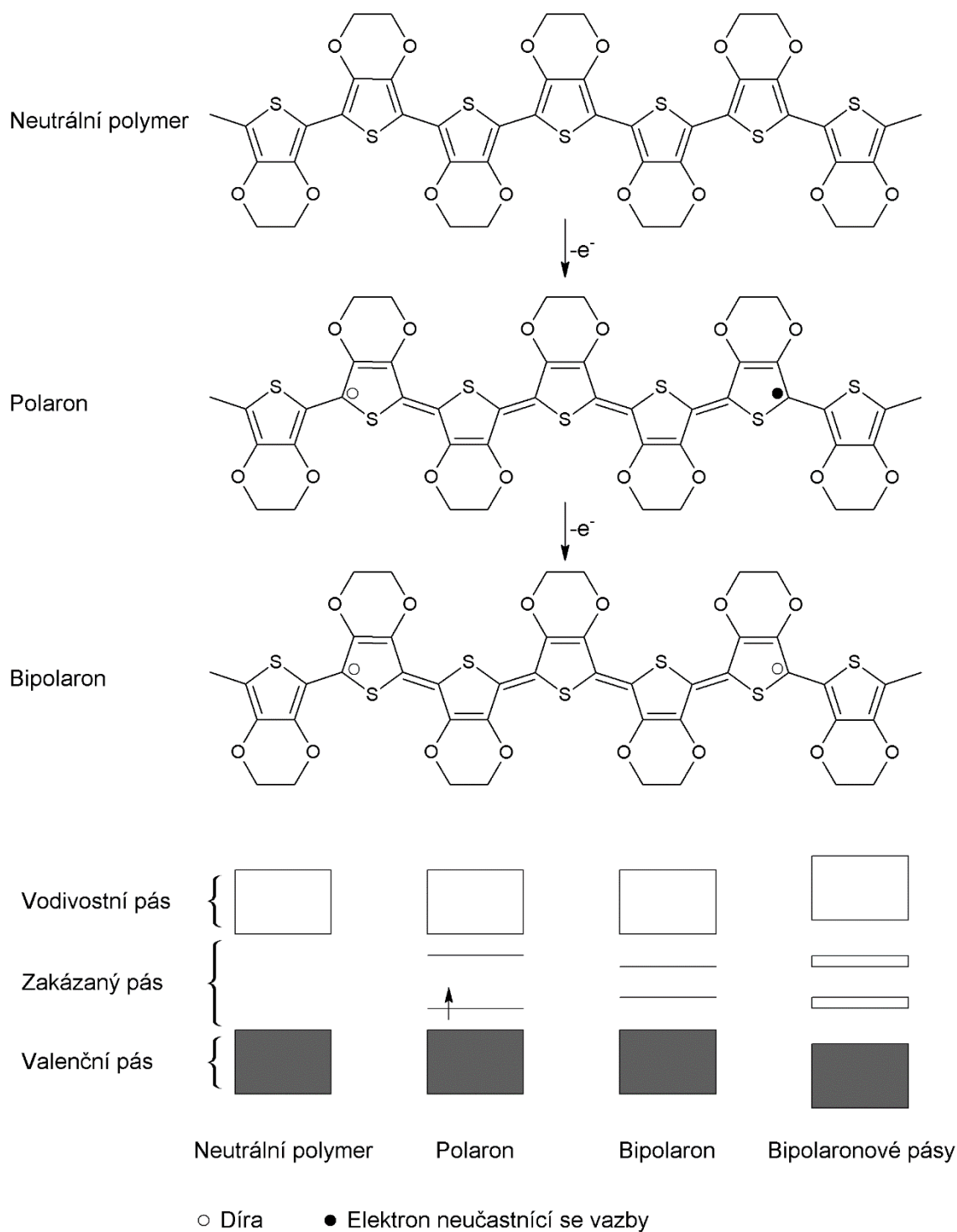
Polaron

Odebráním/přidáním jednoho elektronu a vznikem díry/elektronu dochází k deformaci mřížky a vzniklý náboj se nazývá polaron s kladným/záporným nábojem. Tento stav (tj. náboj i s deformací mřížky/řetězce) se pohybuje podél polymerního řetězce, příp. přeskoky mezi řetězci, a přispívá k vodivosti. Kromě deformace mřížky způsobí vznik polaronu i změnu ve struktuře energetických úrovní, viz Obr. 5. Vzniknou dvě nové energetické hladiny, jedna je poblíž valenčního pásu a druhá je poblíž vodivostního pásu. V případě vzniku polaronu s kladným nábojem je jeho energetická hladina nad valenčním pásem. Naopak polaron se záporným nábojem se nachází na energetické hladině pod vodivostním pásem. V obou případech má vzniklý polaron spin $\frac{1}{2}$. Energetická vzdálenost nově vzniklých úrovní od valenčního a vodivostního pásma je závislá na šířce zakázaného pásu, délce řetězce polymeru a na deformační energii. Polarony vznikají při dopování základního materiálu množstvím dopantu přibližně 0.1 až 1 mol%. [7, 8].

Bipolaron

Při vyšší úrovni dopování (1 až 5 mol%) vzniká nový stav, bipolaron, tvořený párem polaronů se stejným nábojem. Bipolaron má stejně jako polaron dvě energetické úrovně uvnitř zakázaného pásu. V případě záporného bipolaronu jsou obě úrovně plně zaplněné, v případě kladného bipolaronu jsou naopak prázdné, pokaždé však s nulovým spinem. Pokud je úroveň dopování ještě vyšší než je potřebná pro vznik bipolaronu (25 – 50 mol%), dochází k překrývání bipolaronových stavů a vzniku tzv. bipolaronových pásů, viz Obr. 5 [9].

Při porovnání dopování anorganických a organických polovodičů je patrný rozdíl v množství přidaného dopantu. Jestliže v případě anorganických polovodičů jsou přidávány jednotky ppm dopantu u organických polovodičů se přidává v některých případech až 50 % výsledné hmotnosti vodivého polymeru.

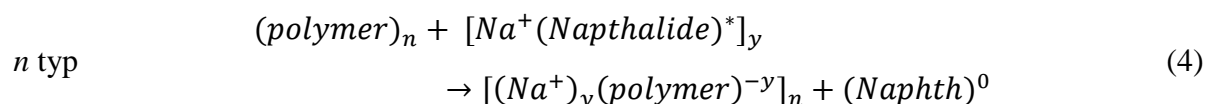
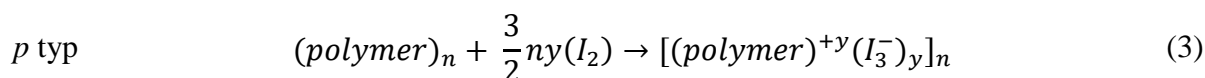


Obr. 5 Vznik kladného polaronu a bipolaronu v molekule materiálu PEDOT. Vznik těchto stavů je doplněn o pásový model ilustrující tento děj [10].

2.3.1 Chemické dopování

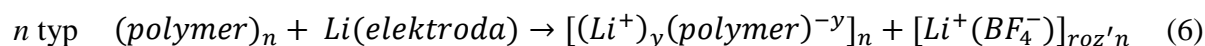
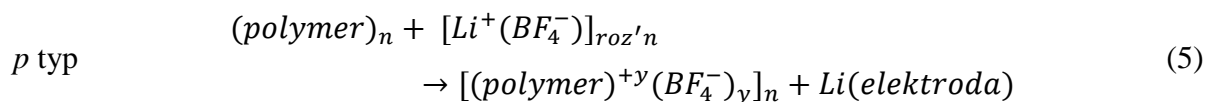
Polymer je možné dopovat na oba typy vodivosti. Vodivosti typu *p* se dosahuje pomocí oxidace polymerního řetězce odebráním jednoho elektronu (3), například pomocí I_2 nebo AsF_5 . Vodivosti typu *n* se dosahuje pomocí redukce polymerního řetězce přidáním jednoho volného

elektronu (4), například pomocí Na nebo K. Tato metoda je efektivní a jednoduchá, ale celý proces dopování je hůře kontrolovatelný a výsledný polymer nemusí být dopován homogenně, především při nižších úrovních dopování [11].



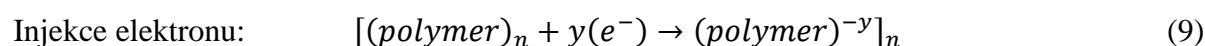
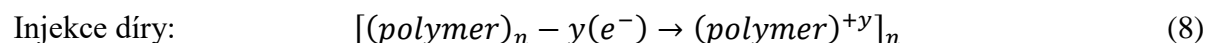
2.3.2 Elektrochemické dopování

Elektrochemické dopování odstraňuje nedostatky chemického dopování. Při elektrochemickém dopování dodává elektroda redox náboj do vodivého polymeru, zatímco elektrolyt kolem dopovaného polymeru je zdrojem iontů. Tyto ionty difundují do/z polymerní struktury a kompenzují elektrický náboj (5) a (6). Úroveň dopování se řídí pomocí napětí přiloženého mezi vodivý polymer a pomocnou elektrodu. Požadované úrovně dopování polymeru je dosaženo přiložením vhodné velikosti napětí po dostatečnou dobu, za kterou nastane elektrochemická rovnováha [11].



2.3.3 Dopování injekcí náboje

Elektrony a díry mohou být injektovány z kovového kontaktu do vodivostního a valenčního pásu. Díry jsou injektovány do valenčního pásu a dochází k oxidaci polymeru (8), elektrony jsou naopak injektovány do vodivostního pásu a dochází k redukci polymeru (9). Nejedná se ale o dopování v pravém slova smyslu, jako v případě chemického a elektrochemického dopování, neboť zde chybí protiionty a dopování není stálé. Po odpojení napětí se vrací „excitované“ částice zpět do původních stavů [11].



3 Princip funkce a aplikace OEET

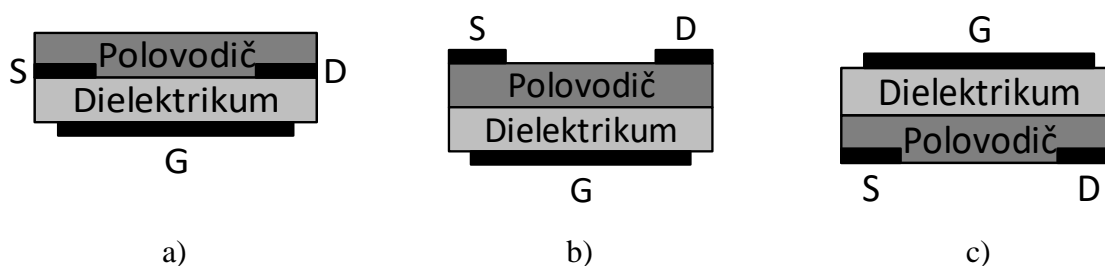
Tato kapitola je věnována organickému elektrochemickému tranzistoru (OEET – „Organic Electrochemical Transistor“). Tento tranzistor patří do nadřazené skupiny tzv. organických tenkovrstvých tranzistorů (OTFT – „Organic Thin Film Transistor“), kam kromě již zmíněného patří rovněž organický polem řízený tranzistor (OFET – „Organic Field Effect Transistor“) a organický polem řízený tranzistor s elektrolytickým gatem (EGOFET – „Electrolyte Gated Field Effect Transistor“). Uvedme hlavní rozdíly výše zmíněných typů organických tranzistorů.

OFET

OFET, neboli organický tranzistor řízený polem je principem fungování podobný tranzistoru MOSFET. Elektrody source a drain jsou spojeny polovodivým materiálem, který tvoří kanál, třetí elektroda gate je oddělena pomocí vrstvy dielektrika. Jestli se jedná o tranzistor s typem vodivosti p nebo n určuje materiál tvořící kanál stejně jako v případě ochuzovacího a obohacovacího režimu. Tyto režimy se liší tím, zda je kanál tranzistoru bez přiloženého napětí na řídicí elektrodu vodivý, respektive nevodivý.

Z pohledu topologie OFET je možné se setkat nejběžněji se třemi uspořádáními, které se liší v pořadí jednotlivých vrstev, viz Obr. 6.

Princip funkce je založen na působení elektrostatického pole na nosiče náboje v organickém materiálu viz Obr. 7. Gate je tenká homogenní vrstva. V případě obohacovacího režimu dochází vlivem přiloženého potenciálu na řídicí elektrodu gate ke vzniku tenké vodivé vrstvy pod vrstvou dielektrika. K tomu, aby procházel kanálem proud, musí být připojeno i napětí mezi elektrody drain a source [12].



Obr. 6 Nejběžnější topologie OFET (S – source, D – drain, G – gate). a) spodní gate – spodní kontakty (BG – BC), b) spodní gate – horní kontakty (BG – TC), c) horní gate – spodní kontakty (TG – BC) [13].

Velkou nevýhodou OFET jsou pracovní napětí, která jsou nutná k jejich správné funkci. Jedná se o napětí řádově desítek voltů [14], což činí tyto tranzistory nepoužitelné v nízkoúrovňových aplikacích, kde se vyžaduje pracovní napětí v řádech jednotek voltů. Ovšem

i zde došlo k jistým pokrokům a již je možné se setkat s OFET pracujícími do úrovně 10 V [15]. Další velkou nevýhodou je jejich poměrně složitá příprava v čistých prostorech [16].

EGOFET

Tento typ tranzistoru leží na pomyslné hranici mezi OFET a OECT. Jak název napovídá, gate elektroda je ponořena do elektrolytu, který má podobnou funkci jako dielektrikum v případě OFET. Jako elektrolyt může být použita celá řada materiálů, např. tekuté elektrolyty [17, 18], polymerní elektrolyty [19], iontové kapaliny [20], iontové gely [21, 22] a polyelektrolyty [23]. I v případě tohoto typu organického tranzistoru se uplatňuje elektrostatické pole, které formuje elektrostatickou dvojvrstvu na rozhraní mezi elektrolytem a organickým polovodičem a gate elektrodou a elektrolytem, viz Obr. 7. V podstatě se vytvoří dva kondenzátory s relativně velkou kapacitou vlivem velice tenkých vzniklých vrstev, které vzniknou na obou rozhráních. Kapacita bývá od jednotek až po desítky $\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$. To umožňuje pracovat s velmi nízkým napětím v porovnání s OFET [23].

OECT

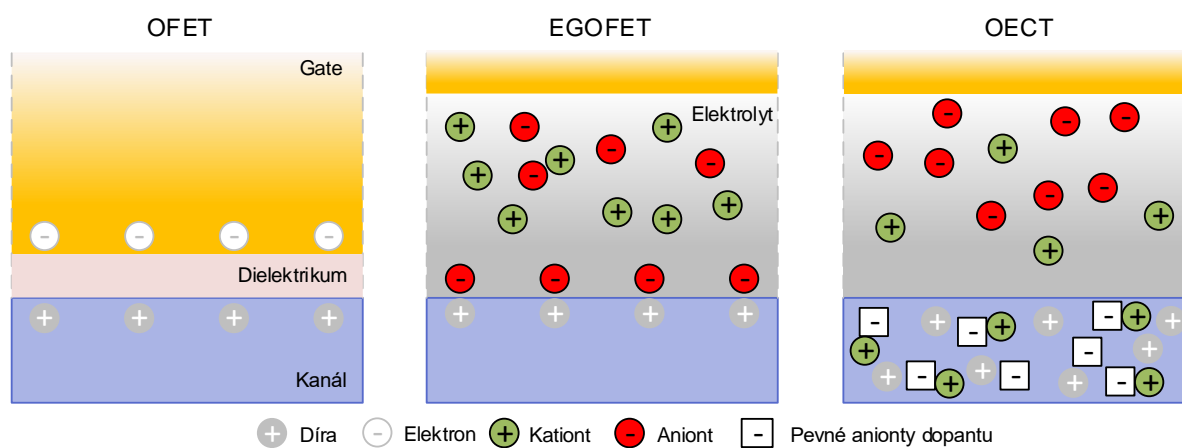
Na rozdíl od předchozích dvou typů organických tranzistorů nevznikají u OECT žádné vrstvy kladných nebo záporných nosičů náboje. Princip spočívá v oxidaci a redukci aktivního polovodičového materiálu, který spojuje elektrody source a drain. Přiložením napětí vhodné polaritě na řídicí elektrodu gate dojde k redukci aktivního materiálu v kanálu a tím se změní jeho odpor, viz Obr. 7. To má za následek modulaci proudu, který tímto kanálem protéká [24]. Princip funkce je uveden dále v této kapitole.

Jednou ze základních výhod OECT je velikost pracovních napětí, ta jsou v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$ V [25, 26]. Další nespornou výhodou je možnost výroby celé struktury pomocí běžných tiskových metod, bez nutnosti využívat vakuum či čisté prostory [27, 28]. Tuto součástku je možné použít v širokém rozsahu aplikací od senzorů [29], kde použité materiály umožňují jejich nasazení i v kontaktu s lidským tělem [30], až po spínače u plně tištěných displejů [31].

Všechny výše zmíněné výhody vedly k volbě právě OECT jako ideálního kandidáta pro další studium a testování jeho vlastností s cílem využití těchto tranzistorů v plně nebo alespoň částečně tištěných systémech, kde by jeho vlastnosti byly dostatečné pro zajištění spolehlivé požadované funkce.

Organické tranzistory jsou relativně širokou podoblastí elektroniky založené na bázi organických materiálů. Ne vždy musí být celá struktura vyrobena z organického materiálu. Při výrobě organických tranzistorů lze kombinovat řadu výrobních postupů v závislosti na

použitém materiálu. V případě organických materiálů se s výhodou využívají metody umožňující tisk z tekuté disperze („inkoust“). Mezi tyto metody patří například sítotisk, odstředivý tisk, tisk pomocí spreje („airbrush“), tisk využívající princip inkoustových tiskáren a v neposlední řadě tisk pomocí aerosolu (AJP – „Aerosol Jet Printing“) [32 kap. 12, 33]. Je samozřejmě možné využít i litografické metody pro tvorbu požadovaných motivů [34]. V případě výroby vrstev z jiných než organických materiálů se často využívá napařování a napařování a to hlavně vodivých kontaktů [35]. Je samozřejmě možné využít i inkousty s částicemi některých kovů, jako např. Pt, Au a Ag.



Obr. 7 Grafické znázornění principů fungování jednotlivých typů organických tranzistorů [24].

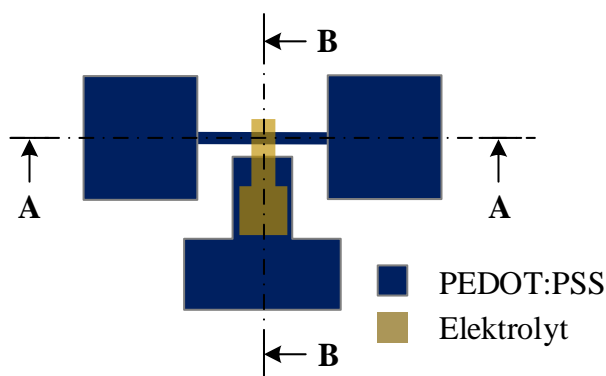
3.1 Princip funkce organického elektrochemického tranzistoru

Na úvod popisu funkce OEET je nutné zmínit, že princip funkce OEET není ještě dokonale popsán a v mnoha publikacích je možné se setkat s odlišnými popisy funkce. Na základě provedené literární rešerše i praktických měření OEET se zdá být ovšem nejpravděpodobnější popis funkce pomocí difuze (elektrodifuze) kationtů a redukce polymeru v kanálu [27, 36, 37]. Celý tento princip bude dále podrobně popsán.

Organický elektrochemický tranzistor je v podstatě klasický tří-elektrodový tranzistor, kde jsou elektrody source a drain propojeny pomocí kanálu z vodivého polymeru. Třetí elektrodou je řídicí elektroda gate, která není s kanálem přímo spojena [24]. Někdy je možné se setkat i se čtyř elektrodovou variantou s dvojitou gate elektrodou [38]. V případě organického elektrochemického tranzistoru slouží k propojení kanálu a řídicí elektrody elektrolyt. Ten musí být schopen dodávat kationty potřebné k redox reakci mezi elektrolytem a kanálem [39].

Z pohledu uspořádání jednotlivých funkčních vrstev je možné se setkat se dvěma topologiemi. Tou jednodušší topologií je laterální, někdy nazývána též planární, kde jsou téměř všechny části OECT v jedné vrstvě [40]. Druhou variantou je vertikální topologie, kde jsou na sebe jednotlivé části postupně vrstveny [41]. Obě tyto varianty mají své výhody i nevýhody, které budou dále v této kapitole diskutovány.

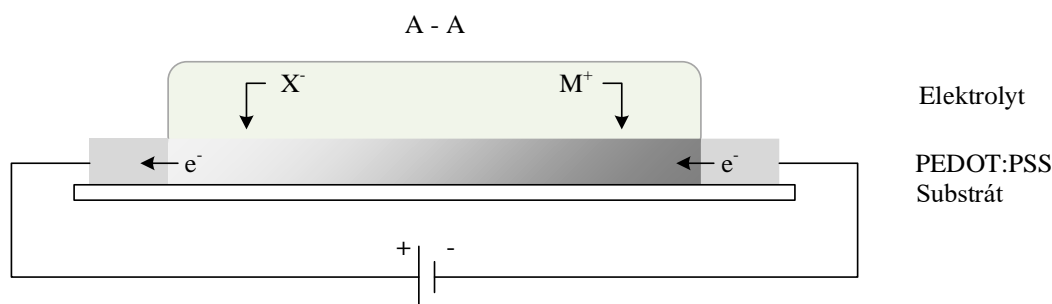
Z pohledu funkce OECT je možné popsat princip fungování jako modulaci proudu procházejícího kanálem pomocí přiloženého napětí, vhodné velikosti a orientace, k řídicí gate elektrodě. OECT funguje v podstatě jako MOSFET tranzistor s kanálem typu P pracující v ochuzovacím režimu. To znamená, že přivedením kladného napětí na gate elektrodu dochází k ovlivňování proudu procházejícího kanálem. Při dosažení mezní hodnoty dojde k jeho úplnému uzavření [41]. Zde ale podobnost s FET tranzistory končí, neboť v jejich případě dochází k modulaci proudu kanálem pomocí elektrostatického pole. FET tranzistory pracují v nefaradaickém režimu, což znamená, že elektrony, které dosáhnou rozhraní elektroda – dielektrikum – kanál se zastaví a tím dochází ke vzniku nábojové dvojvrstvy. Naopak je tomu u OECT, které pracují v tzv. faradickém režimu. Elektrony, které doputují na rozhraní elektrolyt – kanál, se podílejí na redox reakci. Popis funkce je možné vysvětlit s využitím základní struktury OECT, viz Obr. 8. V tomto obrázku jsou vyznačeny i řezy, ze kterých vychází dva schematické modely využitě při dalším popisu.



Obr. 8 Zjednodušená struktura OECT s vyznačenými řezy A - A a B - B.

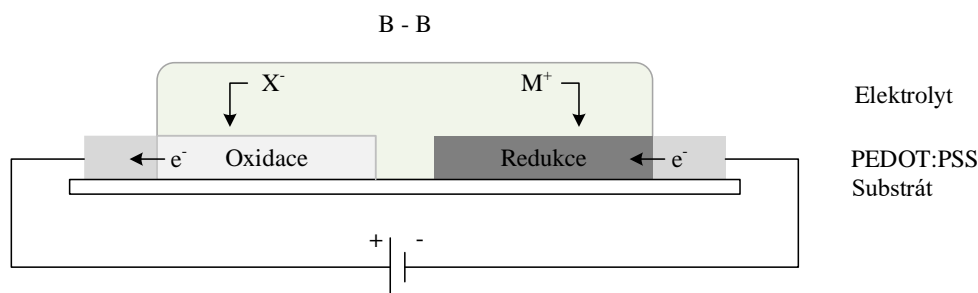
Při pohledu z řezu A - A je možné vytvořit tzv. dynamický model [10], viz Obr. 9. Střední část vrstvy PEDOT:PSS (PEDOT je po dopování PSS polovodivým polymerem typu P) je překryta elektrolytem. Když je na konce vrstvy PEDOT:PSS přiloženo napětí, vytvoří se podél něho a podél hraniční vrstvy PEDOT:PSS - elektrolyt gradient elektrochemického potenciálu. To má za následek vznik redox reakce mezi PEDOT:PSS a elektrolytem. Uvnitř PEDOT:PSS vrstvy pak dochází k redukci v blízkosti záporně nabitě elektrody a k oxidaci v blízkosti kladně

nabité elektrody. Doba trvání redox reakce je limitována vyrovnáním elektrochemického potenciálu. Tím se vytvoří podél PEDOT:PSS vrstvy koncentrační gradient dopovaného a nedopovaného PEDOTu (v tomto případě je možná optická detekce, neboť oxidace a redukce má za následek změnu absorpčního spektra - elektrochromismus). Po vytvoření rovnováhy prochází PEDOT:PSS vrstvou pouze děrový proud. S rostoucím napětím proud roste lineárně, ale po dosažení kritického potenciálu dochází k proudové saturaci.



Obr. 9 Dynamický model, M^+ představuje kationt, X^- představuje aniont a e^- elektron [10].

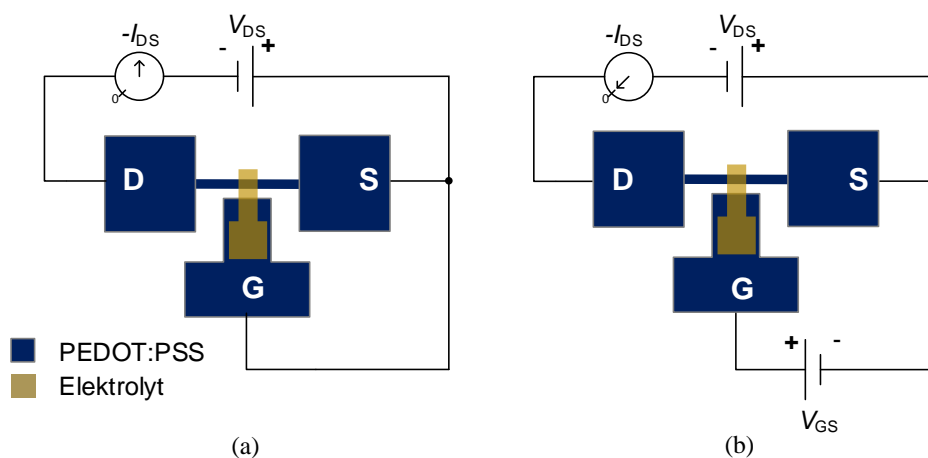
Při pohledu z řezu B – B je možné vytvořit tzv. bi-stabilní model, viz Obr. 10. V základním stavu je PEDOT:PSS film oxidovaný. Po přiložení napětí na elektrody se elektronový proud v PEDOT:PSS konvertuje na iontový proud v elektrolytu důsledkem redox reakcí probíhajících u elektrod. Po přiložení napětí k tranzistoru bude kladná elektroda PEDOTu dále oxidovaná, což se projeví zvýšením koncentrace polaronů. Aby se tento proces uskutečnil, musí kationty migrovat z PEDOT:PSS filmu anebo anionty musí migrovat do PEDOT:PSS vrstvy aby byla zachována elektrická neutralita. To znamená, že elektrochemická reakce musí probíhat u obou elektrod. U záporné elektrody (katody) je $PEDOT^+$ redukován na neutrální $PEDOT^0$, což se projeví poklesem bipolaronové koncentrace. Kationty migrují mezi PEDOT:PSS filmem a elektrolytem, aby byla zachována neutralita systému. PSS^- anionty jsou příliš velké, aby docházelo k jejich migraci do elektrolytu. Tento typ modelu je bistabilní, tj. když je napájení odpojeno, PEDOT u obou PEDOT:PSS elektrod zůstává ještě určitou dobu v redox stavu. Počet bipolaronů klesá během redukce.



Obr. 10 Bi-stabilní model, M^+ představuje kationt, X^- představuje aniont a e^- elektron [10].

Kombinací dynamického (Obr. 9) a bi-stabilního (Obr. 10) modelu může být popsána funkce OEET. Na Obr. 11 je ukázána funkce OEET jak v *ON* stavu a), tak i v *OFF* stavu b). Bez přiloženého napětí V_{GS} (Obr. 11 (a)) se OEET chová dle Obr. 9. Velikost děrového proudu I_{DS} , který protéká kanálem je závislá převážně na odporu kanálu a má lineární volt-ampérovou charakteristiku. Přiložené kladné napětí V_{GS} způsobí elektrochemickou reakci, při níž dochází k uzavírání kanálu. Uzavírání kanálu je zapříčiněno redukcí PEDOT:PSS dle (10). Tato rovnice popisuje redox reakci probíhající mezi PEDOT:PSS a elektrolytem. Ve směru zleva doprava dochází k redukcí a materiál PEDOT:PSS přechází ze svého základního oxidovaného (vodivého) stavu do neutrálního (nevodivého) stavu $PEDOT^0$. Ve směru zprava doleva se naopak jedná o oxidaci, čímž se nevodivý $PEDOT^0$ stává opět vodivým $PEDOT^+$. Tato reakce probíhá jen za podmínky přítomnosti kationtů M^+ schopných účastnit se této reakce.

Celý proces je vratný, což znamená, že po odpojení řídicího napětí se tranzistor vrací do svého výchozího stavu, což znamená do *ON* stavu.



Obr. 11 (a) OEET bez napětí na gate elektrodě – proud je závislý pouze na vlastní vodivosti PEDOT:PSS. (b) OEET s přiloženým napětím na gate elektrodě. Proud je ovlivněn velikostí proudu nedopovaného organického polymeru PEDOT:PSS. (D – drain, S – source, G – gate)

3.2 Topologie OEET

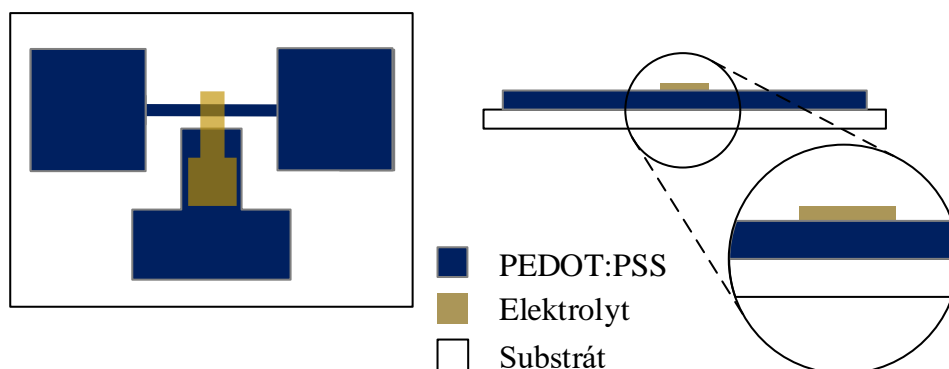
3.2.1 Laterální topologie

Tato topologie OEET je z pohledu výroby mnohem jednodušší. V jediném výrobním kroku je možné připravit všechny elektrody včetně kanálu za předpokladu, že jsou ze stejného materiálu. V opačném případě je nezbytný ještě jeden výrobní krok. V dalším kroku je do připravené struktury přidán elektrolyt a tím vznikne funkční OEET [27]. V případech, kdy se

používá kapalným elektrolytu, je nezbytný ještě jeden krok. Tím je vytvoření bazénku bránící rozlití elektrolytu, eventuálně i pouzdření bránící jeho odpaření. Pouzdření je možné použít i v případě, kdy je potřeba zamezit styku například vzdušné vlhkosti s tuhým elektrolytem [27].

S velkou výhodou se tato topologie využívá v senzorové technice. Zde je potřeba, aby mohl analyt přijít do kontaktu s elektrolytem, nebo aby byl analyt přímo součástí elektrolytu [42].

Laterální topologie má však i svoji nevýhodu. Při senzorové aplikaci OECT se tato nevýhoda nijak zásadně neprojevuje, ale v aplikacích, kde je potřeba rychlý přechod z *ON* stavu do *OFF* stavu a zpět, jako například u spínačů, se projeví plně. Zásadní nevýhodou je rychlost spínání v porovnání s topologií popsanou v kapitole 3.2.2. Laterální topologie vykazuje pomalejší rychlosti spínání. Je to způsobeno větší vzdáleností gate elektrody od kanálu a kationty tak musí urazit delší dráhu, než je jim umožněno podílet se na redox reakci a zároveň je i nižší intenzita elektrického pole [43].



Obr. 12 Pohled shora i zepředu (včetně detailu) na laterální topologie OECT.

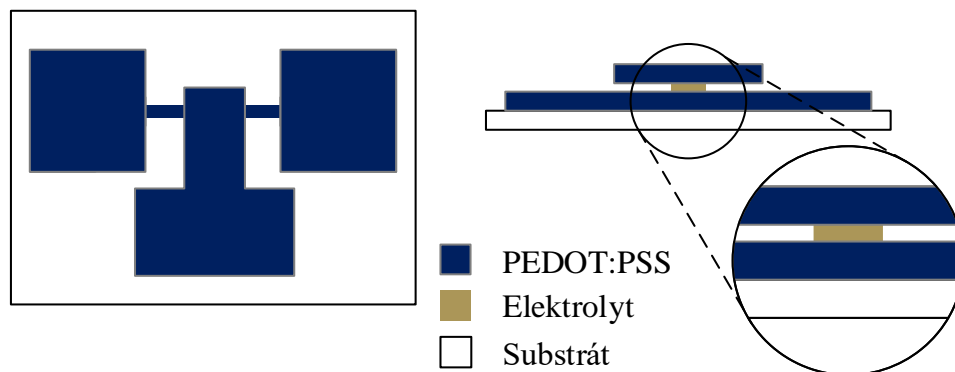
3.2.2 Vertikální topologie

Vertikální topologie je z výrobního pohledu složitější. Oproti laterální topologii nelze v jediném kroku připravit všechny elektrody. Gate elektroda se vždy připravuje v samostatném kroku než source – drain elektrody a kanál [41].

Dále je velmi obtížné v této topologii použít tekutý elektrolyt. Mohlo by dojít k rozpuštění gate elektrody v elektrolytu. Toto se dá odstranit použitím vhodného materiálu na gate elektrodu. Velmi často se používají zlaté, platinové nebo jiné kontakty, které jsou přímo ponořené do kapalného elektrolytu. Je ovšem zcela zřejmé, že tento způsob je vhodný spíše do laboratorních podmínek, než pro praktické využití.

Z pohledu vlastností má tato topologie velkou výhodu v porovnání s laterální topologií, jak bylo již řečeno v kapitole 3.2.1. Rychlost spínání je vyšší, což je způsobeno mnohem menší vzdáleností gate elektrody a kanálu. Jejich vzdálenost je závislá pouze na tloušťce vrstvy

elektrolytu. Ta se může pohybovat v řádech desítek nm až jednotek μm v závislosti na použité výrobní technologii.



Obr. 13 Pohled shora i zepředu (včetně detailu) na vertikální topologie OEET.

3.3 Materiály pro OEET

OEET je vždy tvořen kombinací různých materiálů pro dosažení požadovaných vlastností. V zásadě lze však tyto materiály rozdělit do tří skupin dle jejich použití ve struktuře OEET: kanál, kontakty a elektrolyt.

Další nezbytnou součástí ve struktuře OEET je také substrát. Jako substrát je možné použít široké spektrum materiálů od pevných po flexibilní. Nejběžnějším zástupcem pevných substrátů je sklo [36, 44]. Zástupcem flexibilních substrátů je PET folie nebo fotopapír [45, 46], ovšem nelze opomenout ani textilní substráty, ať již vláknové jako je kevlar [47], bavlna [48], hedvábí [49], nebo látkové na PET textilií [50] aj.

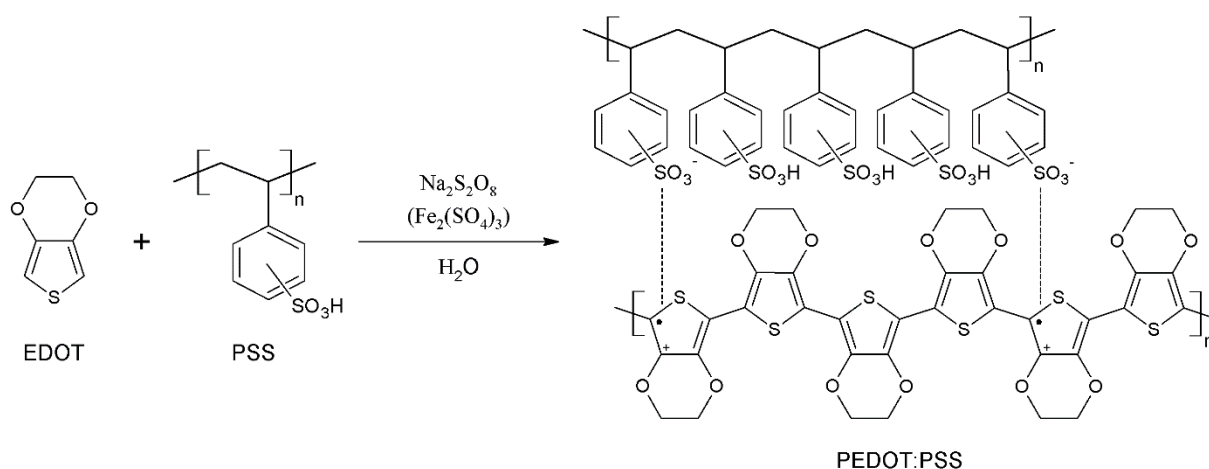
3.3.1 Kanál

Materiálů používaných na kanál OEET není příliš mnoho. Hlavní podmínku, kterou musí takový materiál splňovat, je polovodivost, tedy možnost změny vodivosti vlivem vystavení určitému vlivu, nejčastěji elektrickému napětí. Změna vodivosti by měla být co největší, ideálně od izolantu k vodiči. Nejvíce používaným materiálem je poly(3,4-ethylenedioxythiofen) poly(styrenesulfonat) (PEDOT:PSS). Dále je možné se setkat s OEET, kde je na kanál použit materiál poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) (P3HT). Volba materiálu pro tvorbu kanálu se odvíjí od oblasti použití, ale na základě provedené rešerše je možné říci, že materiál PEDOT:PSS se jeví jako ideální materiál pro své vlastnosti a byl tedy i vybrán pro praktickou realizaci OEET.

PEDOT:PSS

Mezi mnoha elektricky vodivými polymery, které jsou studovány, je polymer poly(3,4-ethylenedioxythiofen) (PEDOT) nejrozšířenějším materiálem. Má několik výhodných

vlastností v porovnání s ostatními vodivými polymery jako jsou polypyrrol nebo polyanilin. U PEDOTu se využívá nízký oxidační potenciál, vhodná šířka zakázaného pásu a dobrá stabilita v oxidovaném stavu. Další předností je vysoká měrná vodivost (až $400\text{--}600\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) PEDOTu připraveného jak chemicky tak elektrochemicky a jeho vysoká transparentnost v oxidovaném stavu. Ovšem velkou nevýhodou je jeho malá rozpustnost. Tuto nevýhodu je možno obejít polymerací monomeru 3,4-ethylenedioxythiofenu (EDOT) a vodou rozpustným polyelektrolytem. S velkou výhodou se používá například kyselina polystyren-sulfonová (PSS), viz Obr. 14. Výsledkem je tmavě modrý vodivý polymer PEDOT:PSS s vodivostí typu P, vytvářející kvalitní vodní disperzi [51].



Obr. 14 Chemická reakce, při níž vzniká vodivý polymer PEDOT:PSS z monomeru EDOT [8].

PSS nepřispívá přímo k přenosu náboje v PEDOT:PSS, ale zvyšuje rozpustnost PEDOTu a zlepšuje filmtvorné vlastnosti. Disociované sulfonované skupiny vyvažují náboj kationtů PEDOTu a výsledkem je stabilní sůl.

Vodivost vrstvy PEDOT:PSS může být upravena různými způsoby, ale jedním ze základních způsobů je volba poměru PEDOT ku PSS, který má přímý vliv na vodivost. Různým poměrem PEDOT:PSS se mění hustota náboje v oblasti PEDOTu. Na trhu jsou běžně dostupné poměry v rozmezí od 1:2,5 po 1:20 hmotnostního podílu výsledné směsi. Čím nižší je poměr, tím vyšší je vodivost PEDOT:PSS [52]. Stejně jako poměr PEDOT ku PSS i rozložení gelových částic v disperzi ovlivňuje vodivost a morfologii výsledné vrstvy. Přidání s vodou mísitelných rozpouštědel s vysokým bodem varu do PEDOT:PSS, jako je například etylenglykol (EG), dimethylsulfoxid (DMSO) a další, může výrazně zvýšit vodivost změnou morfologie výsledné vrstvy [8].

Mechanismus transportu náboje v PEDOT:PSS není zcela jasný, ale je popisován pomocí přeskočení náboje mezi sousedními vodivými oblastmi. Rychlost transportu náboje mezi

sousedními vodivými oblastmi je závislá na jejich energetické pozici, vzdálenosti a relativní orientaci. Rovněž je možné pozorovat vliv teploty na vodivost PEDOT:PSS, která s rostoucí teplotou roste. Tato teplotní závislost je popisována tzv. přeskokovým modelem (11) s variací vzdáleností:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (11)$$

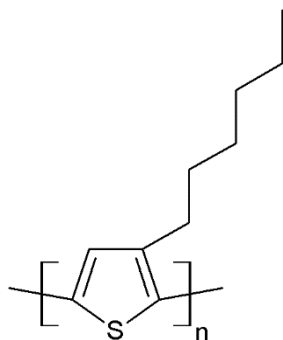
kde T_0 je charakteristická teplota. Pro vodní disperzi PEDOT:PSS vychází $T_0 \sim 1700 \text{ K}$ [53].

Polymer PEDOT:PSS se nevyznačuje jen výbornými elektrickými vlastnostmi, ale vykazuje i elektrochromní jev. To znamená, že je schopný měnit svou barvu po přiložení napětí. V základním oxidovaném stavu je vrstva PEDOT:PSS téměř bezbarvá a transparentní. Při redukci materiálu pomocí elektrochemické reakce změní vrstva barvu a stane se tmavě modrou. K tomu, aby mohly probíhat oxidační a redukční (redox) reakce je nutné, aby byl PEDOT:PSS v kontaktu s elektrolytem, který je schopen poskytnout kationty. Této vlastnosti se s velkou výhodou využívá u elektrochromních displejů [38].

P3HT

Regioregulární poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) (P3HT), viz Obr. 15, je dalším materiálem, který se používá jako materiál pro kanál OECT [33, 54], ale mnohem častěji se materiál používá pro přípravu organických tranzistorů řízených polem (OFET – Organic Field Effect Transistor) [55].

Filmy z P3HT mají vysoce mikrokrytalickou a anizotropní lamelární mikrostrukturu zahrnující dvoudimenzionální konjugované vrstvy se silnými meziřetězcovými interakcemi, které jsou rozdělené mezi amorfni oblasti izolačních postranních řetězců. Vhodné uspořádání nanometrových polykrystalů umožňuje rychlý přenos náboje. Pro vysoce regioregulární P3HT využívající optimalizované procesní podmínky byla pozorována pohyblivost nosičů náboje až $0,3 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$. Pohyblivost v P3HT závisí na stupni regioregularity a molekulární hmotnosti z důvodu morfologického a strukturního uspořádání. Vyšší stupeň krystalinity má za následek vyšší pohyblivost náboje a je možné jej kontrolovat pomocí procesních podmínek během depozice z tekuté fáze. Pokud jsou použita rozpouštědla s vyšším bodem varu, vykazuje výsledný film z P3HT vyšší pohyblivost nosičů náboje, protože řetězce mají delší čas na uspořádání v mikrokrytalické struktuře příznivé pro přenos náboje [56].

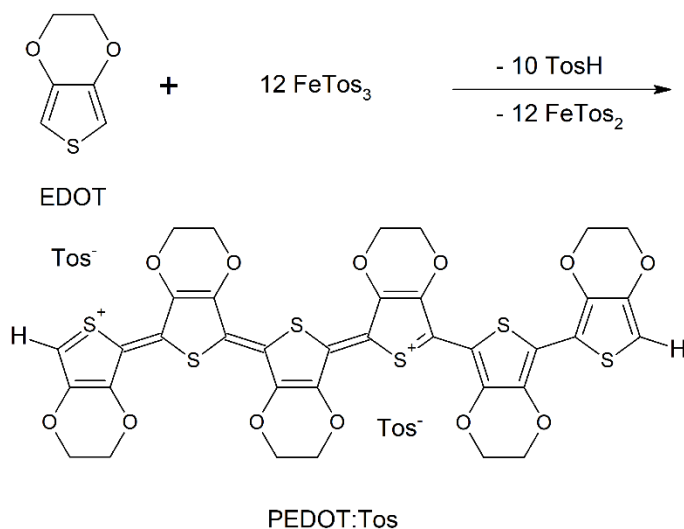


Obr. 15 Molekulová struktura poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) (P3HT).

Další polymery

Kromě nejrozšířenějšího polymerního materiálu PEDOT:PSS a v menší míře P3HT se můžeme ve spojení s OECT setkat i s dalšími materiály. Nejčastěji se jedná o materiál PEDOT, kde je PSS nahrazena jiným materiálem [57]. S. Inal a kol. porovnává různé typy organických polovodičů pro tranzistorové aplikace [58]. Jedním z dalších možných materiálů, použitelných jako kanál pro OECT je polyanilin [59].

Dalším použitelným materiálem je PEDOT:Tos (tosylát) [60], viz Obr. 16. Příprava tohoto vodivého polymeru probíhá oxidační *in situ* polymerací monomeru EDOT za přítomnosti iontových oxidantů, jako například Fe-III nebo Mg-IV. Volba oxidantu závisí na vhodné rozpustnosti v použitých rozpouštědlech kompatibilních s monomerem EDOT. Jako vhodné rozpouštědlo se používá p-toluenesulfonát. Připravená tisková formulace se může použít k vytvoření vodivé vrstvy. Vzniklou vrstvu je nutné opláchnout, např. demineralizovanou vodou, aby se odstranily rezidua rozpouštědla a iontových oxidantů.



Obr. 16 *In situ* polymerizace materiálu PEDOT:Tos

3.3.2 Kontakty

Kontaktních materiálů je možné použít celou řadu. Aby bylo možné materiál použít jako kontaktní, je nutné, aby při spojení s použitým materiálem vytvářel ohmický kontakt s lineární VA charakteristikou (nikoliv usměrňující kontakt). Podmínkou pro vznik ohmického kontaktu jsou srovnatelné výstupní práce obou spojovaných materiálů. V Tab. 1 jsou uvedené používané materiály a jejich výstupní práce. Výhodné je použití stejného materiálu jak pro kanál, tak pro kontakty, což přináší velkou výhodu v podobě značného zjednodušení výroby OECT, kdy stačí pouze dva materiály (PEDOT:PSS a elektrolyt) k vytvoření funkční součástky [46].

Tab. 1 Srovnání výstupních prací vybraných materiálů používaných na kanál (PEDOT:PSS a P3HT) s nejběžnějšími materiály používanými na kontakty.

Materiál	Výstupní práce (eV)
PEDOT:PSS	4.7–5.4
P3HT	3.3–5.2
Au	5.1
Pt	5.1–5.9
C	~ 5.0
Ag	4.3–4.7

Z materiálů uvedených v Tab. 1 se často používá zlato (Au) a vzhledem ke své inertnosti se využívá hojně v senzorových aplikacích [61]. Platina (Pt) stejně jako stříbro (Ag) se používají především jako gate elektroda, přičemž stříbro se většinou využívá jako Ag/AgCl elektroda [62].

3.3.3 Elektrolyt

Elektrolyt je pro funkci OECT klíčový. Volbou vhodného elektrolytu je možné dosáhnout velice rozličných vlastností a chování OECT. Volba elektrolytu se odvíjí i od cílové aplikace. Jiné elektrolyty se používají pro senzorové aplikace a jiné pro aplikace např. v logických obvodech nebo spínačích.

Nutnou podmínkou pro použití elektrolytu je, schopnost poskytnou ionty potřebné k tomu, aby proběhla redox reakce, při které dochází ke změně vodivosti kanálu OECT. Ke změně vodivosti dochází během elektrochemické reakce nebo v kombinaci elektrochemické reakce a vystavení OECT snímanému analytu.

Iontové kapaliny (IL)

Různí autoři používají v literatuře různá označení pro tuto skupinu látek. Mohou být označovány jako tekuté soli (liquid salts), roztavené soli (molten salts), iontové kapaliny při pokojové teplotě (Room Temperature Ionic Liquids - RTILs), nebo jen iontové kapaliny (Ionic Liquids - ILs). Jedná se o látky složené z iontů a jejich kombinací bez přítomnosti molekulárních rozpouštědel. Lze je tedy nazvat jako čisté elektrolyty [63].

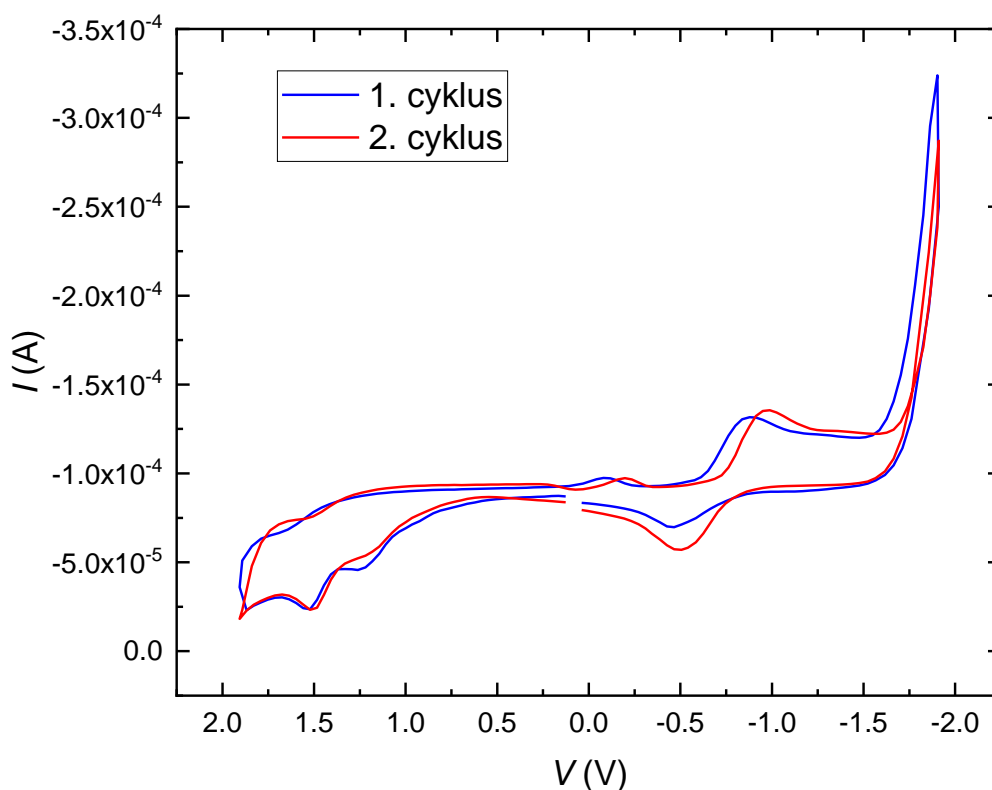
Poznamenejme, že chování IL nelze snadno popsat pomocí modelů chování molekulárních kapalin [64].

Iontové kapaliny jsou charakteristické silnými mezi iontovými interakcemi, což je odlišuje například od vysokoteplotních roztavených solí. To má za následek malé tendence ke krystalizaci kvůli flexibilitě aniontů a asymetrii kationtů. Aniont je často anorganický na rozdíl od kationtu, který je organického původu a je možné ho jednoduše chemicky modifikovat [64, 65].

IL jsou obvykle kvarterní amoniové soli, cyklické aminy, jak aromatické (pyridinové, imidazolové) tak i satureované (pyrrolidinové). Dále pak fosfonové či sulfonové soli. Aniontů lze použít rovněž celou řadu, např. tetrafluoroborát $[\text{BF}_4]$, hexafluorofosfát $[\text{PF}_6]$, trifluoromethansulfonát $[\text{OTf}]$, tetrachloraluminát $[\text{AlCl}_4]$ či tris(perfluoroalkyl)trifluorofosfát $[\text{FAP}]$ [66].

Jednou z důležitých vlastností IL je měrná vodivost σ . Měrná vodivost IL se pohybuje v rozsahu $0,1\text{--}18 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ a je závislá na viskozitě, teplotě a počtu nosičů náboje a jejich pohyblivosti. Měrná vodivost je přímo úměrná počtu nosičů náboje N a nepřímo úměrná viskozitě η . Z důvodu vyššího difuzního koeficientu kationtů v porovnání s anionty je měrná vodivost IL více ovlivněna pohyblivostí kationtů. Teplotní závislost měrné vodivosti je opačná než teplotní závislost viskozity, tj. s rostoucí teplotou měrná vodivost vzrůstá [63, 66].

Důležitým parametrem IL je jejich elektrochemická stabilita, tj. rozsah napětí, při kterých ještě nedochází k elektrochemické redukcii a oxidaci. Tento parametr se nazývá tzv. elektrochemické okno, viz Obr. 17. Velikost toho parametru je závislá na typu kationtu a aniontu a je možné jej měřit pomocí cyklické voltametrie [66].



Obr. 17 Ukázka změřeného elektrochemického okna pro IL 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfát (A1).

3.4 Senzorové aplikace OECT

Tato oblast použití OECT je pravděpodobně tou nejrozšířenější v současné době. Je možné nalézt celou řadu snímaných veličin především z oblasti medicíny, kde se s velkou výhodou používají OECT jako senzorové elementy. Jejich velkou předností je využívání biokompatibilních materiálů [30, 67] a schopnost pracovat v kapalném prostředí při nízkých úrovních napětí do 1 V [68, 69].

Pomocí OECT je možné snímat elektrické signály, které jsou generovány lidským tělem. Mezi tyto signály patří například signály generované srdcem (EKG – Elektrokardiogram), signály generované mozkem (EEG – Elektroencefalogram) a signály generované pohybem oka (EOG – Elektrookulogram) [70]. Snímaný signál se přivádí mezi elektrody gate a source, což vede k modulaci proudu I_{DS} . Publikace autorky A. Campana a kol. [71] se rovněž věnuje měření signálů EKG s využitím OECT. Na rozdíl od první zmíněné publikace je v tomto případě využíván i druhý zdroj V_{GS} . Detekci EEG signálů s využitím OECT je možné najít také v celé řadě dalších publikací, např. [30], [72] a jiných.

Z dalších aplikací uveďme: detekce úrovně cukru v lidském těle [25], detekce cholesterolu [73], glukózy a laktátu [73], senzor soli kyseliny mléčné (laktát) [73, 75–77], dopaminový senzor [78, 79], senzor DNA [80], senzor fenolové aminokyseliny tyrozin [48], nebo textilní senzor adrenalinu [29].

Mimo senzory z oblasti medicíny je možné zmínit i senzory jiných veličin, např. senzor vlhkosti [81] nebo senzor oxidu dusičitého [61].

3.5 Spínače a další obvody založené na OECT

Kromě senzorových aplikací, kde nacházejí OECT nejčastější uplatnění, existuje i další oblast využití OECT. Je možné se s nimi setkat v podobě spínačů, zesilovačů či jejich integrací do větších logických obvodů jako je např. kruhový oscilátor.

Výzkumných kolektivů, které se touto oblastí použití OECT zabývají, je celá řada, ale za zmínku stojí výzkumný kolektiv z univerzity v Linköpingu a výzkumného centra Acreo. V příloze A. je srovnání parametrů OECT z dostupných publikací.

3.5.1 Optimalizace OECT pro spínače a další obvody

Volbou vhodné topologie a materiálového složení lze dosáhnout výrazného zlepšení sledovaných parametrů. Těmi jsou především spínací poměr a rychlost spínání. Většina z dostupných publikací se zabývá optimalizací OECT změnou geometrie celé struktury. V menším počtu jsou zastoupeny publikace, které se věnují i testování vlivu různých materiálů na vlastnosti OECT [58].

Asi nejzásadnější vliv na chování OECT z pohledu změny geometrie má změna topologie. Vertikální topologie vykazuje z pohledu využití OECT jako spínače lepší vlastnosti, je ale náročnější na výrobu. Například v publikaci autora J. Kawahary a kol. [45] je uvedeno, že v jejich případě dosahovala vertikální topologie přibližně 10x vyšší rychlost spínání a vypínání, než laterální topologie.

Dalším parametrem, který byl podroben testování, je poměr ploch rozhraní mezi elektrolytem a gate elektrodou a elektrolytem a kanálem. Pro aplikace popisované v této kapitole byl určen minimální poměr mezi plochou gate elektrody a kanálu. Ten musí být $\geq 10:1$ [82], ale je možné se setkat s poměry většími, například 20:1 [43], nebo 35:1 [83]. Tento poměr ploch byl stanoven tak, aby nedošlo k přeoxidování gate elektrody, na kterou je přiloženo kladné řídicí napětí.

Jedním z velkých problémů OECT je rozdílná rychlost přechodu ze stavu zapnuto do stavu vypnuto a zpět. Rychlost obou přechodů je ovlivněna hlavně probíhající redox reakcí. Téměř ve všech dostupných publikacích, až na jedinou [84], je rychlejší přechod ze stavu *ON* do stavu *OFF*. Tento efekt je běžně v literatuře připisován redukci kanálu i za hranici rozhraní elektrolyt – kanál směrem k záporné drain elektrodě. Tím dochází k prodloužení času potřebného k opětovnému uvedení kanálu do stavu *ON* po odpojení řídicího napětí [40, 85, 86]. Se zajímavým řešením přišel Ersman a kol. [40], kteří využívali vertikální topologii OECT a částečným překrýváním kanálu pomocí uhlíkové vrstvy se pokoušeli omezit redukování kanálu za hranicí rozhraní, což se jim podařilo a oba přechody trvaly přibližně stejně dlouho (10 ms). Dále porovnávali omezení vlivu redukční fronty [41].

3.5.2 Pracovní režim OECT

Drtivá většina OECT pracuje v tzv. ochuzovacím režimu [41, 87]. To znamená, že kanál tranzistoru je bez přivedeného řídicího napětí V_{GS} otevřený a může jím protékat proud I_{DS} odpovídající velikosti napětí V_{DS} a velikosti odporu kanálu. Tato vlastnost je dána vlastností použitého materiálu PEDOT:PSS, který je ve svém výchozím oxidovaném stavu vodivý. M. Knollovi a M. Thämerovi se podařilo vytvořit oba typy OECT, jak ochuzovací typ, tak i obohacovací typ založený na vodivém polymeru PEDOT:PSS [88].

3.5.3 Logické obvody s OECT

Pomocí OECT je možné, stejně jako pomocí tranzistorů z anorganických materiálů, vytvořit běžné logické obvody. Mezi ten nejjednodušší patří například invertor, dále jsou to hradla NAND a NOR. Složitějším obvodem je například kruhový oscilátor, což je sériové spojení lichého počtu invertorů. Objevují se i další obvody, jako například dekodér 2 do 4 nebo 4-vstupový multiplexer [41].

D. Nilsson a kol. popisuje logické obvody založené na OECT a ukázali, že využití OECT v logických obvodech je perspektivní směr. Nevýhodou je asymetrická dynamika elektrochemických reakcí. Jedna perioda průchodu signálu oscilátorem trvala 100 s [83].

V celé řadě dalších publikací je možné se setkat s využitím OECT v logických obvodech, např. [43, 46, 47, 89, 90].

4 První a druhá generace OECT

Tato část práce je věnována experimentálním výsledkům a jejich vyhodnocování. Studie probíhaly ve třech etapách. V této práci jsou shrnuty převážně výsledky třetí etapy získané na tranzistorech třetí generace. Aby práce podala ucelený pohled na problematiku OECT řešenou na Západočeské univerzitě budou úvodem této části práce také zmíněny výsledky získané na první a druhé generaci tranzistorů

Tisk elektrodových systémů neprobíhal na ZČU v Plzni, ale byl realizován ve spolupráci s COC v Rybitví a Univerzitou Pardubice.

4.1 Základní charakterizace OECT

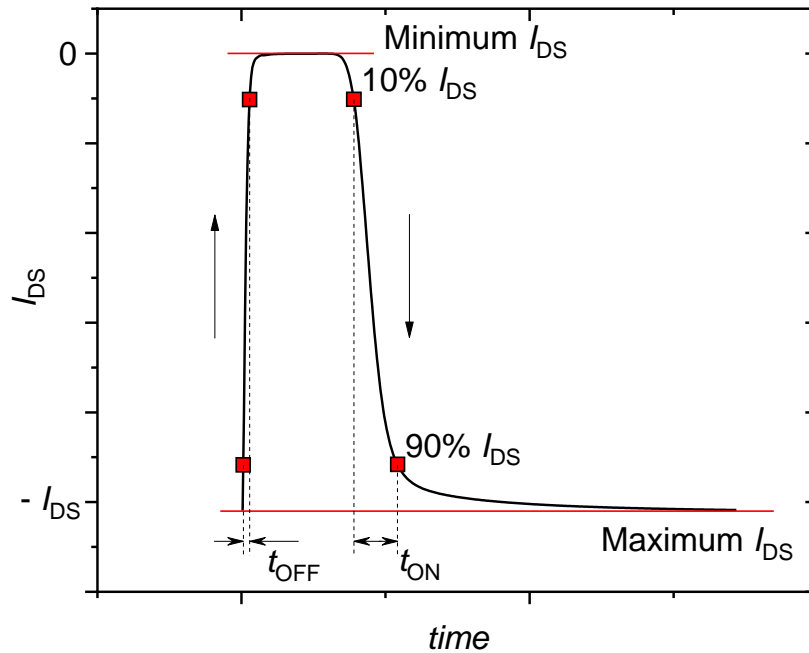
Postup charakterizace měřených vzorků začínal vždy měřením odporu kanálu testovaných vzorků. Ukázalo se, že vliv tisku je značný. Tento problém se podařilo postupem času odlatit. Iontová kapalina byla nakápnuta do definovaného rezervoáru pomocí mikropipety. Provádělo se především měření výstupních charakteristik v definovaném rozsahu pracovních napětí a dynamické namáhání, kdy jsou OECT cyklicky spínány a vypínány s definovaným počtem cyklů a velikostí spínacích napětí. Z výstupních a převodních charakteristik se určovalo prahové napětí V_{th} , respektive transkonduktance g_m (12). Z dynamického spínání se extrahují rychlosti spínání t_{ON} (13) a t_{OFF} (14) a spínací poměr (15), viz Obr. 18.

$$g_m = \frac{\partial i_{DS}}{\partial v_{GS}} \quad (12)$$

$$t_{ON} = t_{90\% I_{DS}\downarrow} - t_{10\% I_{DS}\downarrow} \quad (13)$$

$$t_{OFF} = t_{10\% I_{DS}\uparrow} - t_{90\% I_{DS}\uparrow} \quad (14)$$

$$\text{Spínací poměr} = \frac{\text{Maximum } I_{DS}}{\text{Minimum } I_{DS}} \quad (15)$$



Obr. 18 Ukázka extrakce sledovaných parametrů OECT z časové odezvy proudu I_{DS} na spínání řídicího napětí V_{GS} .

Měření byla prováděna pomocí dvoukanalového měřicího přístroje SMU Keithley 2636A („Source Measure Unit“ – zdroj s měřicí jednotkou), viz Obr. 19, vybaveného triaxiálními měřicími sondami. Přístroj umožňuje kontinuální měření napětí a proudu na obou kanálech s dostatečnou přesností a rychlostí odečtu dat. Vzhledem k tomu, že OECT pracují v rozsahu napětí -1 až 1 V, je i výkon obou zdrojů více než dostatečný (30 W). Data se z měřicího přístroje zpracovávala pomocí ovládacího softwaru (ACS Basic, verze 2.0). Software ukládá změřená data pro následné zpracování a vyhodnocení.



Obr. 19 SMU Keithley 2636A.

Měření tranzistorů prvních dvou generací probíhalo v běžných laboratorních podmínkách. Vzorky byly umístěny ve stíněném boxu, viz Obr. 20, abychom omezili vliv rušení. To se ukázalo jako zcela zbytečné, neboť proudy, které se měří u OECT jsou v řádu stovek μA . Praktickým měřením se ověřilo, že stínicí box není zapotřebí a nebyl proto použit při měření

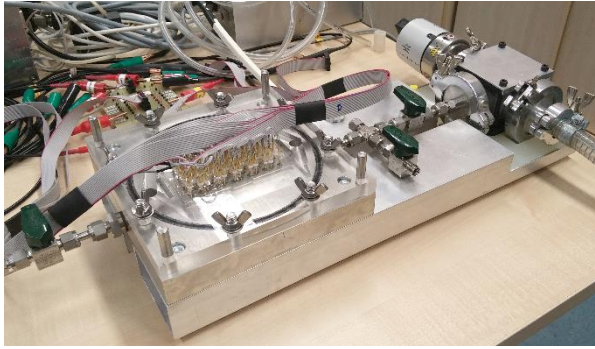
tranzistorů třetí generace. Měření třetí generace probíhalo ve speciálně navržené měřicí komůrce. Popis a návrh testovací komůrky je uveden v [91]. Měření bylo prováděno ve vakuu $\approx 1\text{mbar}$, což umožnilo také vytvořit i dostatečnou přítlačnou sílu pro víko komůrky s jehlovým kontaktovacím polem (viz Obr. 21). Komůrka byla navržena i pro účely měření v definované atmosféře. Což, v případě potřeby, umožňuje provádět měření také v inertní atmosféře, aby se vyloučil vliv okolního prostředí.



Obr. 20 Stínící box používaný při měření OECT první a druhé generace.

Pro první a druhou generaci OECT byl použit systém kontaktování pomocí stříbrné vodivé pasty a tenkých měděných drátků, viz např. Obr. 22. Tento způsob kontaktování byl funkční, ale po mechanické stránce nebyl příliš spolehlivý. K měděným drátkům bylo již možné připojit měřicí přístroj pomocí měřicích sond.

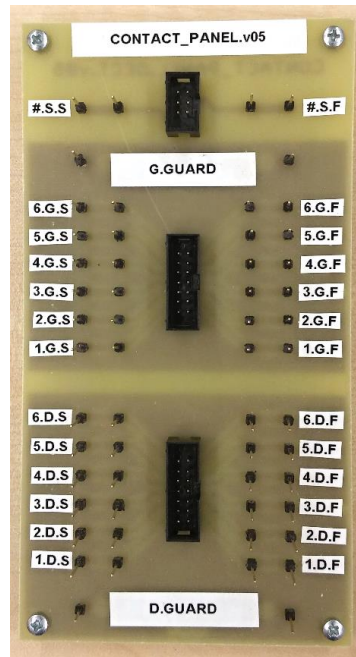
U třetí generace tranzistorů byl způsob kontaktování změněn. Třetí generace OECT byla od počátku navrhována spolu s novou měřicí aparaturou, viz Obr. 21. Tato aparatura je opatřena vrchním polykarbonátovým víkem, které bylo osazeno 132 pružinovými kontaktními jehlami. Jejich délka a přítlačná síla byla zvolena s požadavkem na vytvoření dostatečně spolehlivého kontaktu mezi jehlou a kontaktní ploškou měřeného vzorku. Z jehlového kontaktovacího pole byly vyvedeny vodiče, které byly propojeny s kontaktovacím přípravkem. K tomuto přípravku byly připojeny sondy měřicího přístroje. Třetí generace OECT byla při návrhu panelizována. Panel s jehlovým kontaktovacím polem umožňoval kontaktovat 18 tranzistorů současně bez nutnosti manipulace, čímž bylo možné získat statistická data.



a)



b)

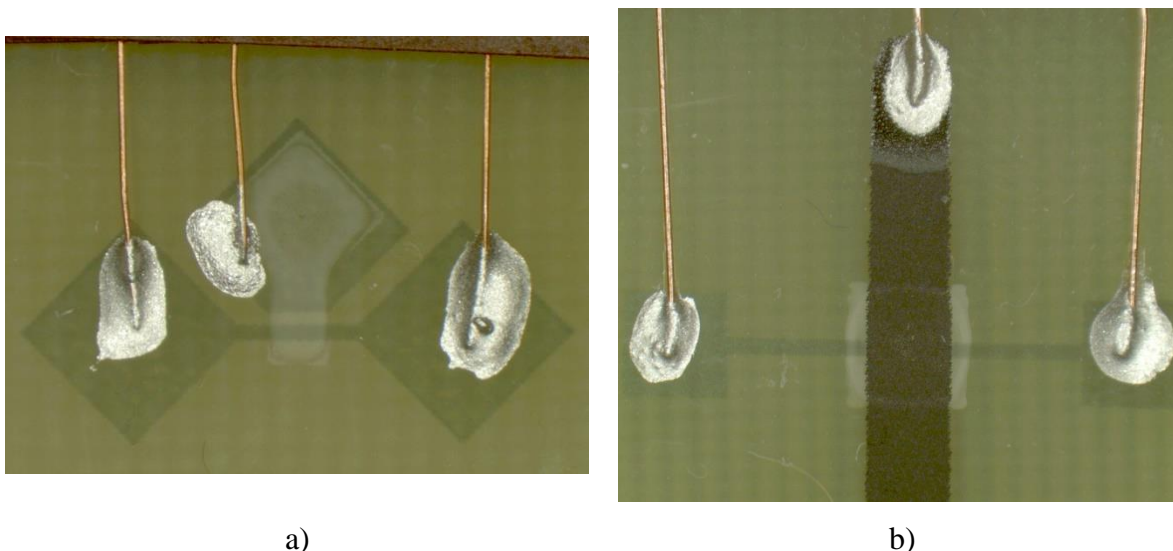


c)

Obr. 21 Měřicí aparatura pro měření OECT třetí generace: a) měřicí komůrka, b) jehlové kontaktovací pole a c) kontaktovací panel.

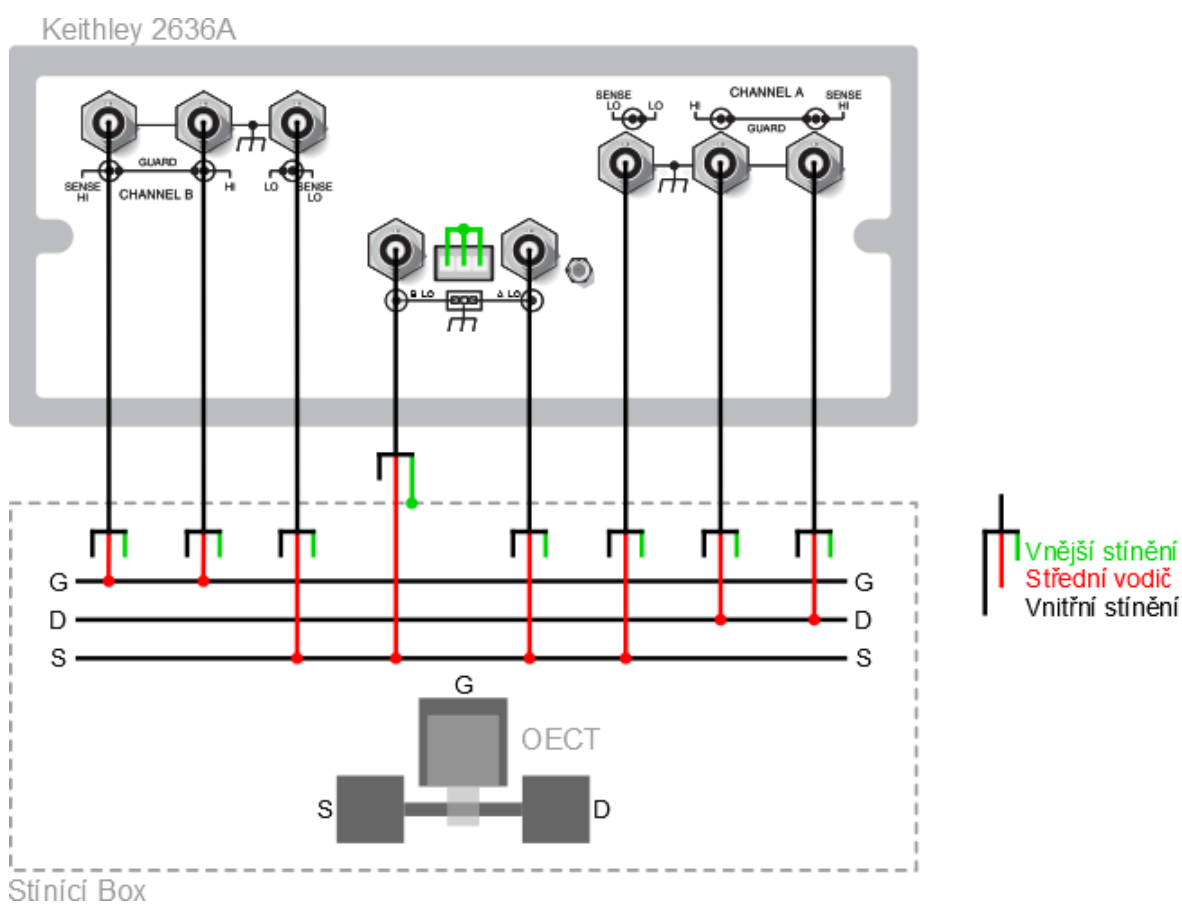
4.2 První generace OECT

V této první generaci byla připravena dvě topologická uspořádání OECT, jak laterální, viz Obr. 22 a), tak i vertikální, viz Obr. 22 b). OECT byly kompletně připraveny pomocí síťotisku a jako aktivní materiál byl použit vodivý polymer PEDOT:PSS, ze kterého byla vytisknuta i elektrodová část propojující elektrolyt a gate elektrodu. To se ukázalo výhodné z hlediska kapacitance mezi PEDOT:PSS a elektrolytem, která ovlivňuje efektivitu iontové injekce. Výjimkou byla vertikální topologie, kde elektroda gate byla vyrobena z uhlíku.



Obr. 22 První generace OECT a) laterální a b) vertikální topologie s uhlíkovým gateem.

Měření probíhalo za běžných laboratorních podmínek, viz 4.1. Elektrické zapojení je uvedeno na Obr. 23. Měření byly statické charakteristiky, především pak výstupní charakteristiky, kdy pro několik hodnot řídicího napětí V_{GS} byly měřeny závislosti $I_{DS} = f(V_{DS})$, tak i dynamické charakteristiky, kdy bylo řídicí napětí V_{GS} skokově spínáno $\langle 0;1 \rangle$ V při konstantním napětí $V_{DS} = -1$ V.



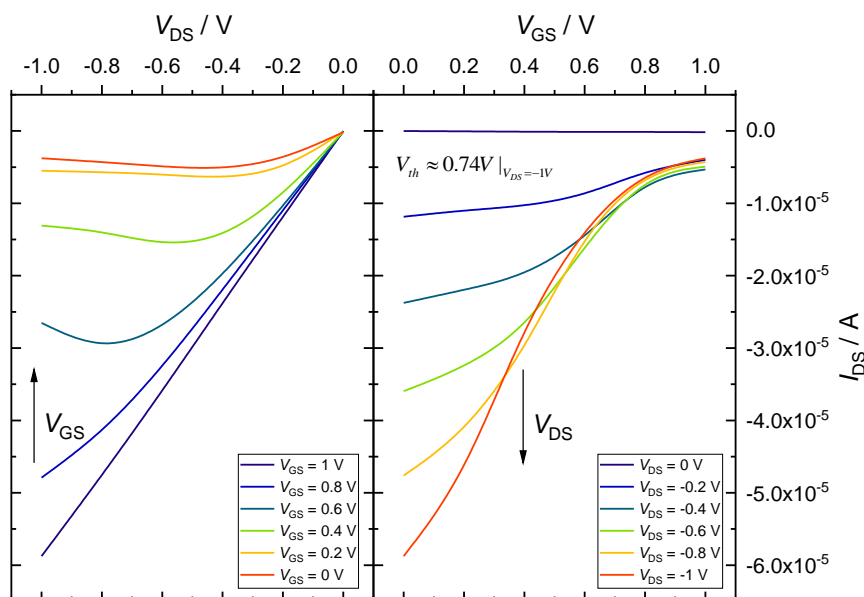
Obr. 23 Schéma zapojení pro měření OECT.

Výsledky měření

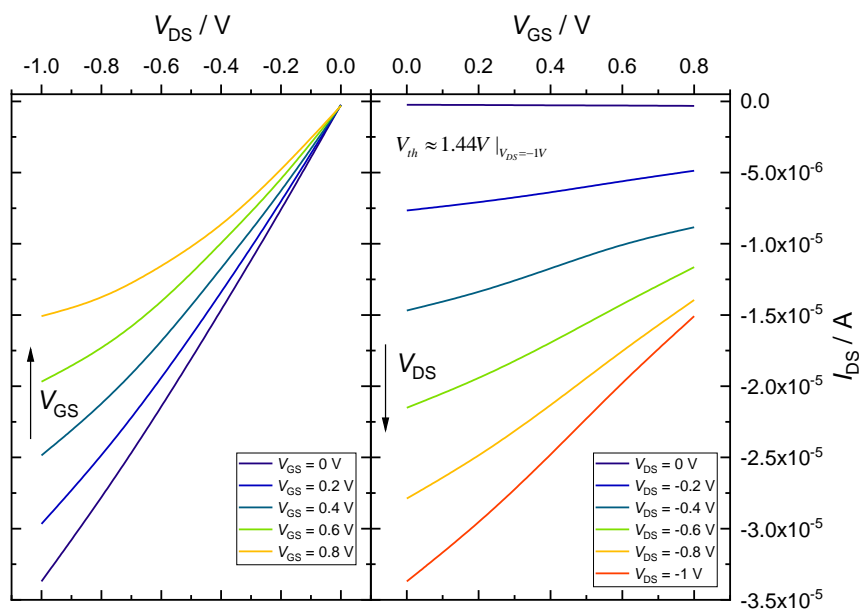
Výsledky měření statických charakteristik dosažených na obou topologiích jsou na Obr. 24. Volt-ampérová charakteristika je lineární, což potvrzuje ohmický charakter kontaktů source-drain. Při vyšších napětích V_{GS} , kdy dochází k injekci kladných iontů z iontové kapaliny do PEDOT:PSS kanálu, dochází k poklesu proudu a jeho saturaci při vyšších napětích V_{DS} . Na Obr. 25 jsou výsledky měření dynamických charakteristik a v Tab. 2 jsou uvedeny změřené parametry. Z těchto výsledků vidíme vliv laterální a vertikální topologie OECT. Z hlediska dynamiky je laterální topologie horší, což je způsobeno pomalým průběhem redox reakce a větší vzdáleností mezi gate elektrodou a kanálem.

Tab. 2 Změřené parametry první generace OECT.

Topologie	g_m (S)	- I_{DS} (A)			t (s)	
		ON	OFF	I_{ON}/I_{OFF} (-)	ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
Laterální	$8.70 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-5}$	$2.40 \cdot 10^{-6}$	8	37	86
Vertikální	$2.50 \cdot 10^{-5}$	$7.93 \cdot 10^{-6}$	$1.00 \cdot 10^{-7}$	80	15	50



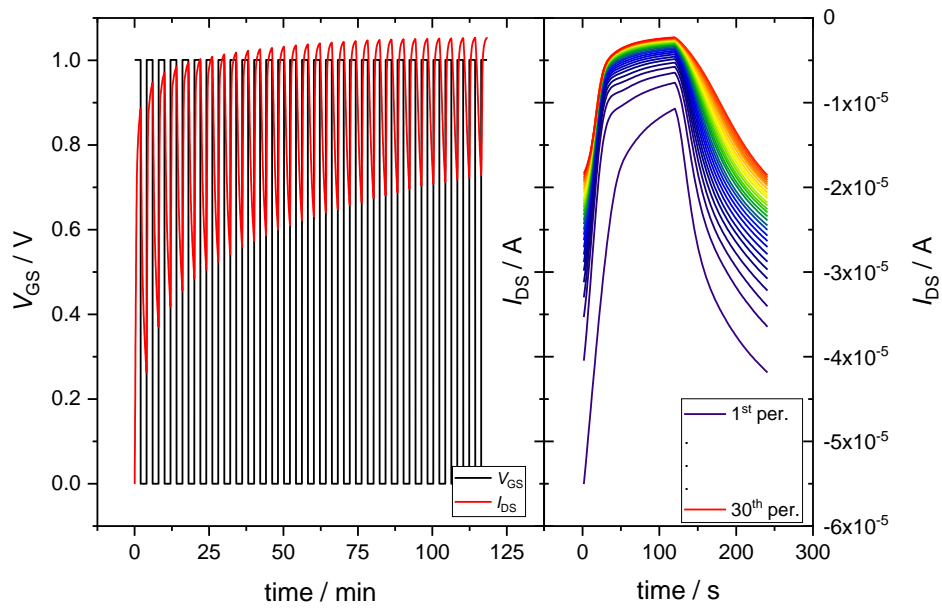
a)



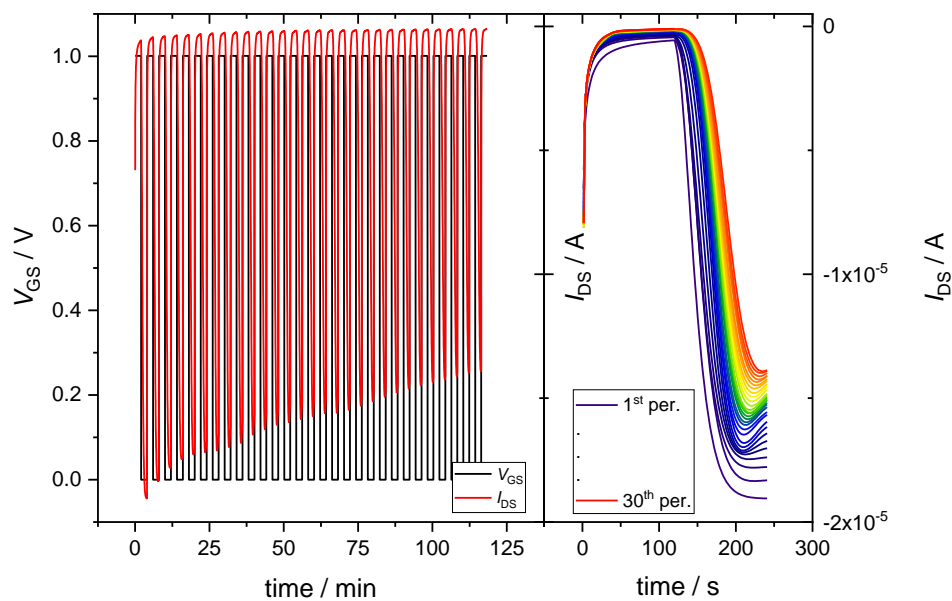
b)

Obr. 24 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT první generace. a) laterální topologie, b) vertikální topologie.

Z Obr. 25 a) je patrné, že se OECT postupně s každou další periodou spínání řídicího napětí V_{GS} zavírá více a současně s tím klesá i proud v ON stavu. Tento děj je spojený s šířením redoxní fronty a nárůstem počtu kladných iontů, které se dostanou do objemu polovodiče a během doby, kdy je $V_{GS} = 0V$ se již tyto ionty nevrátí zpět do elektrolytu.



a)



b)

Obr. 25 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 30 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT první generace. a) laterální topologie, b) vertikální topologie.

4.3 Druhá generace OECT

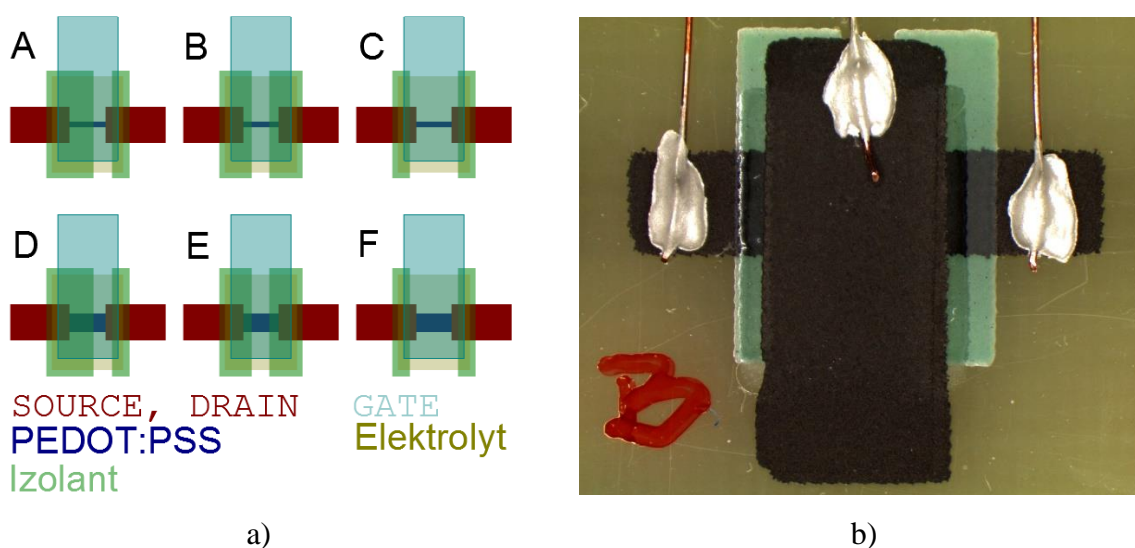
Na základě získaných výsledků a výsledků publikovaných v práci [40] byla navržena vertikální topologie OECT, viz Obr. 26. Bylo připraveno celkem 6 variant, jak je možné vidět

na Obr. 26 a). Trojice vzorků A – C a D – F měly vždy stejnou šířku kanálu. Dvojice vzorků A – D, B – E a C – F měly stejné překrytí kanálu pomocí izolantu, který měl zamezit šíření redox reakce i za rozhraní elektrolyt – kanál. Na Obr. 26 b) je ukázka reálného vzorku.

Oproti první generaci OECT byly všechny kontakty vytištěny z uhlíkové pasty a pouze kanál byl vytištěný z vodivého polymeru PEDOT:PSS.

Kontaktování i měření bylo provedeno stejně jako u první generace, viz Obr. 26 b).

Během měření dynamických charakteristik bylo napětí V_{GS} skokově přepínáno v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$ V. Záporné napětí bylo použito ve snaze urychlit zpětnou oxidaci kanálu při přechodu ze stavu vypnuto do stavu zapnuto.



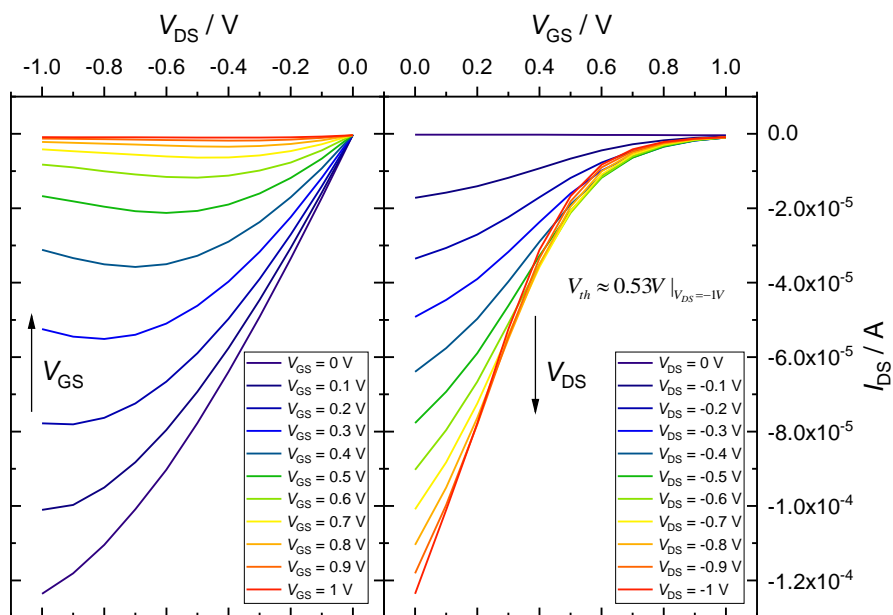
Obr. 26 Druhá generace OECT a) ukázka všech navržených variant b) reálný vzorek.

Výsledky měření

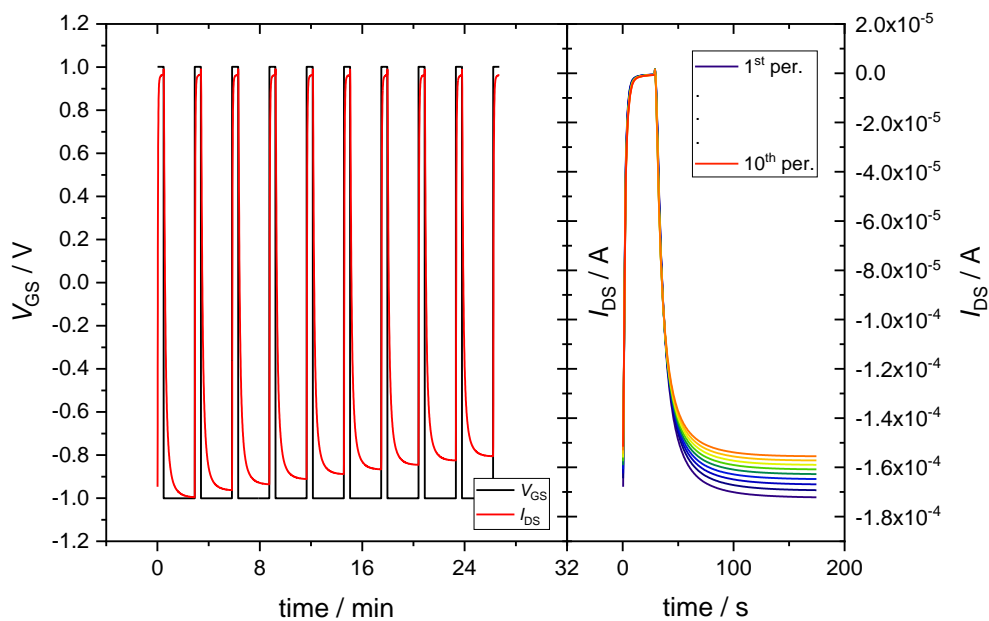
Výsledky statických charakteristik změřených na druhé generaci OECT jsou na Obr. 27. Na Obr. 28 jsou pak výsledky měření dynamických charakteristik a v Tab. 3 jsou uvedeny změřené parametry. Oproti první generaci OECT je zde patrné zlepšení.

Tab. 3 Změřené parametry druhé generace OECT.

Topologie	g_m (S)	$-I_{DS}$ (A)			t (s)	
		ON	OFF	I_{ON}/I_{OFF} (-)	ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
Vertikální	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$	$6.92 \cdot 10^{-7}$	220	5	22



Obr. 27 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT druhé generace, vzorek B.



Obr. 28 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 10 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT druhé generace, vzorek B.

4.4 Zhodnocení výsledků dosažených na první a druhé generaci OECT

První generace OECT sloužila především k ověření funkčnosti tohoto typu tranzistorů. Pro testy byly připraveny obě možné topologické varianty, tedy jak laterální tak i vertikální. Z dosažených výsledků je možné vyčíst velice špatnou a pomalou dynamiku těchto tranzistorů, ale i přesto viditelnou modulaci proudu protékajícího kanálem po přiložení kladného napětí na řídicí elektrodu gate. Z porovnání obou topologií, viz Tab. 2, je dobře patrný rozdíl mezi oběma topologiemi. Vertikální topologie se ukázala jako výhodnější. Tento výsledek je naprosto v souladu s teoretickými předpoklady a provedenou literární rešerší.

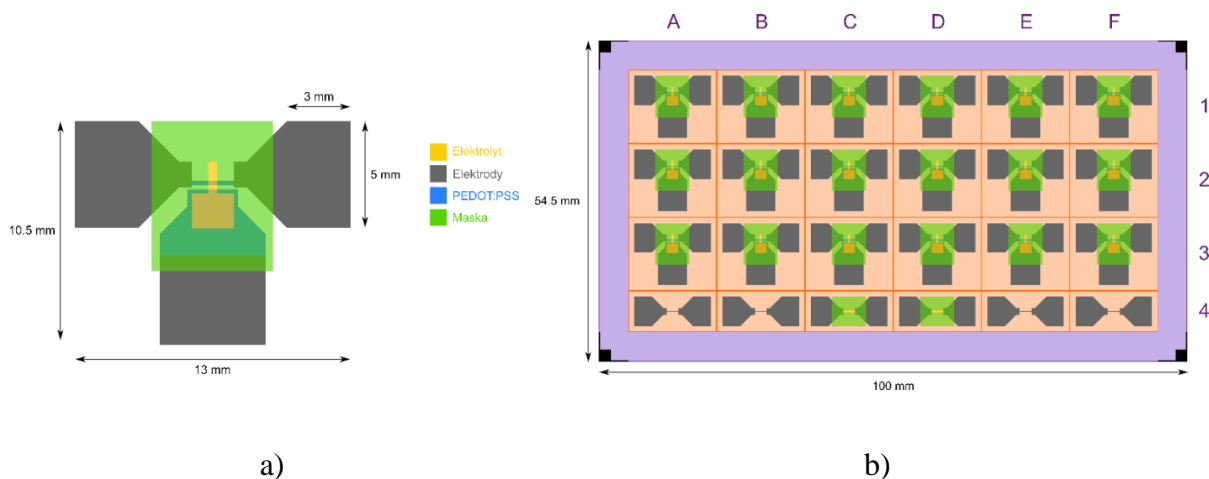
U druhé generace byla navržena nová vertikální topologie s celkem 3-mi různými variantami uspořádání jednotlivých tištěných vrstev vždy pro 2 různé šířky kanálu. Oproti první generaci OECT je z dosažených výsledků vidět patrné zlepšení, viz Tab. 3. Výsledek experimentu, který měl ověřit vliv geometrie a uspořádání jednotlivých materiálových vrstev na symetrii spínacích (t_{ON}) a vypínacích (t_{OFF}) časů, nebyl ale pozitivní. V tomto návrhu se ukázalo, že elektrodové návrhy neumožňují omezit šíření redoxní vlny i mimo rozhraní elektrolyt – kanál. Toto rozhraní bylo definováno pomocí izolačního materiálu, který byl běžně používán pro definování rozhraní elektrolyt – kanál, nikoliv vodivého. Kladné ionty redukující PEDOT:PSS se tak mohly stále dostávat i za hranici rozhraní až k záporné elektrodě. Z výsledků dále vyplynulo, že užší geometrie kanálu (vzorky A, B, C) je pro funkci OECT výhodnější, než širší geometrie kanálu (vzorky D, E, F).

Obě tyto generace využívaly UV tvrditelný elektrolyt, jehož složení nelze v textu uvádět, jelikož se jedná o unikátní kompozici a je v přípravě její patentová ochrana.

5 Třetí generace OECT

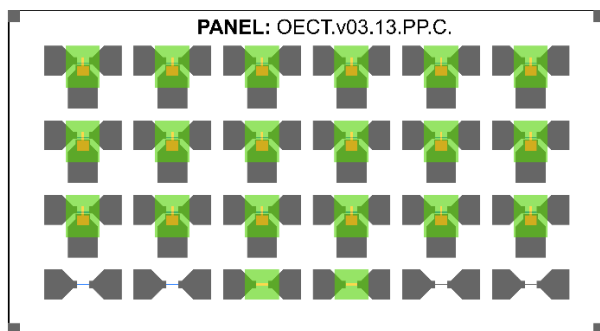
S návrhem třetí generace došlo i k některým změnám ve způsobu kontaktování a měření OECT. Tato generace byla navržena s ohledem na dlouhodobý záměr v oblasti organických elektrochemických tranzistorů na ZČU v Plzni. Tranzistor byl navržen v laterální topologii s možnostmi úprav návrhu OECT při zachování geometrie kontaktních elektrod. Vzhledem k tomu, že z předchozích měření se ukázala vertikální topologie výhodnější, byla tato možnost také vzata v úvahu. Konečný návrh topologie umožňoval tedy konstrukci obou typů. Z hlediska tisku je laterální topologie výhodnější, protože je možné vynechat tisk vrstvy elektrolytu, čímž vznikne platforma pro testování různých druhů elektrolytů včetně iontových kapalin. Testování různých elektrolytů bylo mj. jedním z klíčových úkolů řešených v rámci této práce. Cílem bylo nalézt elektrolyt, který by splňoval požadavek vysoké spínací rychlosti při zachování dostatečného spínacího poměru a stability spínání.

Navržená topologie na Obr. 29 a) byla panelizována, viz Obr. 29 b). Byla vytvořena matice 3 x 6 funkčních struktur a 1 x 6 testovacích. Na testovacích strukturách bylo možné testovat také jednotlivé materiály, ze kterých je tranzistor vyrobený. Celou strukturu OECT bylo možné připravit pomocí sítotisku, případně i kombinací různých tiskových technik.

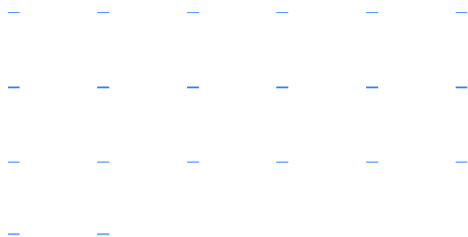


Obr. 29 Třetí generace OECT a) struktura, b) panelizace.

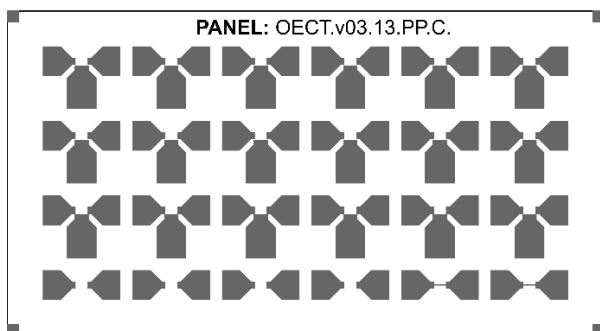
Postupně bylo navrženo několik topologií OECT na kterých byla prováděna měření. Jednotlivé topologie jsou na Obr. 30 až Obr. 33 a navzájem se odlišují různým geometrickým uspořádáním vrstev či kombinací materiálů na gate elektrodu. Dále je v textu uvedeno, na které topologii byla měření prováděna.



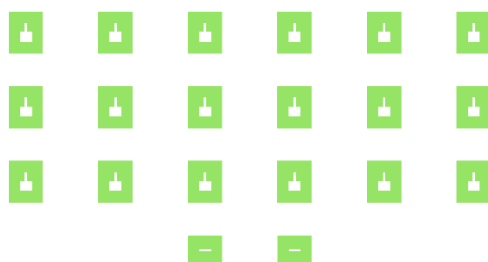
Kompletní OECT



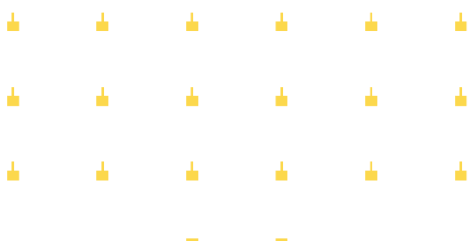
Vrstva PEDOT:PSS



Vrstva uhlík

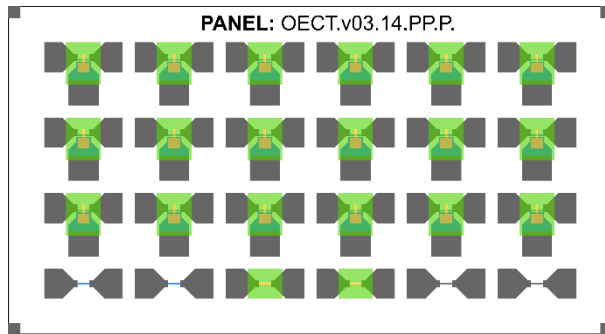


Vrstva maska

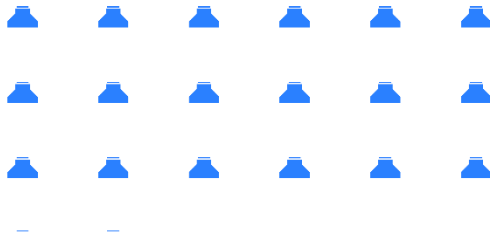


Vrstva elektrolyt

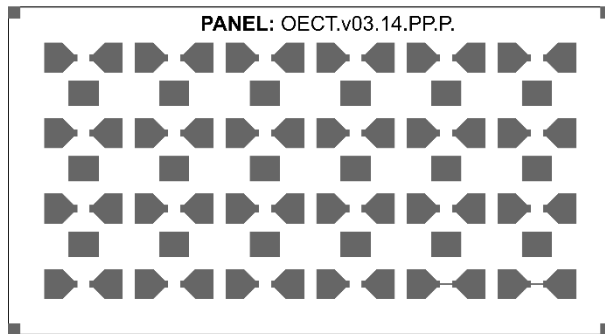
Obr. 30 Návrh topologie OECT třetí generace s uhlíkových gatem. Označení Topo I.



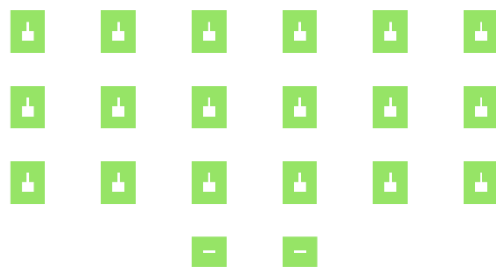
Kompletní OEECT



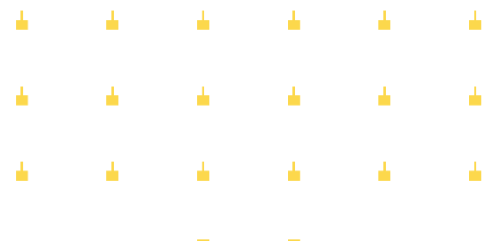
Vrstva PEDOT:PSS



Vrstva uhlík

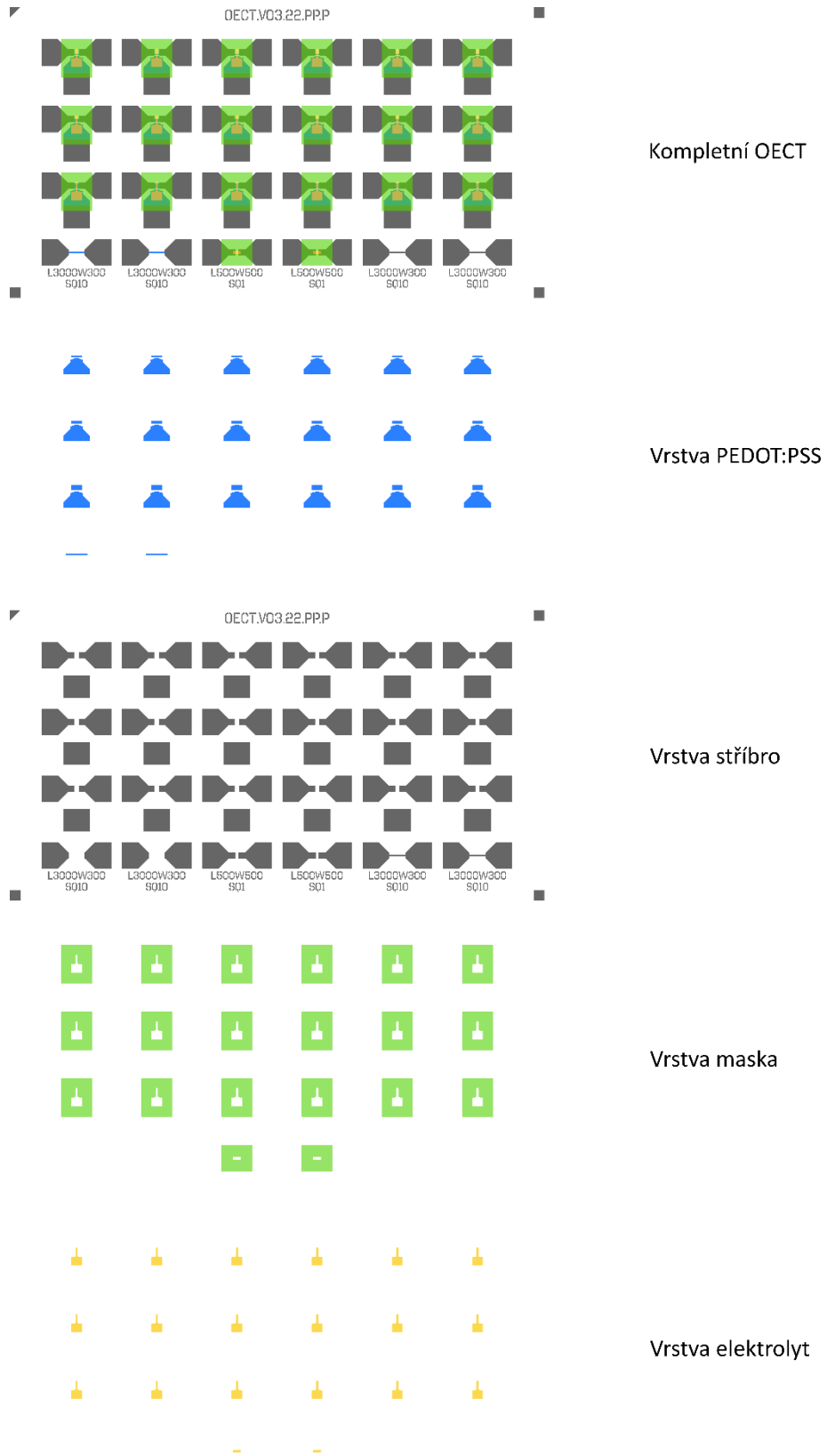


Vrstva maska

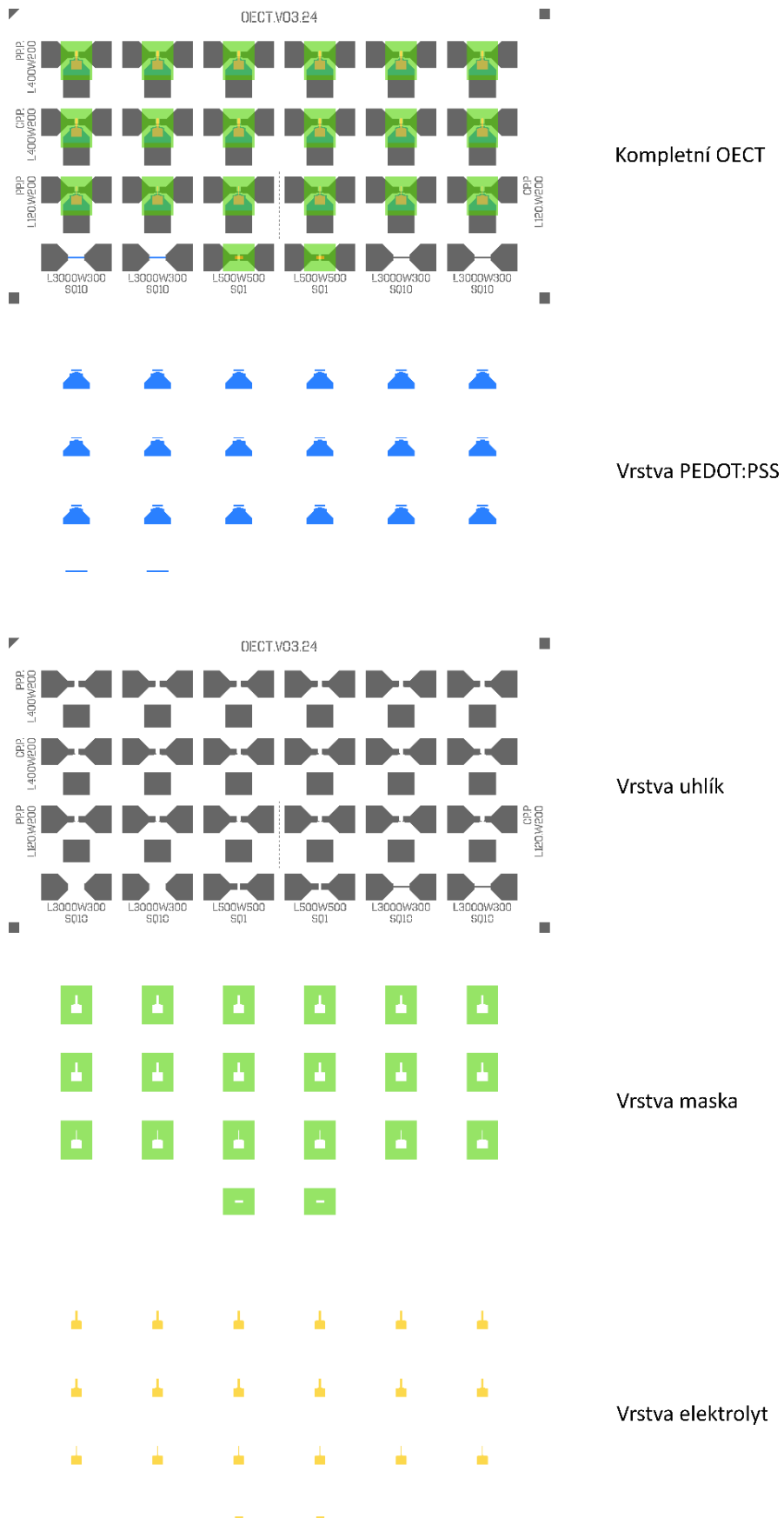


Vrstva elektrolyt

Obr. 31 Návrh topologie OEECT třetí generace s kombinovanou gate elektrodou. Označení Topo II.

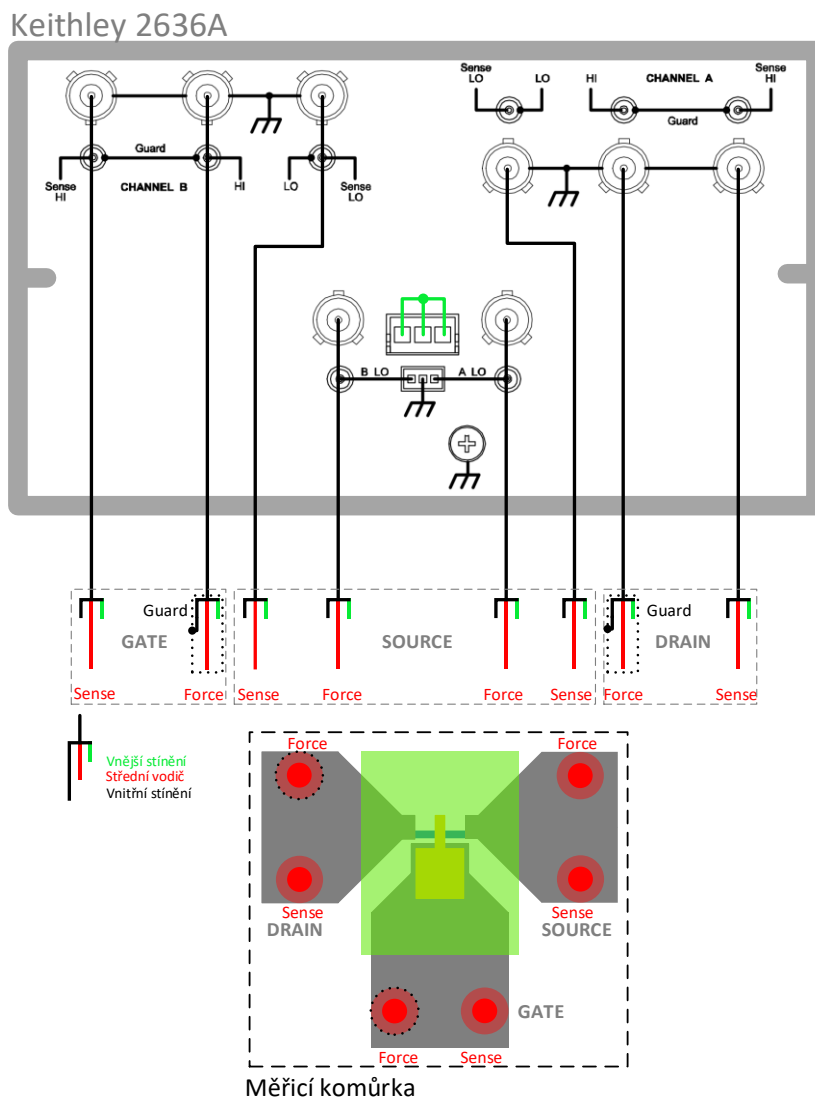


Obr. 32 Návrh topologie OECT třetí generace s kombinovanou gate elektrodou. Označení Topo III.



Obr. 33 Návrh topologie OECT třetí generace s kombinovanou gate elektrodou. Označení Topo IV.

Kromě nové struktury byla pro měření a charakterizaci navržena i speciální měřicí aparatura, viz 4.1. Schéma zapojení pro měření OECT je na Obr. 34, využívá se čtyřbodové zapojení.



Obr. 34 Schéma zapojení pro měření OECT třetí generace.

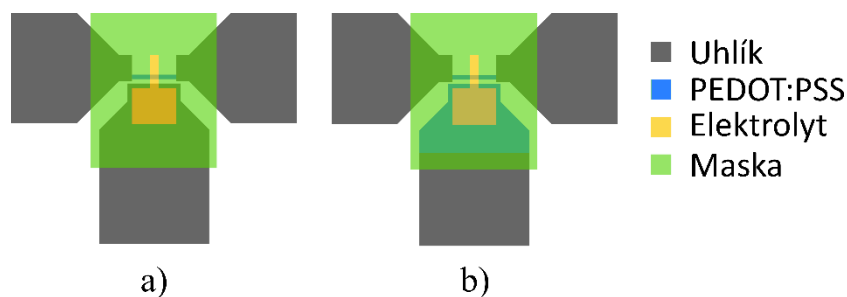
5.1 OECT – Vliv elektrolytu

Vlastnosti OECT je možné ovlivňovat pomocí více parametrů, jak bylo již dříve v textu zmíněno. Klíčovým parametrem ovlivňujícím výsledné vlastnosti OECT je volba elektrolytu. Elektrolyt má zcela zásadní vliv na funkci těchto tranzistorů. Základní dělení elektrolytů je na tuhé, gelové a kapalně. Velkou výhodou použití tuhých elektrolytů je možnost připravit OECT ve vertikálním uspořádání v plně tištěné formě. Nejčastěji se OECT s tuhým elektrolytem využívají jako spínače, tedy v logických obvodech nebo obvodech řídicích tištěné displeje.

Největší nevýhodou tuhých elektrolytů je snížená pohyblivost iontů, což se projevuje pomalejší spínací kinetikou. Gelové elektrolyty jsou na pomezí tuhých a kapalných elektrolytů. Velmi často se využívají v těchto elektrolytech i iontové kapaliny. K přípravě gelů se obvykle používají zesíťované polymery s vysokým stupněm gelace, např. polymery obsahující glykolové skupiny. Výhodou oproti kapalným elektrolytům je jejich vysoká viskozita, což omezuje možnost roztékání vrstvy. I s využitím tohoto elektrolytu je možné vytvořit vertikální topologii, nicméně zde je nutné do elektrolytu ponořit gate elektrodu a nelze tedy tranzistor vyrobit kompletně běžnými tiskovými metodami. Kapalným elektrolytem se nejčastěji využívá v senzorových aplikacích OECT. Nejběžněji používanými elektrolyty jsou solné roztoky různých koncentrací. Největší výhodou těchto elektrolytů je vyšší pohyblivost iontů. Zásadní nevýhodou je nutnost vytvořit „rezervoár“ pro udržení kapalného elektrolytu na definovaném místě. Nežádá se využívají různé „bazénky“ které se plní elektrolytem. Opět se lze setkat jak s planárním tak vertikálním uspořádáním elektrod. V planárním provedení je možné provést pouzdření, čímž se zamezí rozlévání elektrolytu. U vertikální varianty jde převážně o ponoření gate elektrody do elektrolytu.

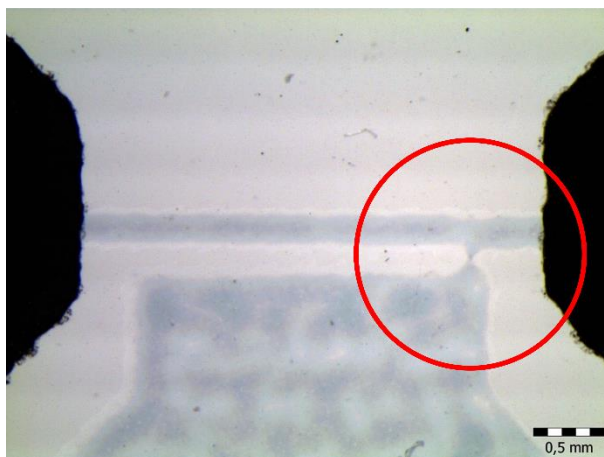
5.1.1 Tuhý elektrolyt

Experimenty prováděné na třetí generaci tranzistorů navázaly plynule na měření provedená na první a druhé generaci OECT. Tuhý elektrolyt byl připraven ve spolupráci s pracovištěm Univerzity v Pardubicích. Hlavní komponentou tuhého elektrolytu byla iontová kapalina s interním označením A3, viz Obr. 42. Tranzistor byl tedy plně tištěný včetně vrstvy elektrolytu. Měřeny byly dvě varianty OECT. První varianta, viz Obr. 35 a) a Obr. 30, kde byl z materiálu PEDOT:PSS vytvořený pouze kanál, celá elektroda gate byla uhlíková. Druhá varianta, viz Obr. 35 b) a Obr. 31, se lišila tím, že gate elektroda byla rozdělena a část, která je v kontaktu s elektrolytem, byla vytištěna z PEDOT:PSS společně s kanálem a kontaktní část byla opět uhlíková.



Obr. 35 Obě varianty měřených OECT s tuhým elektrolytem, a) celouhlíkový gate (Topo I), b) kombinovaný gate PEDOT:PSS/uhlík (Topo II).

Jako nejzásadnější problém se v počátcích měření třetí generace OECT ukázal tisk. Především u varianty se složenou gate elektrodou, viz Obr. 35 b), docházelo ke slévání kanálu s gate elektrodou jak dokládá Obr. 36. Dalším problémem, který se u těchto tranzistorů objevoval, byly odchylky hodnot velikosti odporu kanálu v rámci celého panelu. K těmto odchylkám docházelo vlivem tisku, především vlivem přítlaku a směru pohybu těrky po síti. Tento fakt potvrzovaly naměřené hodnoty odporů, které měly stejný vzrůstající trend ve směru pohybu těrky, více se touto problematikou zabývá práce kolegy S. Pretla [91].



Obr. 36 Ukázka defektního tisku – propojení kanálu a gate elektrody.

Výsledky měření

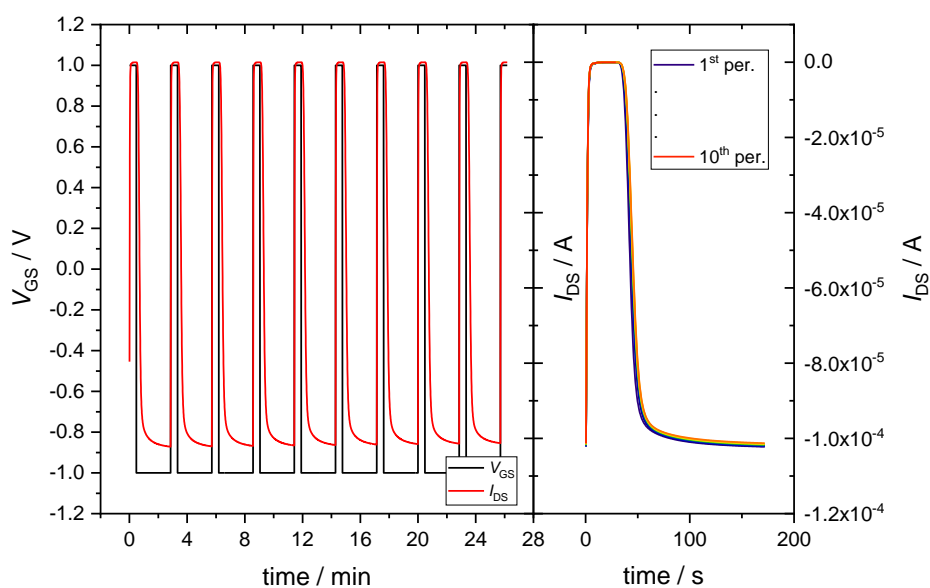
Postupnými úpravami tisku se podařilo připravit vzorky, které měly v rámci celého panelu velice podobné parametry pro obě výše zmíněné varianty uspořádání gate elektrody. Výsledky měření dynamických charakteristik pro tranzistor s uhlíkovým gatem, viz Obr. 37, a pro kombinovaný gate, viz Obr. 38, vykazovaly velice podobné chování s velice slibnou stabilitou spínání po 10-ti provedených spínacích cyklech. Shrnutí naměřených dat viz Tab. 4. Výsledky ukazují velký posun ve funkčnosti OECT třetí generace oproti prvním dvěma generacím ve všech sledovaných parametrech. Především vzrostl spínací poměr, tranzistory byly ale pomalé. Spínací a vypínací časy se pohybovaly v řádech sekund. Poznamenejme, že v této časové škále se téměř neprojevuje změna zpětné kinetiky při opakování spínacích pulzů. Rychlost zpětného pohybu iontů z polymerního kanálu do elektrolytu při vypnutí napětí na gate elektrodě může být tedy odhadnuta v řádech desetin sekundy. Z dosažených výsledků jednoznačně nevyplývá, která z variant uspořádání gate elektrody je lepší. S uhlíkovým gatem dosahovaly OECT vyšší spínací poměr, naopak s kombinovaným gatem byly poněkud rychlejší v obou směrech. Nicméně se pro další testování přistoupilo k variantě s kombinovaným gatem pro zajištění snadnějšího soutisku gate elektrody s kanálem. Tato varianta vyhovuje také požadavku na velké kapacitance mezi elektrolytem a gate elektrodou.

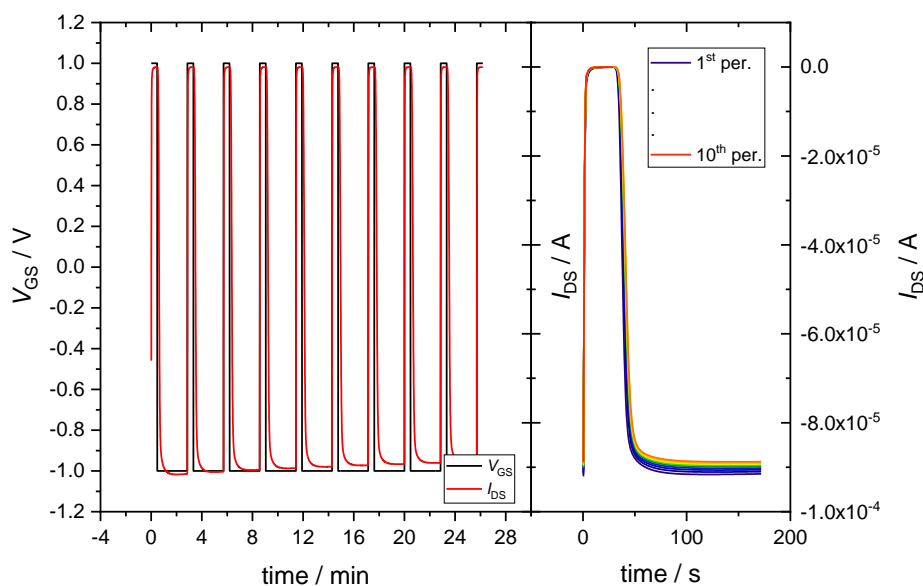
Tab. 4 Změřené parametry třetí generace OECT s tuhým elektrolytem.

Topologie	Gate	$-I_{DS}$ (A)		I_{ON}/I_{OFF} (-)	t (s)	
		ON	OFF		ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
Laterální	1)	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.72 \cdot 10^{-8}$	5900	2.2	15
Laterální	2)	$9.02 \cdot 10^{-5}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$	4700	1.8	10

1) Uhlík

2) PEDOT:PSS/uhlík

**Obr. 37** Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 10 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s tuhým elektrolytem, vzorek s celouhlikovým gatem.



Obr. 38 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 10 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s tuhým elektrolytem, vzorek s kombinovaný gate PEDOT:PSS/uhlík.

5.1.2 Tuhý elektrolyt – dlouhodobé měření

Tento experiment byl proveden za účelem ověření funkčnosti OECT třetí generace s tuhým elektrolytem po 16-ti měsíčním skladování v prostředí s kontrolovanou vlhkostí ($RH \approx 15\%$) při pokojové teplotě. Vzorky byly vybrány na základě dříve provedených měření. Bylo vybráno celkem 9 vzorků OECT, po trojici vzorků od různých typů. Všechny vzorky vycházely z topologie *Topo II*, viz Obr. 31, použita byla tedy kombinovaná gate elektroda PEDOT:PSS/Uhlík. Navzájem se OECT lišily použitým typem elektrolytu nebo kanálem z PEDOT:PSS modifikovaným přídatkem iontové kapaliny A3, viz dále.

Na Obr. 41 je zobrazen vývoj spínacího poměru všech měřených vzorků OECT, které byly měřeny. Je dobře patrné, že došlo ke značnému zmenšení velikosti spínacího poměru během pauzy mezi prvním a druhým měřením (15 měsíců). Podobně z dalšího vývoje spínacího poměru lze vysledovat jeho postupné, sice malé, snižování. V Tab. 5 jsou parametry OECT získané z naměřených dat pro jeden konkrétní tranzistor. Grafy dynamických charakteristik, změřených na začátku experimentu na po 19-ti měsících, pro tento tranzistor je možné vidět na Obr. 39, respektive Obr. 40. Všechny vzorky byly měřeny s přepínáním polarity řídicího napětí V_{GS} v rozsahu ± 1 V a měřeno bylo 10 period spínání.

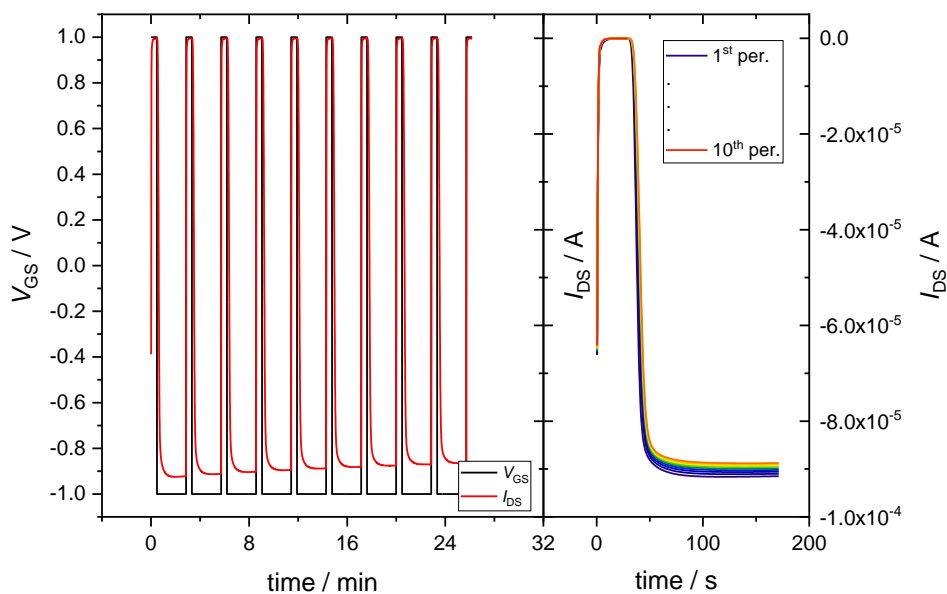
Kromě výrazného zhoršení pozorovaných vlastností OECT je také z Obr. 41 viditelný rozdíl mezi jednotlivými typy měřených OECT. Jedná se především o rozdíl mezi vzorky s označením 72 a zbylými panely 82 a 84, které se od sebe lišily použitým elektrolytem, jehož

přesné složení není možné uvést. U vzorků s označením 84 byl navíc upravený ještě organický polovodič, kdy do něho bylo přidáno malé množství IL A3, ale z výsledků je patrné, že tato úprava neměla tak zásadní vliv na chování OECT, jako použití jiného elektrolytu. Na Obr. 41 je zobrazený vývoj spínacího poměru všech měřených OECT, které se tohoto dlouhodobého testu zúčastnily. Do grafu jsou vynášeny průměry, medián a rozptyl změřených hodnot z 10-ti period spínání napětí V_{GS} a tyto hodnoty jsou vždy uvedeny pro oba směry přechodu OECT, tedy ze stavu *OFF* do *ON* a obráceně, ze stavu *ON* do *OFF*.

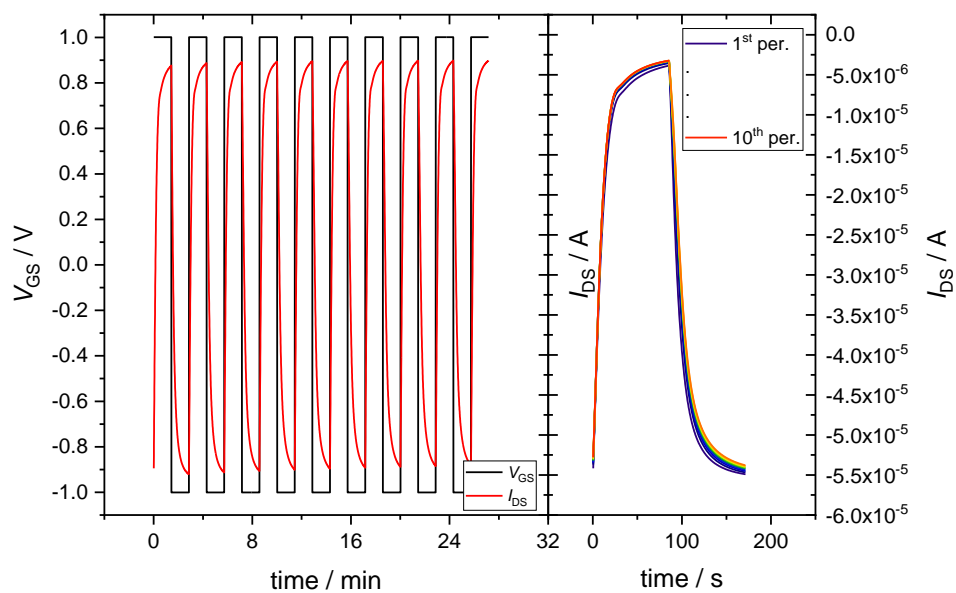
Tab. 5 Změřené parametry třetí generace OECT s tuhým elektrolytem během dlouhodobého testu na vzorku 82_B1.

Měřeno	g_m (S)	- I_{DS} (A)			t (s)	
		ON	OFF	I_{ON}/I_{OFF} (-)	ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
1. měsíc	-	$9.01 \cdot 10^{-5}$	$2.79 \cdot 10^{-8}$	3200	1.6	9.9
16. měsíc	$5.10 \cdot 10^{-5}$	$5.65 \cdot 10^{-5}$	$1.75 \cdot 10^{-6}$	32	12.5	26.1
17. měsíc	$4.47 \cdot 10^{-5}$	$5.43 \cdot 10^{-5}$	$2.13 \cdot 10^{-6}$	27	16.6	31.7
18. měsíc	$4.39 \cdot 10^{-5}$	$5.47 \cdot 10^{-5}$	$2.70 \cdot 10^{-6}$	20	15.9	27.8
19. měsíc	$4.24 \cdot 10^{-5}$	$5.43 \cdot 10^{-5}$	$3.48 \cdot 10^{-6}$	16	20.5	30.5

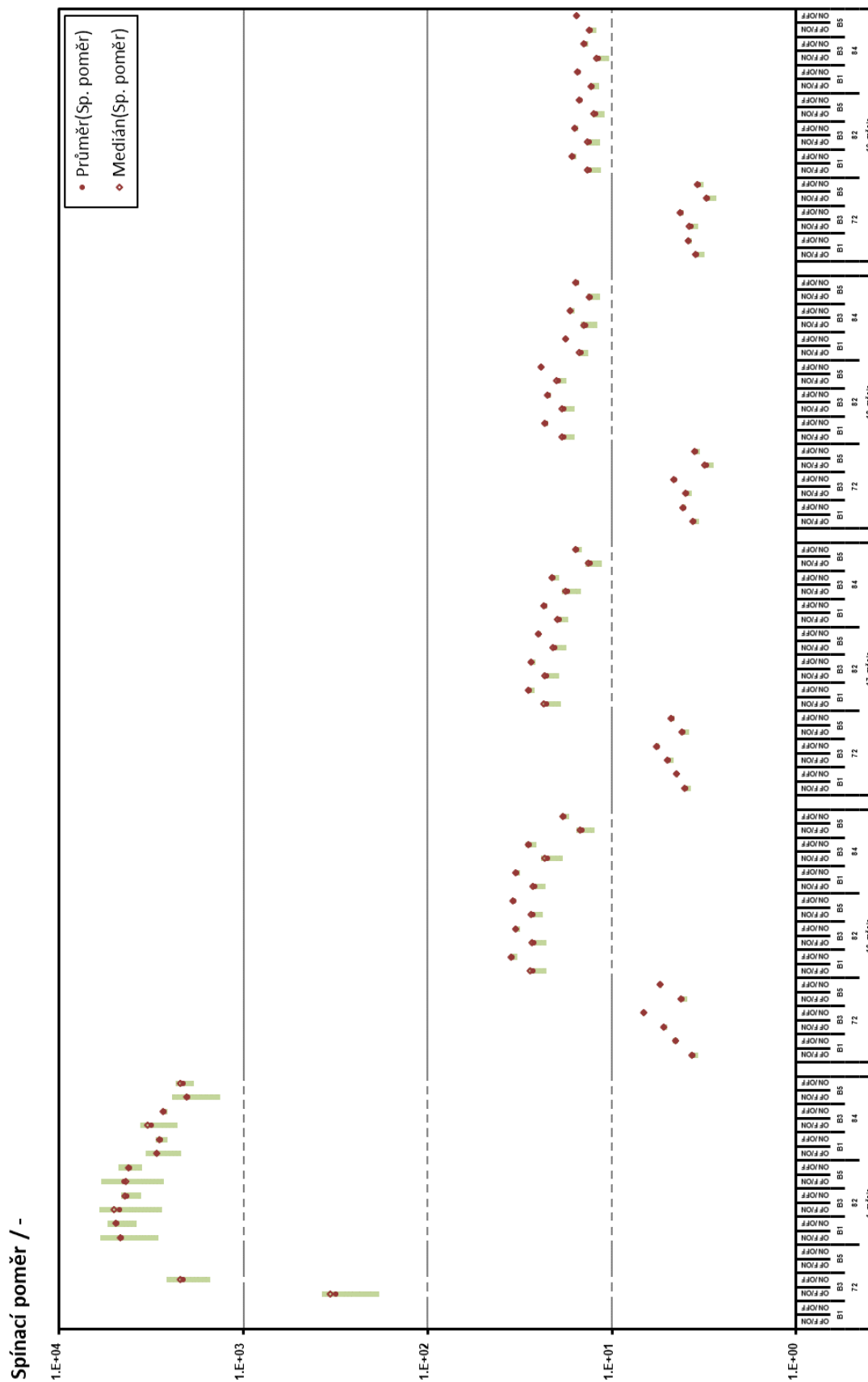
Z dosažených výsledků jednoznačně vyplývá, že OECT lze používat i po více jak ročním skladování v laboratorních podmínkách, ale jejich parametry se rapidně zhoršují, přibližně o 26 % za každý měsíc skladování se snížil spínací poměr (v tomto případě). Kromě tohoto zjištění se ukazuje, že na chování OECT má značný vliv použitý elektrolyt, jehož správnou volbou lze dosáhnout lepších parametrů OECT.



Obr. 39 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 10 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s tuhým elektrolytem, vzorek 82_B1. Měřeno 1. měsíc.



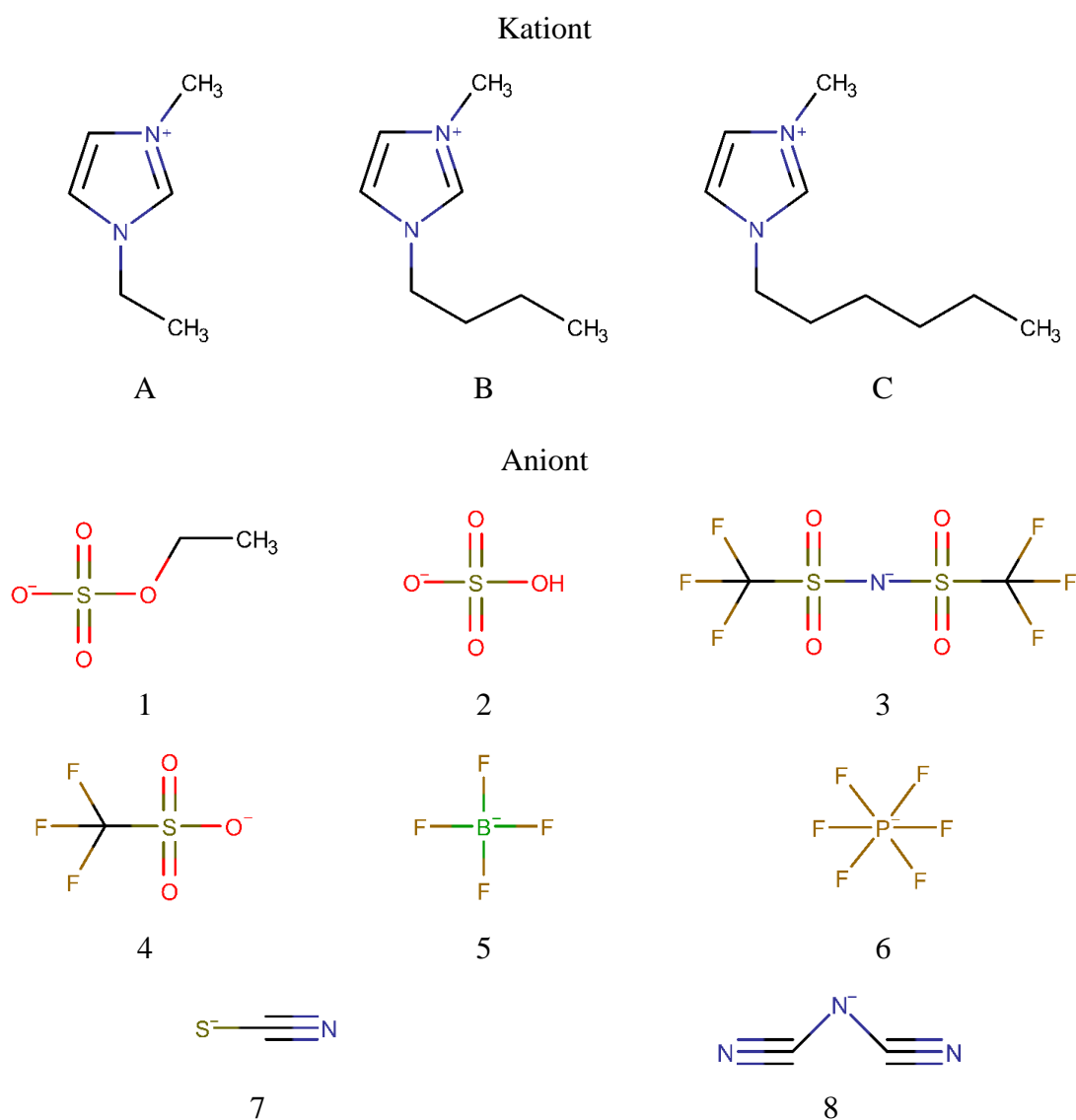
Obr. 40 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 10 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s tuhým elektrolytem, vzorek 82_B1. Měřeno 19. měsíc.



Obr. 41 Vývoj spínacích poměrů měřených vzorků OECT třetí generace s tuhým elektrolytem během dlouhodobého testu. V grafu vynesena střední hodnota, průměrná hodnota rozptýl spínacích poměrů (měřeno 10 period).

5.1.3 Kapalný elektrolyt

Po experimentech s tuhým elektrolytem se pešlo na testovnı kapalných elektrolyt. Byly vybrny iontove kapaliny (IL), ktere se dnes pouıvajı napıklad v superkapacitorech [92]. Velkou vıhodou iontových kapalin je jejich nızk tekavost a moznost kombinovat rzne anionty s kationty a tım vytvret ťırokou ťkalu kapalin s rozlinými parametry. Velkou pednostı IL ve srovnnı s benými elektrolyty, ktere se ve spojení s OECT pouıvajı, je, ťe se nejedn o roztok s uritou koncentracı a homogenitou rozloenı iont v objemu, ale IL je v podstate sloena pouze z iont s minimem dalťších pımeťı. Pro testovnı bylo vybrno nekolik typ iontových kapalin sloených z kationt a aniont, viz Obr. 42. Konkretnı IL viz Tab. 6.



Obr. 42 Pehled vťech pouıvaných kationt: A – 1-Ethyl-3-methylimidazolium, B – 1-Butyl-3-methylimidazolium, C – 1-Hexyl-3-methylimidazolium a aniont: 1 – Ethylsulft, 2 – Hydrogensulft, 3 – Bis(trifluoromethylsulfonyl)imid, 4 – Trifluoromethanesulfont, 5 – Tetrafluorobort, 6 – Hexafluorofosft, 7 – Thiocyant, 8 – Dicyanamid.

Tab. 6 Iontové kapaliny použité během experimentů a jejich interní značení.

Interní označení	Název IL
A1	1-Ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfát
A2	1-Ethyl-3-methylimidazolium hydrogensulfát
A3	1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imid
A4	1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonát
A5	1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborát
A6	1-Ethyl-3-methylimidazolium hexafluorofosfát
A7	1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanát
A8	1-Ethyl-3-methylimidazolium dicyanamid
B3	1-Butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imid
B4	1-Butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonát
B5	1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborát
B6	1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorofosfát
C3	1-Hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imid
C5	1-Hexyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborát
C6	1-Hexyl-3-methylimidazolium hexafluorofosfát

Z Tab. 6 vyplývá, že pro testy byly vybrány celkem 3 kationty a několik aniontů. Tím se vytvořila široká paleta testovaných IL s různými vlastnostmi ovlivňujícími výsledné chování OECT. Dále v textu budou ukázány závislosti některých sledovaných parametrů OECT na charakteristických vlastnostech použitých IL, jako například vodivost, hustota nebo viskozita.

Porovnání iontových kapalin s kationtem 1-Ethyl-3-methylimidazolium

Cílem experimentu bylo ověření vlivu aniontu na chování dynamické odezvy OECT. Za tímto účelem byl vybrán kationt (A) 1-Ethyl-3-methylimidazolium a šestice aniontů (1, 2, 3, 5, 7, 8, viz Obr. 42). V tomto srovnání výsledků nejsou anionty 4 a 6 (měřeno odlišným měřicím profilem). Parametry použitých IL jsou v Tab. 7, která ukazuje, jak jednotlivé iontové kapaliny ovlivňují materiálové parametry OECT. Parametry odezev jsou určovány z proudového pulzu, při periodické změně řídicího napětí V_{GS} . Vzorke s iontovými kapalinami A1, A2, A3 a A5 byly měřeny s periodou odečtu měřených hodnot 420 ms, vzorky s iontovými kapalinami A7 a A8 s periodou 10 ms. Důvodem změny periody odečtu měřených hodnot byla rychlost odezvy proudu I_{DS} na řídicí napětí V_{GS} , kdy elektrochemická redoxní reakce

zodpovědná za modulaci proudu byla natolik rychlá, že nebylo možné s dostatečným rozlišením zaznamenat vypínání OECT, ale pouze ustálené stavy. Tento efekt je možné vidět například u IL A2, kde rychlost spínání je dle výsledků pravděpodobně vyšší, než bylo možné změřit s nastavenou periodou odečtu měřených hodnot.

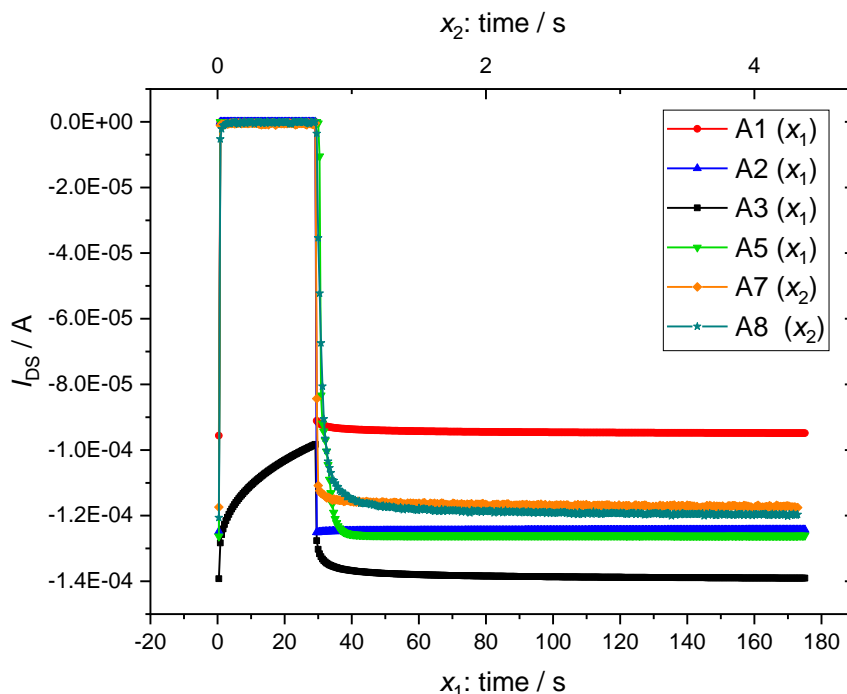
Tab. 7 Parametry použitých IL s 1-Ethyl-3-methylimidazolium kationtem a data získaná ze změřených průběhů.

Interní označení	η (mPa·s)	ρ (g·cm ⁻³)	σ (mS·cm ⁻¹)	t_{ON} (s)	t_{OFF} (s)	Spín. poměr (-)
A1	100	1.23753	3.9	0.35	0.34	1856
A2	1628.4	1.36577	1.5	0.34	0.34	2410
A3	36.5	1.51891	8.5	4.05	20.75	1.41
A5	45	1.27279	14	3.41	0.34	2264
A7	22.15	1.11684	17.8	0.018	0.008	276
A8	21	1.23	13.07	0.11	0.009	924

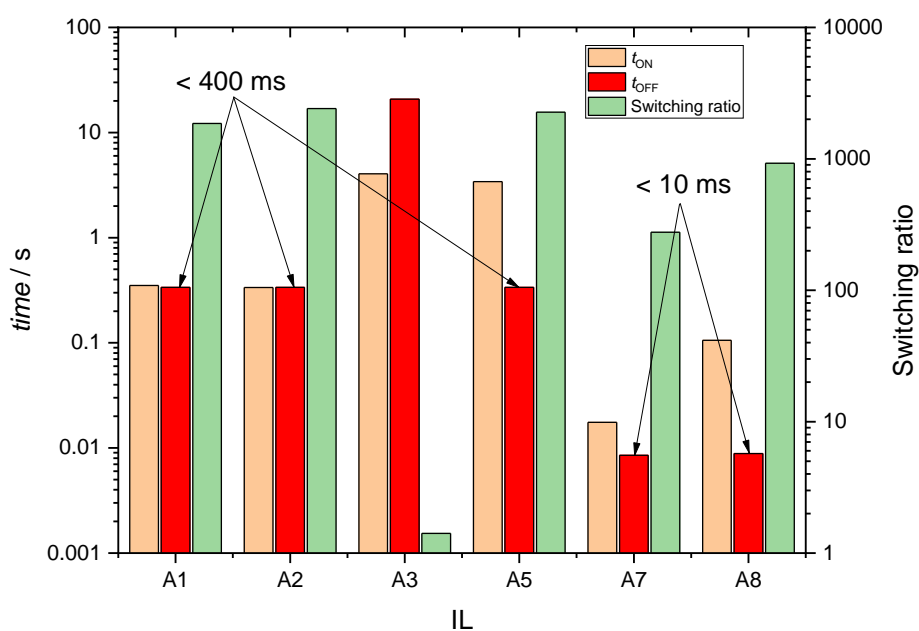
Výsledky měření dynamických odezev proudu I_{DS} na spínání řídicího napětí V_{GS} jsou na Obr. 43. Data extrahovaná z těchto průběhů jsou následně zobrazena v grafu na Obr. 44. Z těchto výsledků je dobře patrné, že téměř všechny použité IL lze použít jako elektrolyt pro OECT. IL A3 vykazuje nejpomalejší odezvu z testovaných IL, což je s největší pravděpodobností způsobeno velikostí aniontu bis(trifluoromethylsulfonyl)imidu, který je ze všech šesti použitých aniontů největší. Z pohledu velikosti spínacího poměru se jako nejvhodnější kandidát pro použití v kombinaci s OECT jeví IL A2 a A5, kde spínací poměr pro oba elektrolyty byl více než 2000, konkrétně 2400 pro IL A2, resp. 2260 pro IL A5. Při zohlednění i dalších výsledků, především pak rychlostí spínání, vychází jako vhodnější elektrolyt IL A2, kde se jak čas vypnutí, tak čas sepnutí dostaly pod hranici rozlišení měřicího profilu, tedy oba časy vyšly rychlejší než 400 ms. Naopak z pohledu rychlosti spínání jsou na tom nejlépe iontové kapaliny A7 a A8, které byly měřeny již za použití upraveného měřicího profilu s kratším intervalem odečtem měřených bodů. Z tohoto pohledu se jako nejrychlejší iontová kapalina s kationtem 1-Ethyl-3-methylimidazolium jeví A7, kde vypínací čas vyšel lepší než 10 ms a zapínací čas přibližně 17 ms, ovšem při snížení spínacího poměru přibližně o jeden řád (280).

Hodnoty v Tab. 7 a Obr. 44 byly získány podle technického profilu uvedeného na Obr. 18. Tyto hodnoty se již blíží hodnotám nejrychlejších OECT popsáných v literatuře (5 ms, [40]).

Pomalejší kinetiky při dlouhých časech relaxačního procesu můžeme vysvětlit vlivem šíření redoxní fronty. Poznamenejme, že souvislost časů t_{ON} a t_{OFF} a spínacího poměru s parametry jako je viskozita, elektrická vodivost a velikost aniontu nebyla úspěšná. Souvislost je nutné pravděpodobně hledat ve vazebních kationt-aniont a molekulárních interakcích.



Obr. 43 Časová závislost proudu I_{DS} na spínání řídicího napětí V_{GS} (± 1 V) pro šest různých IL se společným kationtem 1-Ethyl-3-methylimidazolium.



Obr. 44 Extrahované výsledky měření provedených na OECT s IL se společným kationtem 1-Ethyl-3-methylimidazolium, viz Obr. 43.

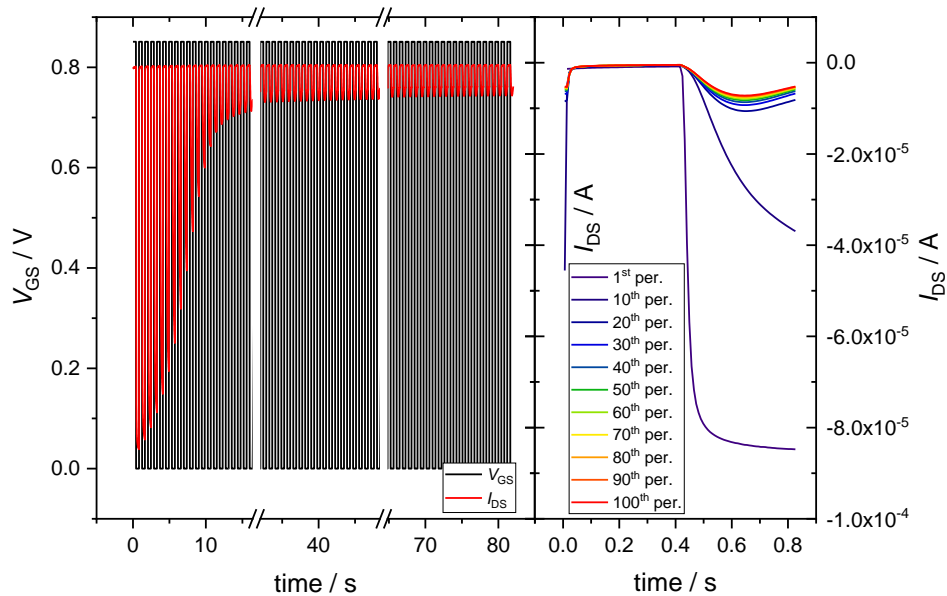
Iontové kapaliny jako elektrolyt pro OECT

Kromě návrhu vhodné topologie a celého uspořádání OECT se jako další klíčový parametr, pro fungování OECT, jeví výběr vhodného elektrolytu. V rámci této práce se hlavním materiálem používaným jako elektrolyt staly iontové kapaliny. Byla testována celá řada iontových kapalin s různými kationty a anionty, viz Obr. 42, kde jsou jednotlivé použité kationty a anionty ukázány. V Tab. 6 jsou pak konkrétní kombinace kationtů a aniontů tvořící použité iontové kapaliny.

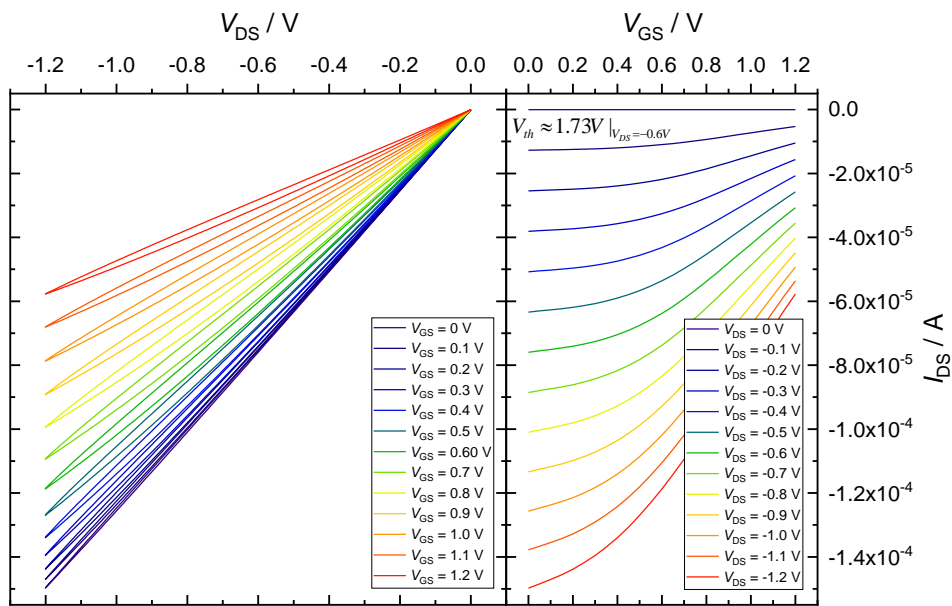
Testování iontových kapalin bylo provedeno na OECT s topologií *Topo III*, viz Obr. 32. Celkem bylo testováno 12 iontových kapalin, viz Tab. 8. Měřené byly jak statické tak dynamické charakteristiky, ze kterých byla získána data uvedená v Tab. 8. Změřené charakteristiky všech OECT s iontovými kapalinami jsou na Obr. 45-Obr. 62. Celkem bylo měřeno 100 period spínání řídicího napětí V_{GS} při dynamických měřeních a dále byly rovněž měřeny statické charakteristiky OECT. IL C3 byla z výsledků zcela vyřazena, neboť nedocházelo k žádnému tranzistorovému jevu, nebyla změřena ani minimální modulace proudu I_{DS} po přiložení řídicího napětí V_{GS} . Další problematickou IL byla A6. Tato IL je při pokojové teplotě ve formě tuhých krystalů a kapalnou se stává při teplotě 58-62 °C. Depozice této IL probíhala umístěním několika krystalků do vymezeného prostoru určeného pro depozici elektrolytu a následným zahřátím substrátu nad teplotu tání IL. Následně bylo provedeno měření. Bohužel se podařilo změřit jen prvních 9 period spínání řídicího napětí, poté došlo k delaminaci vrstvy IL, která byla způsobena s největší pravděpodobností flexibilitou použitého PET substrátu. Po delaminaci vrstvy elektrolytu přestaly vzorky s IL A6 fungovat jako tranzistor.

Z dosažených výsledků jsou vidět relativně velké rozdíly v chování jednotlivých OECT, ale zároveň i podobnosti ve výsledných charakteristikách mezi jednotlivými testovanými IL. OECT, kde byla jako elektrolyt použita iontová kapalina s aniontem bis(trifluoromethylsulfonyl)imide (3 - Obr. 42) bez ohledu na kationt, se chovají po všech stránkách velice špatně nebo vůbec nefungují. Spínací poměr těchto tranzistorů je ≈ 1 , nelze tedy hovořit o spínání. Naopak IL s aniontem tetrafluoroborát (5 - Obr. 42) se jako elektrolyt pro OECT jeví jako vhodnější volba, opět bez ohledu na kationt. Rychlosti spínání u OECT s tímto kationtem se pohybují v řádech desítek ms a spínací poměry okolo 120. Rovněž iontové kapaliny s aniontem hexafluorofosfát (6 - Obr. 42) v kombinaci se všemi kationty lze použít jako elektrolyt pro OECT. Například OECT s IL B6 má jeden z největších spínacích poměrů dosažených na tomto typu tranzistorů (560). Nicméně jako nejvhodnější elektrolyt se jeví

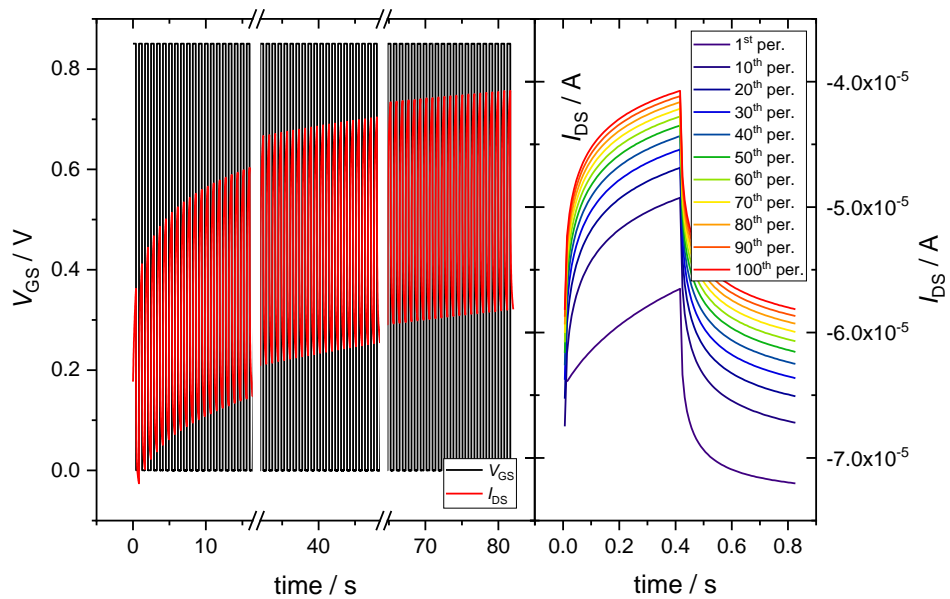
iontová kapalina B4, se kterou dosahují vzorky opakovaně nejlepší výsledky. Rychlost spínání je na hranici jednotek ms ($t_{\text{OFF}} \approx 7\text{ms}$) a spínací poměr 655. Z výše uvedeného lze tedy vybrat z testovaných elektrolytů přibližně čtyři iontové kapaliny, se kterými lze testované vzorky používat: A5, B4, B5, C5.



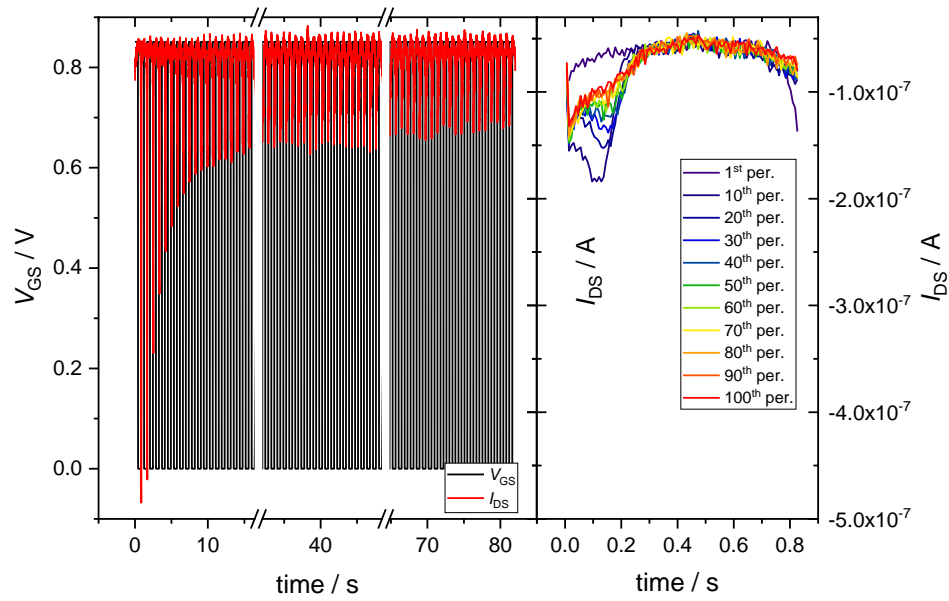
Obr. 45 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL A1.



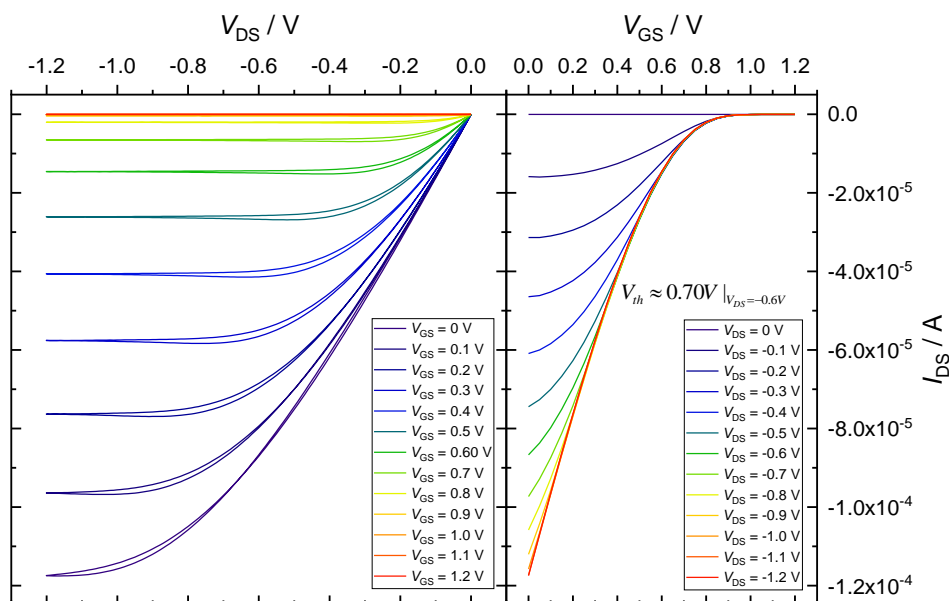
Obr. 46 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL A3. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



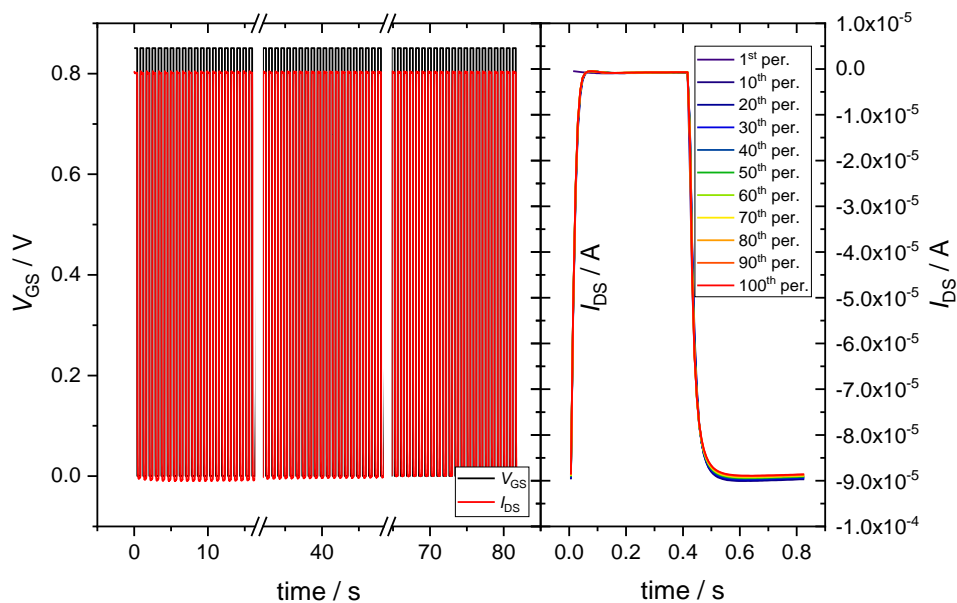
Obr. 47 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL A3.



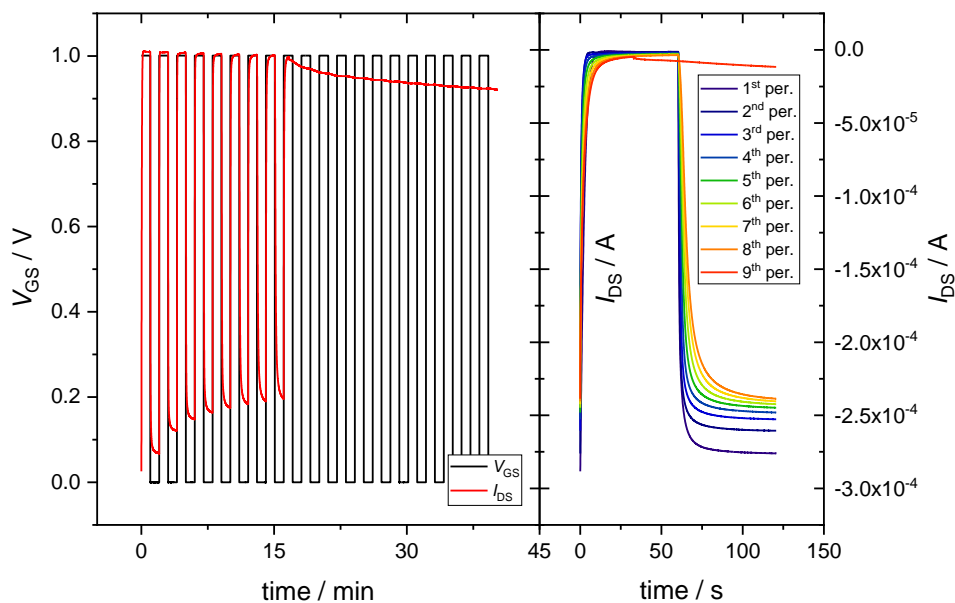
Obr. 48 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL A4.



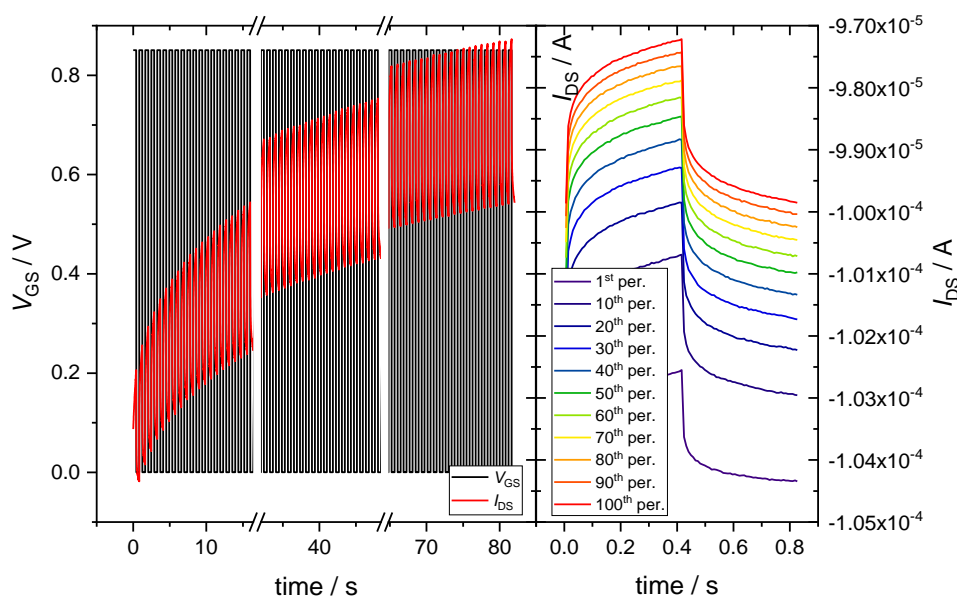
Obr. 49 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL A5. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



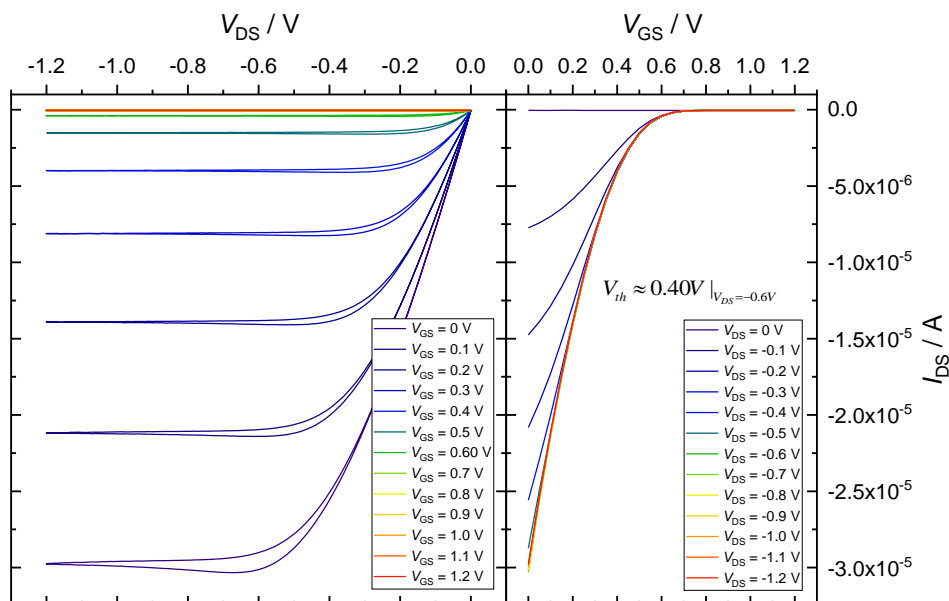
Obr. 50 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL A5.



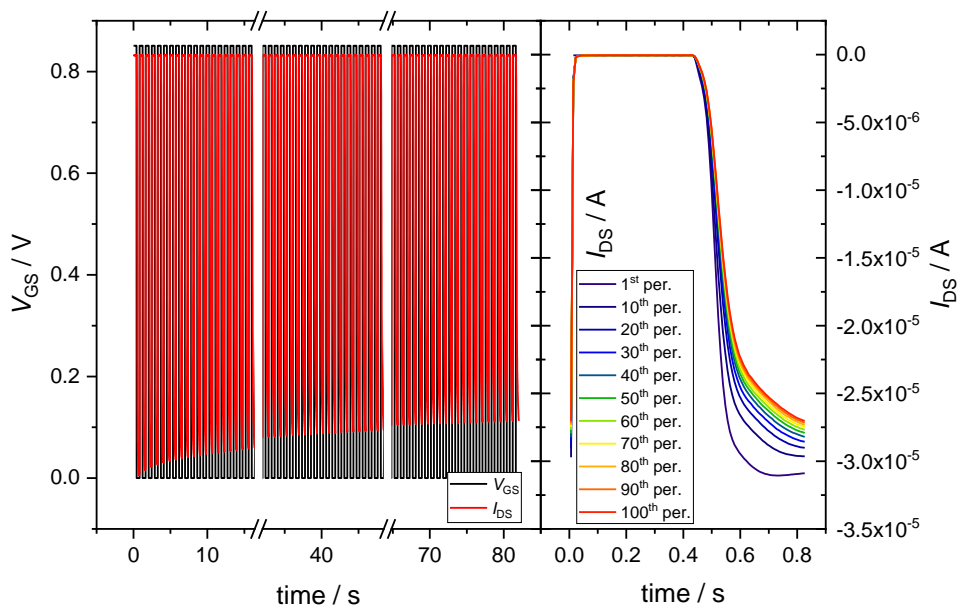
Obr. 51 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL A6.



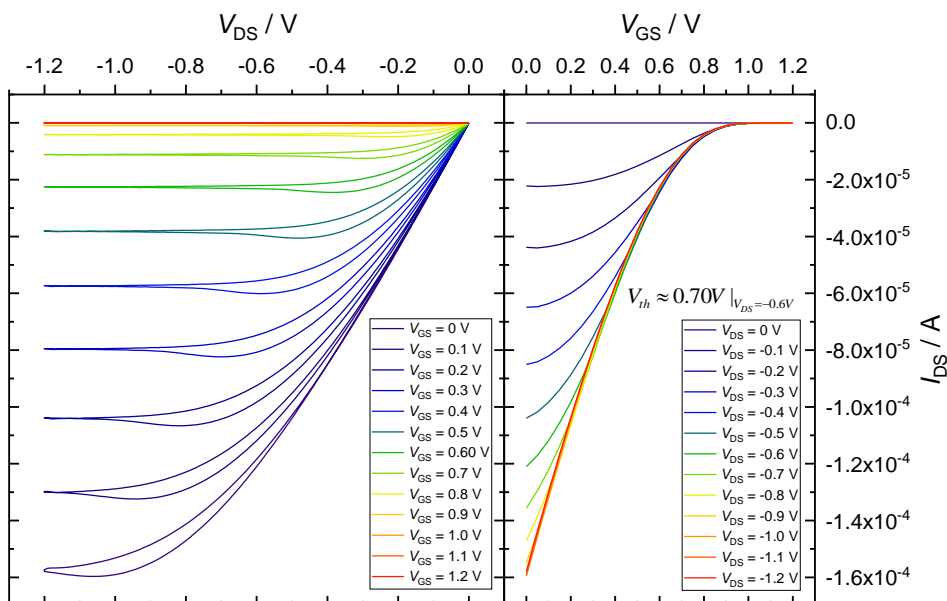
Obr. 52 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B3.



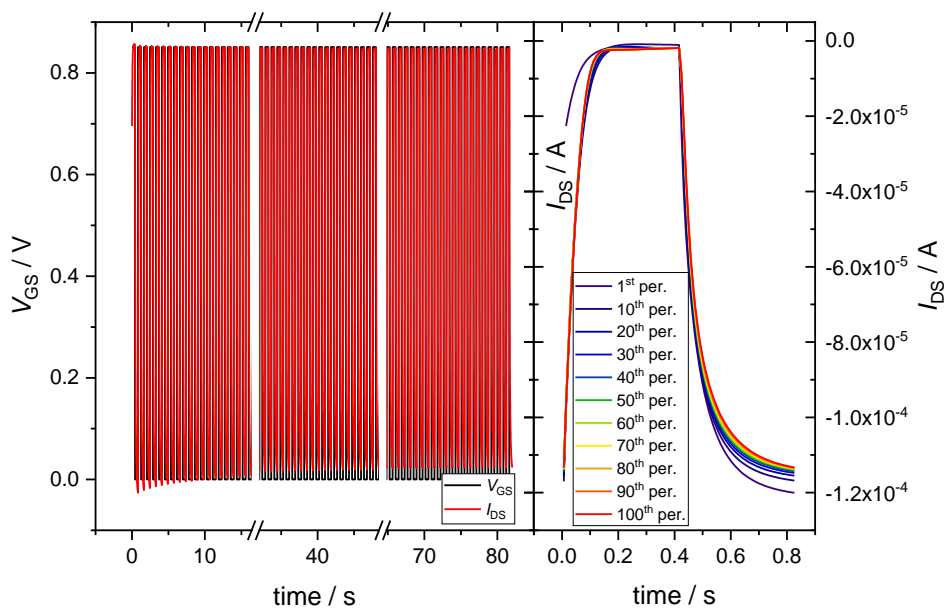
Obr. 53 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL B4. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



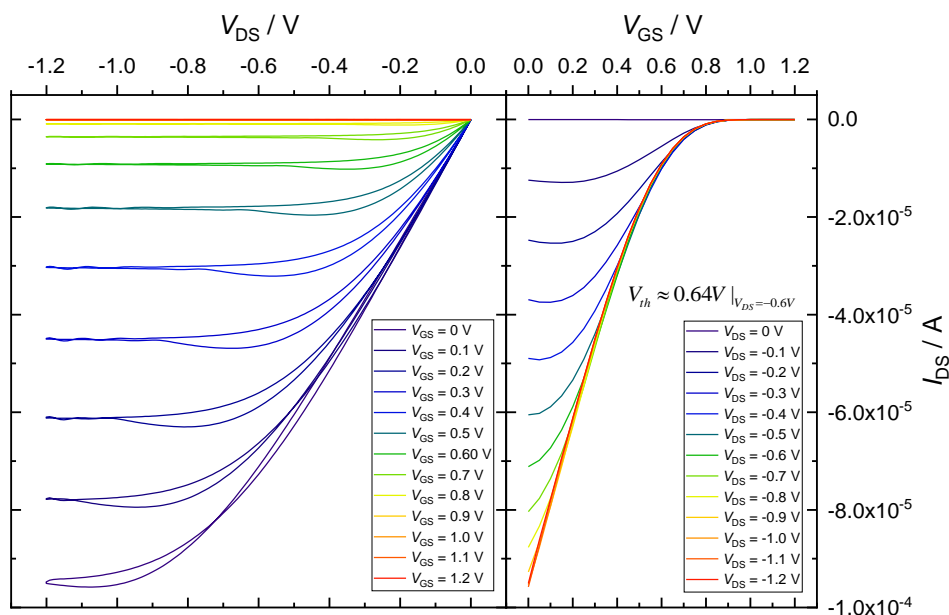
Obr. 54 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 11 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B4.



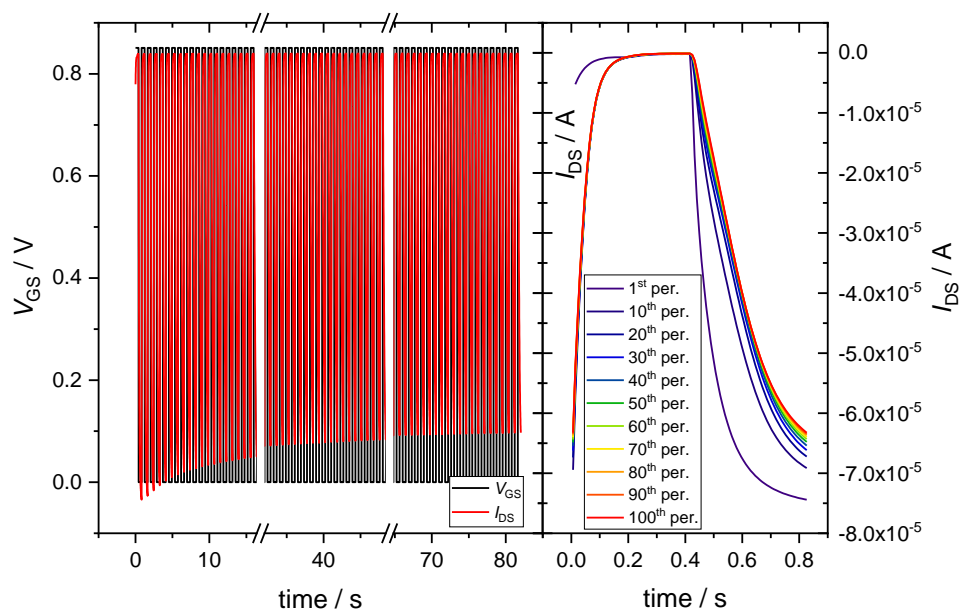
Obr. 55 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL B5. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



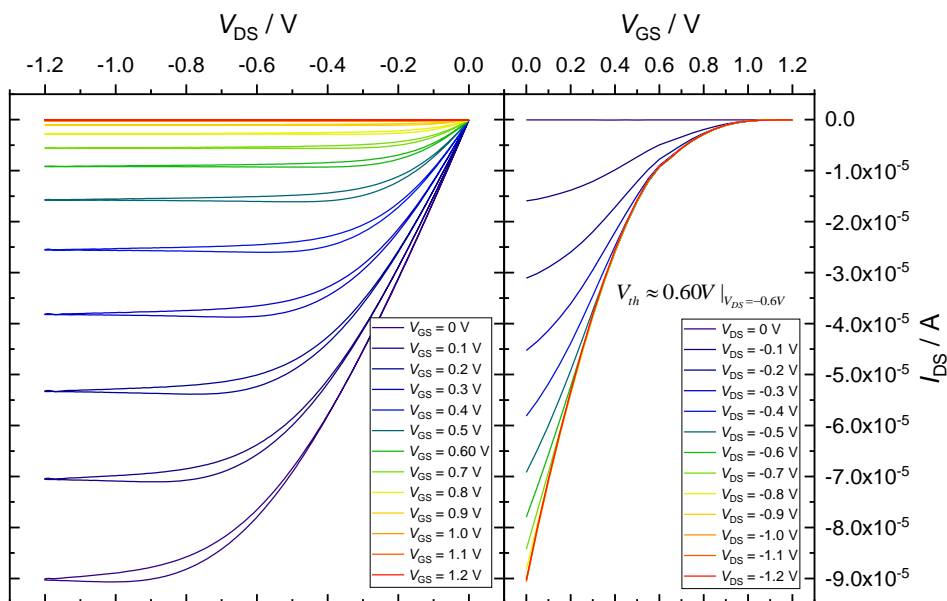
Obr. 56 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B5.



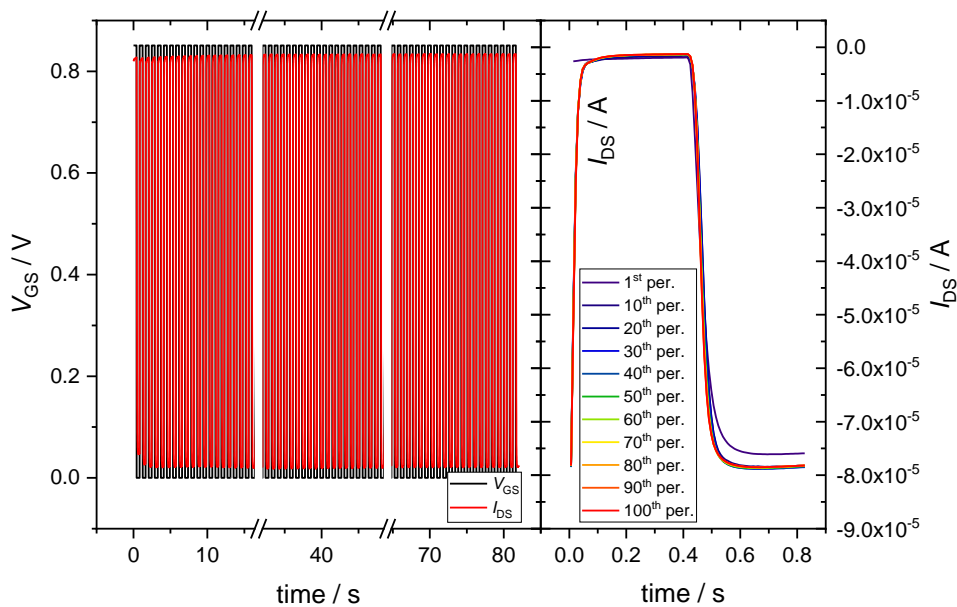
Obr. 57 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL B6. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



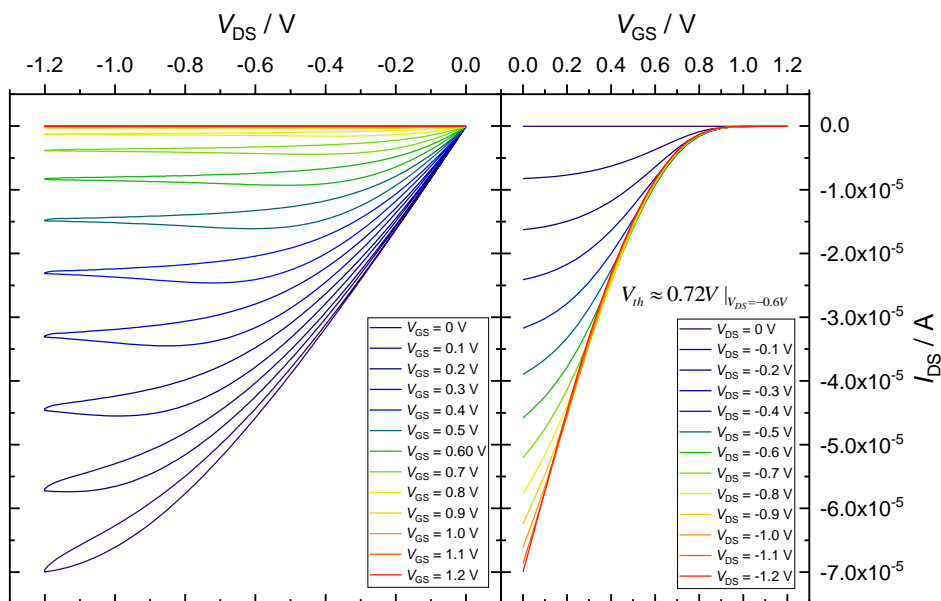
Obr. 58 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B6.



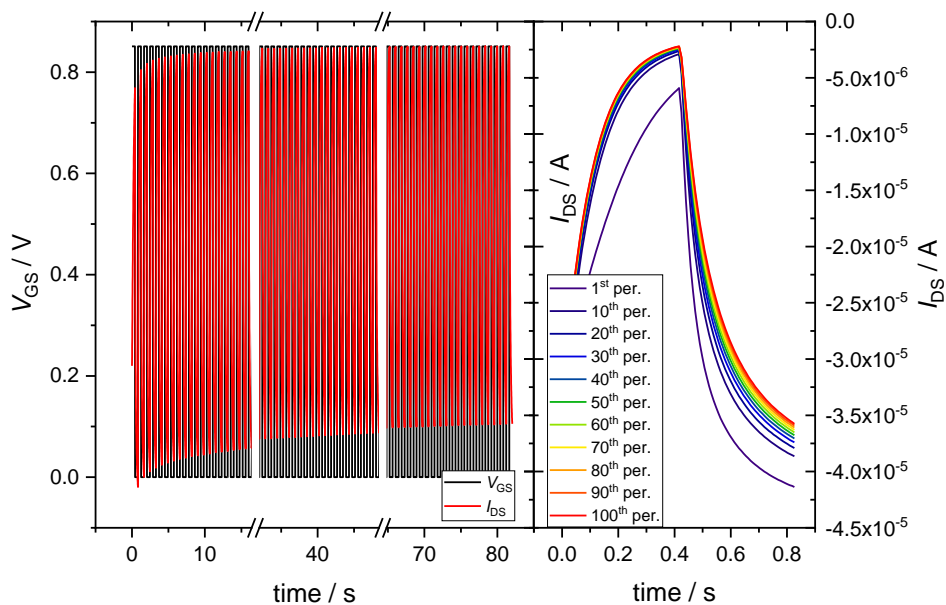
Obr. 59 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL C5. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



Obr. 60 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL C5.



Obr. 61 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL C6. V grafu uvedeno prahové napětí V_{th} .



Obr. 62 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL C6.

Tab. 8 Změřené parametry třetí generace OECT s různými iontovými kapalinami použitými jako elektrolyt. (Data jsou získána z 2. a 50. periody spínání V_{GS} , výjimkou je g_m .)

IL	g_m (S)	Per.	- I_{DS} (A)		I_{ON}/I_{OFF} (-)	t (ms)	
			ON	OFF		ON → OFF	OFF → ON
A1	-	2.	$8.26 \cdot 10^{-5}$	$7.87 \cdot 10^{-7}$	105	7	83
		50.	$5.88 \cdot 10^{-6}$	$4.84 \cdot 10^{-7}$	12	28	80
A3	$5.86 \cdot 10^{-5}$	2.	$7.09 \cdot 10^{-5}$	$5.45 \cdot 10^{-5}$	1.3	253	155
		50.	$6.16 \cdot 10^{-5}$	$4.35 \cdot 10^{-5}$	1.4	224	188
A4	-	2.	$8.33 \cdot 10^{-5}$	$7.90 \cdot 10^{-5}$	1.1	266	163
		50.	$7.86 \cdot 10^{-5}$	$7.29 \cdot 10^{-5}$	1.1	230	207
A5	$1.53 \cdot 10^{-4}$	2.	$8.94 \cdot 10^{-5}$	$8.58 \cdot 10^{-7}$	104	28	43
		50.	$8.91 \cdot 10^{-5}$	$7.17 \cdot 10^{-7}$	124	25	41
A6	-	2.	$1.59 \cdot 10^{-4}$	$1.43 \cdot 10^{-6}$	110	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
		5.	$1.69 \cdot 10^{-4}$	$2.62 \cdot 10^{-6}$	64	$3 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
B3	-	2.	$1.04 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-4}$	1.02	267	138
		50.	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$9.85 \cdot 10^{-5}$	1.03	219	171
B4	$9.22 \cdot 10^{-5}$	2.	$2.96 \cdot 10^{-5}$	$4.05 \cdot 10^{-8}$	731	7	128
		50.	$2.80 \cdot 10^{-5}$	$4.27 \cdot 10^{-8}$	655	7	165
B5	$2.12 \cdot 10^{-4}$	2.	$1.20 \cdot 10^{-4}$	$1.74 \cdot 10^{-6}$	69	95	145
		50.	$1.14 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-6}$	62	79	145
B6	$1.44 \cdot 10^{-4}$	2.	$7.38 \cdot 10^{-5}$	$2.42 \cdot 10^{-7}$	305	78	178
		50.	$6.48 \cdot 10^{-5}$	$1.16 \cdot 10^{-7}$	560	83	273
C3	Vzorky s IL C3 byly zcela nefunkční. Nulová modulace proudu I_{DS} .						
C5	$1.34 \cdot 10^{-4}$	2.	$7.77 \cdot 10^{-5}$	$2.01 \cdot 10^{-6}$	39	24	65
		50.	$7.83 \cdot 10^{-5}$	$1.34 \cdot 10^{-6}$	58	27	54
C6	$7.98 \cdot 10^{-5}$	2.	$4.05 \cdot 10^{-5}$	$4.43 \cdot 10^{-6}$	9	250	207
		50.	$3.68 \cdot 10^{-5}$	$2.42 \cdot 10^{-6}$	15	206	240

5.2 OECT – Šíření redoxní fronty a stabilita

Jedním z klíčových parametrů většiny tištěných organických funkčních prvků, kam OECT patří, je dosažení spolehlivosti jejich funkce i po větším počtu pracovních cyklů. U tranzistorů například po větším počtu spínacích cyklů. Zásadním problémem, který se běžně u testovaných OECT objevuje, je postupná degradace jejich vlastností. Dochází především ke snižování

proudu I_{DS} v otevřeném stavu, a tím i ke zmenšování spínacího poměru. Problém s dosažením stabilního chování je spojen se šířením redoxní fronty [40, 41, 85]. V ideálním případě probíhá redoxní reakce pouze v objemu organického polovodiče (kanál), který je vymezen rozhraním elektrolyt/kanál. Ve skutečnosti se však objem organického polovodiče, který je ovlivňován elektrochemickou reakcí zvětšuje i za toto rozhraní směrem k záporné elektrodě, která přitahuje kladné ionty podílející se na elektrochemické reakci. Toto nastává při přiloženém kladném napětí V_{GS} na řídicí elektrodu gate. Kladné ionty, které postupují i za zmíněné rozhraní, redukují postupně větší objem organického polovodiče (kanálu). Tento jev se běžně v literatuře označuje jako šíření redoxní fronty. Toto šíření je možné sledovat například opticky, kdy se využívá jedné z vlastností materiálu PEDOT:PSS, který mění svoji barvu při přechodu z vodivého (oxidovaného) do nevodivého (redukovaného) stavu. Čím déle je OECT udržován ve vypnutém stavu ($V_{GS} > 0$ V), tím déle má redukční fronta možnost se šířit směrem k záporně polarizované elektrodě. Po odpojení řídicího napětí V_{GS} se celý systém samovolně vrací do rovnovážného stavu. Tento samovolný proces má svoji omezenou dynamiku a právě zde se projevuje vliv redukční fronty. Pokud by docházelo k redukci kanálu pouze v oblasti vymezené plochou rozhraní elektrolyt/kanál, pak by měl být proces spínání a vypínání tranzistoru vždy stejný a stabilní, pokud nebude uvažována degradace materiálů. To ale nenastává vždy a kationty, které se pohybují i za zmíněné rozhraní prodlužují dobu potřebnou pro opětovné uvedení tranzistoru do rovnovážného stavu, kdy je kanál ve výchozím vodivém stavu.

Kromě výše zmíněného efektu dochází také k lokalizaci některých kationtů v objemu organického polovodiče i po vypnutí napětí V_{GS} . Tato skutečnost ovlivňuje průběh relaxačního procesu $OFF \rightarrow ON$ a prodlužuje šířku proudového pulzu. Tato relaxace má obvykle kvazi-exponenciální průběh; její časová konstanta se zvětšuje s počtem aplikovaných pulzů. Tento problém bude diskutován později.

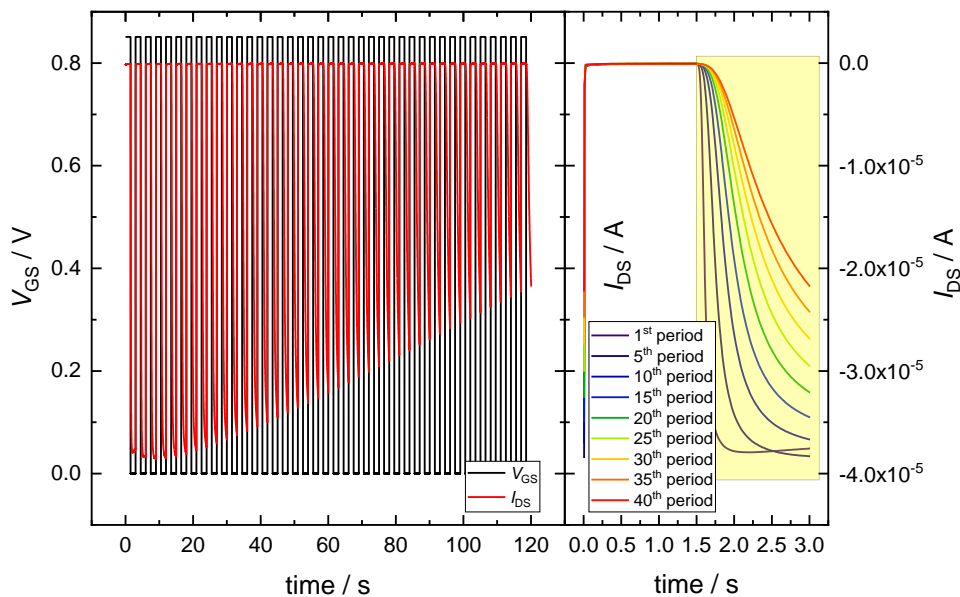
5.2.1 Vliv redoxní fronty na chování OECT

Jak bylo zmíněno výše, redoxní fronta ovlivňuje především dynamiku návratu OECT do rovnovážného stavu, kdy je kanál otevřený a to především bezprostředně po vypnutí napětí V_{GS} . Druhý proces diskutovaný v předchozí kapitole způsobuje, že doby zavření a otevření tranzistoru jsou rozdílné. Při uvažované polaritě zdrojů napětí se v literatuře hovoří o procesu poklesu („decay process“). Tento proces se obvykle modeluje exponenciální funkcí (16) [93]. Popis pomocí takového typu funkce lze použít, ovšem pouze s omezením na jeden pulz. Uvažujeme-li více po sobě aplikovaných pulzů, stává se popis pomocí této funkce nepřesný,

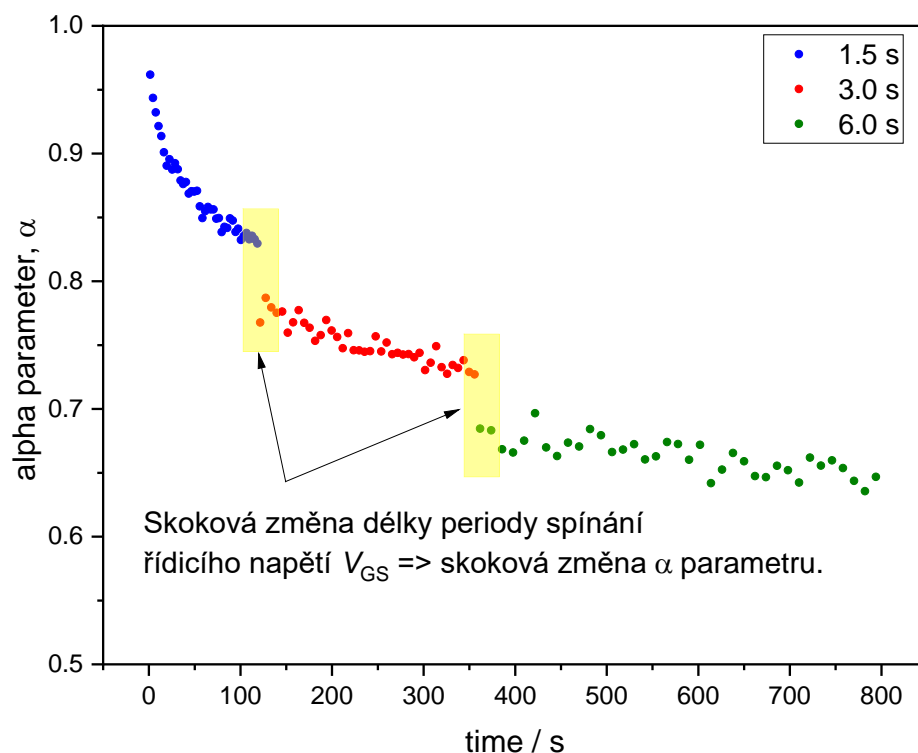
$$I_{DS} \sim \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (16)$$

Proto byla provedena úprava rovnice (16), kdy byl do vztahu přidán další parametr, tzv. rozptylový α parametr, který zahrnuje vliv kationtů v objemu organického polovodiče na průchod proudu I_{DS} . α může nabývat při běžných podmínkách hodnoty $0.5 \leq \alpha \leq 1$. Pro „neporušený“ systém $\alpha = 1$. Při $\alpha = 0.5$ je průchod proudu primárně ovlivňován difuzí. Výsledná rozšířená exponenciální funkce (17) („stretched exponential function“) umožňuje tedy uvažovat vliv lokalizovaných kationtů v objemu polymerního kanálu na průběh relaxačního procesu. Na Obr. 63 je znázorněna část měření, která názorně ilustruje vliv redoxní fronty omezující proud I_{DS} v sepnutém stavu a ze které byl určován α parametr, viz Obr. 64. Nespojitosť jednotlivých průběhů s různou periodou spínání řídicího napětí V_{GS} na Obr. 64 je způsobena skokovou změnou délky periody, po kterou je OECT vystaven působení napětí V_{GS} . Tím pádem dochází k většímu vlivu redoxní fronty, což se okamžitě projeví ve skokové změně α parametru.

$$I_{DS} \sim \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha\right] \quad (17)$$

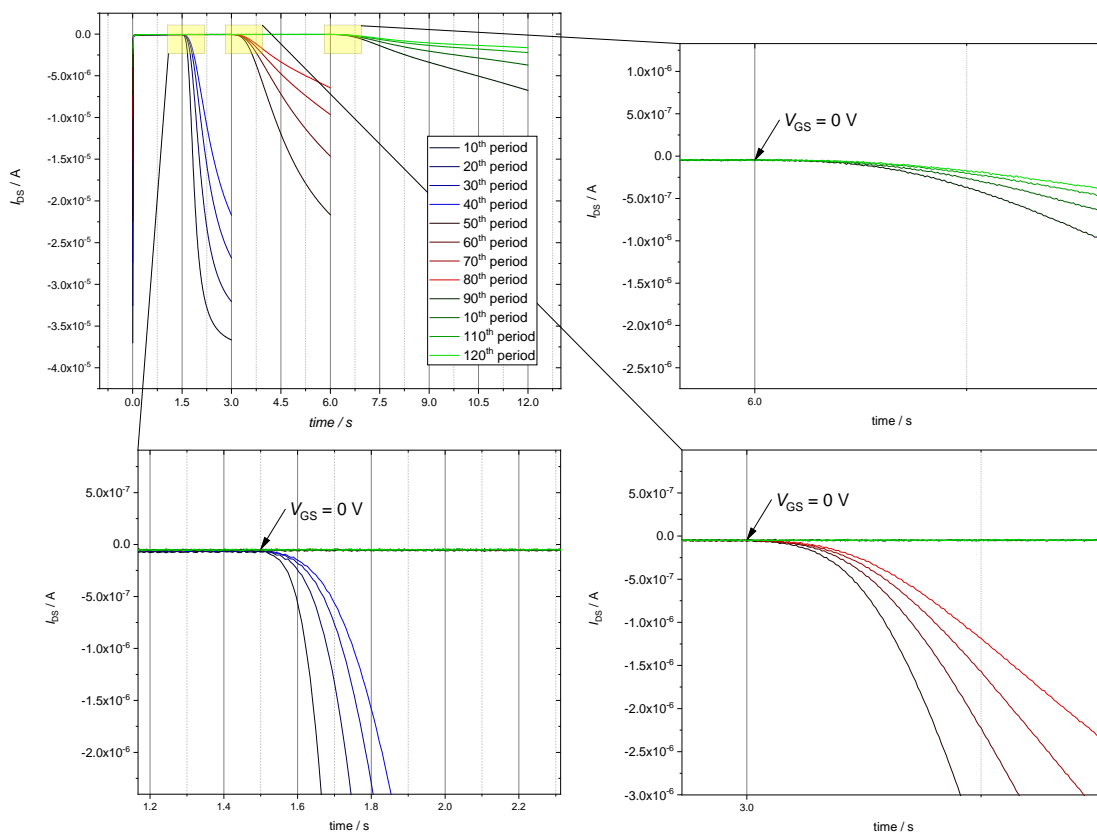


Obr. 63 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a vybrané kinetické křivky pro několik pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B4. Ve žlutém poli vyznačena oblast, ve které se vyhodnocuje α parametr.



Obr. 64 Vývoj α parametru během měření dynamických charakteristik OECT s IL B4. ● 40 pulzů spínání V_{GS} s periodou spínání 1.5 s, ● 40 pulzů spínání V_{GS} s periodou spínání 3.0 s, ● 40 pulzů spínání V_{GS} s periodou spínání 6.0 s.

Zmíněný α parametr dává možnost do matematického popisu chování OECT zahrnout vliv redoxní fronty, ovšem ne zcela. Kromě snižování účinnosti spínání, snižování spínacího poměru, má tento děj i negativní vliv na rychlost spínání. Projevuje se to prodlužováním stavu, ve kterém je OECT stále ve vypnutém stavu nebo se z něho vrací se zvětšujícím se zpožděním po odpojení řídicího napětí V_{GS} do stavu *ON*. Tento nežádoucí efekt je názorně ukázán na Obr. 65, kde jsou vykresleny vždy 4 periody měřeného signálu pro různou délku periody spínání řídicího napětí V_{GS} . V detailních grafech jsou pak vyznačeny okamžiky vypnutí řídicího napětí a z těchto grafů je velice dobře patrné, jak se prodlužuje doba, po kterou je OECT v zavřeném stavu po odpojení řídicího napětí. Tento jev není prozatím do popisu chování OECT pomocí (17) uvažován, neboť toto vede na velice komplexní řešení.



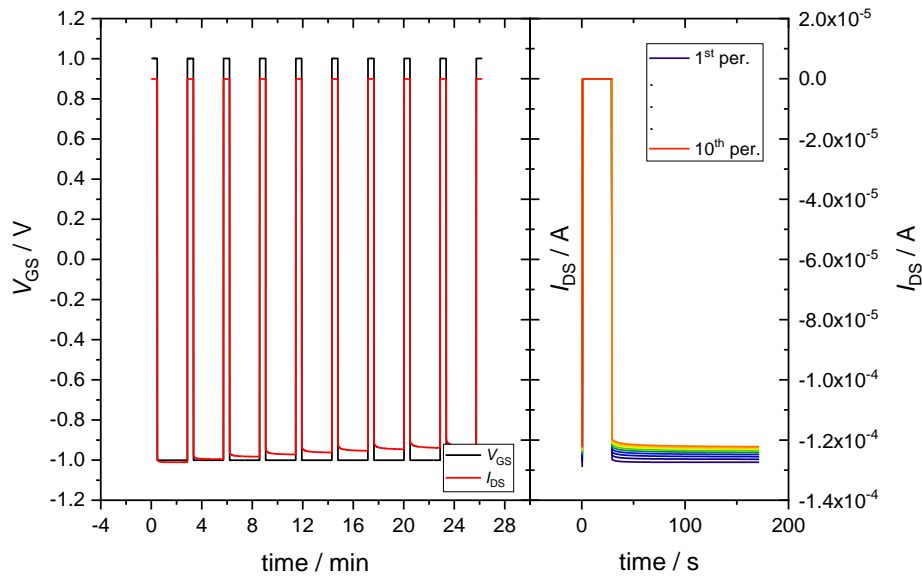
Obr. 65 Prodlužování doby zapnutí po odpojení řídicího napětí V_{GS} s různou délkou periody sepnutí. Vlevo nahoře je výběr 12-ti period proudů I_{DS} pro 3 různé periody sepnutí napětí V_{GS} . Vlevo dole detail odezvy proudů I_{DS} v okamžiku vypnutí napětí V_{GS} s periodou spínání 1.5 s. Vpravo dole detail odezvy proudů I_{DS} v okamžiku vypnutí napětí V_{GS} s periodou spínání 3 s. Vpravo nahoře detail odezvy proudů I_{DS} v okamžiku vypnutí napětí V_{GS} s periodou spínání 6 s.

5.2.2 Způsoby omezení vlivu redoxní fronty

Dvojitá polarita řídicího napětí V_{GS}

Jedná se o relativně jednoduchý způsob, jakým je možné dosáhnout zvýšení stability OECT a zlepšení symetrie rychlostí spínání a vypínání, bez nutnosti změny topologie. Jedná se o využití obou polarit řídicího napětí V_{GS} . Kladná polarita gate tranzistor zavírá, záporná polarita gate urychluje otevírání tranzistoru; urychluje se zpětný pohyb kationtů z objemu kanálu a tedy jeho zpětnou oxidaci, která bez řídicího napětí probíhá samovolně. Tento postup vyžaduje dva zdroje řídicího napětí, nebo jeden zdroj schopný otáčet polaritu. To je nevýhoda tohoto řešení. Tento způsob urychlení procesu spínání a vypínání byl vyzkoušen na vzorcích OECT s IL B4, viz Obr. 66. Z těchto výsledků je dobře patrné, že rychlosti spínání a vypínání jsou rychlé, v tomto případě rychlejší než 400 ms. Co se stability měření týká, rozdíl velikosti

proudu v otevřeném stavu při první periodě spínání ($-1.27 \cdot 10^{-4}$ A) a při poslední desáté periodě ($-1.22 \cdot 10^{-4}$ A) činí pouhá 4 %.

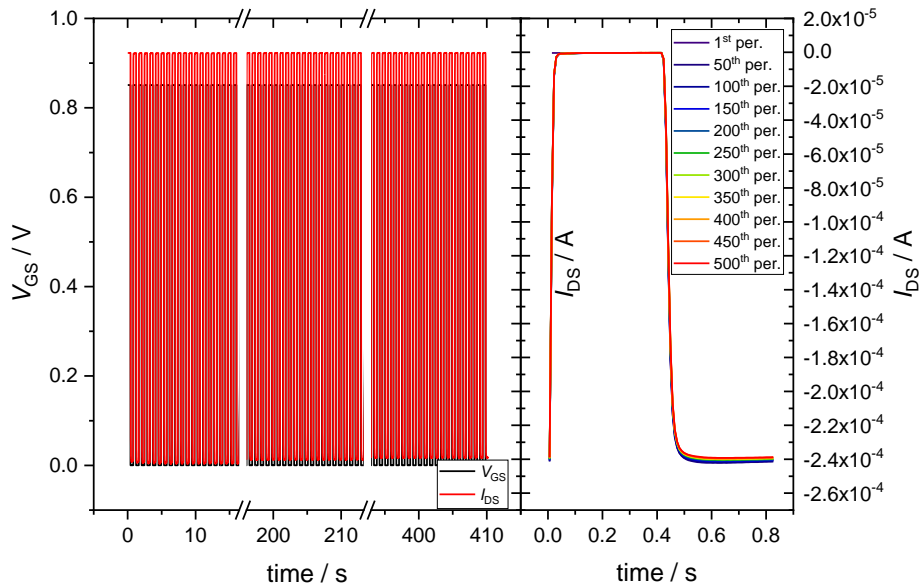


Obr. 66 Výsledky měření dynamických charakteristik s dvojitou polaritou řídicího napětí V_{GS} , celkový pohled (vlevo) a všechny periody proudu I_{DS} přes sebe (vpravo), OECT třetí generace s IL B4.

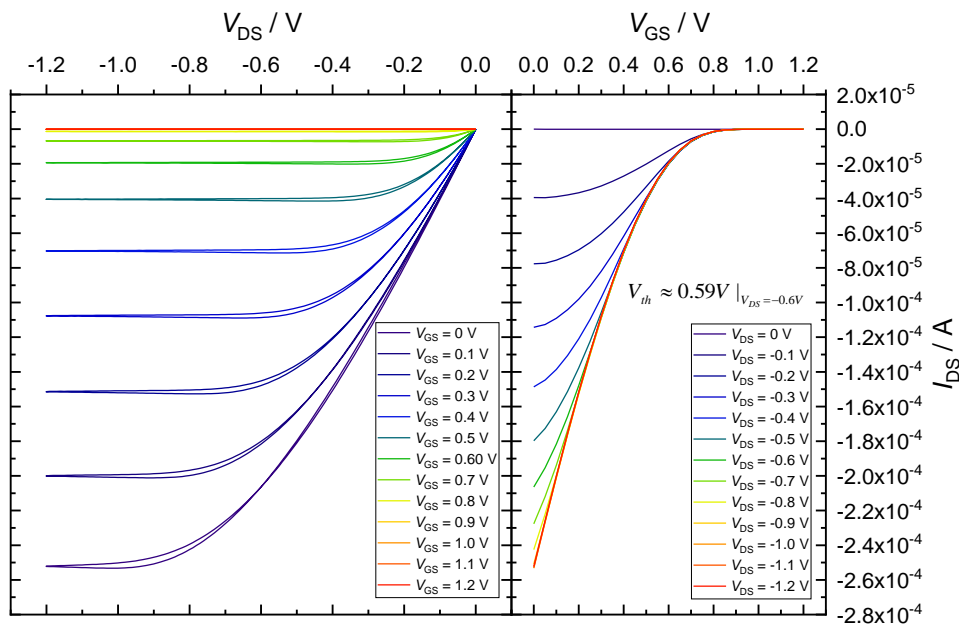
Optimalizace pracovních napětí

Rozsah pracovních napětí v této práci se vesměs pohyboval v rozmezí ± 1 V. Během všech prováděných experimentů docházelo po několika spínacích cyklech ke zvýšení odporu v otevřeném stavu vlivem šíření redoxní fronty a pravděpodobně i rychlejší degradaci materiálu PEDOT:PSS, který se používá jako materiál na kanál OECT. Ovšem jak se během měření ukázalo, volbou vhodných velikostí provozních napětí, lze dosáhnout výrazně většího počtu pracovních cyklů i zvýšení dynamiky celého tranzistoru. Bylo provedeno několik experimentů s cílem nalezení optimálního nastavení pracovních napětí, které by umožňovalo provoz tranzistoru řádově v tisících spínacích cyklech. Celý proces byl proveden opět s iontovou kapalinou B4, která vykazuje ze všech testovaných kapalin nejlepší výsledky. Výsledná pracovní napětí byla $V_{DS} = -6$ V, $V_{GS} = \langle 0; 0.85 \rangle$ V. Na Obr. 67 je výsledek měření s upraveným měřicím profilem. Provedeno bylo celkem 2100 spínacích cyklů. Kromě volby pracovních napětí se upravovala i délka periody, tedy frekvence spínání, která byla nastavena na hodnotu 1.2 Hz. Frekvence spínání má rovněž vliv na životnost OECT, neboť v případě vyšší frekvence spínání nedochází k takovému namáhání tranzistoru, což vede, v kombinaci s upravenými pracovními napětími, k výraznému zlepšení stability OECT. Výsledky měření výstupních charakteristik jsou na Obr. 68. Z nich byly odvozeny převodní charakteristiky, ze kterých se určilo prahové napětí $V_{th} \approx 0.59$ V. V Tab. 9 jsou shrnuty dosažené výsledky na tomto typu

OECT s IL B4. Z těchto dosažených výsledků je patrné, že úpravou měřicího profilu, resp. pracovních napětí, lze dosáhnout součástky se stabilními parametry i po několika tisících spínacích cyklů.



Obr. 67 Výsledky měření dynamických charakteristik s upraveným měřicím profilem ($V_{DS} = -6$ V, $V_{GS} = \langle 0; 0.85 \rangle$ V), celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B4. Cykly 1601 až 2100.



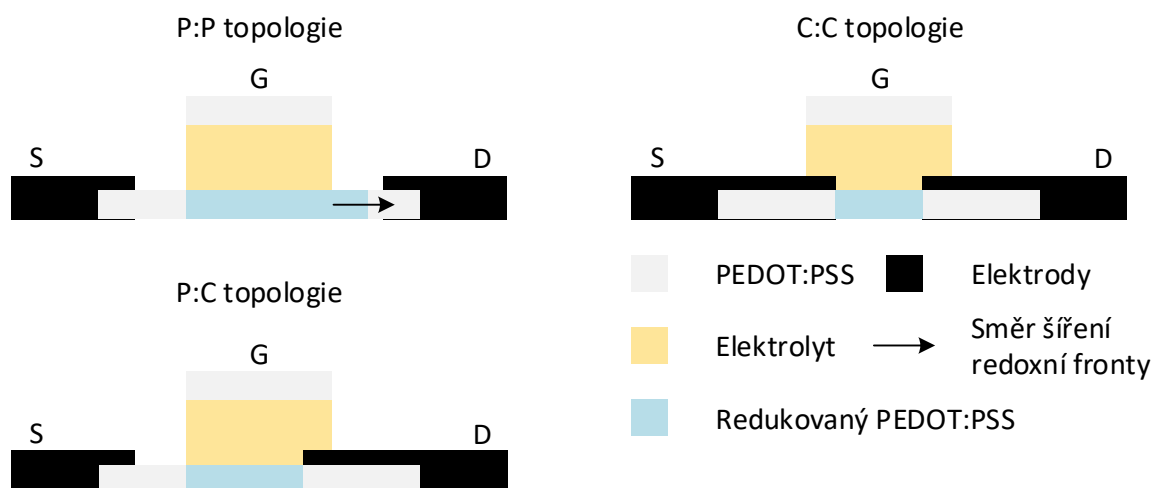
Obr. 68 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT třetí generace s IL B4.

Tab. 9 Změřené parametry třetí generace OECT s upraveným měřicím profilem.

Topologie	g_m (S)	- I_{DS} (A)			t (ms)	
		ON	OFF	I_{ON}/I_{OFF} (-)	ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
Laterální	$3.44 \cdot 10^{-4}$	$2.40 \cdot 10^{-4}$	$3.25 \cdot 10^{-7}$	740	14	32

Úprava topologie

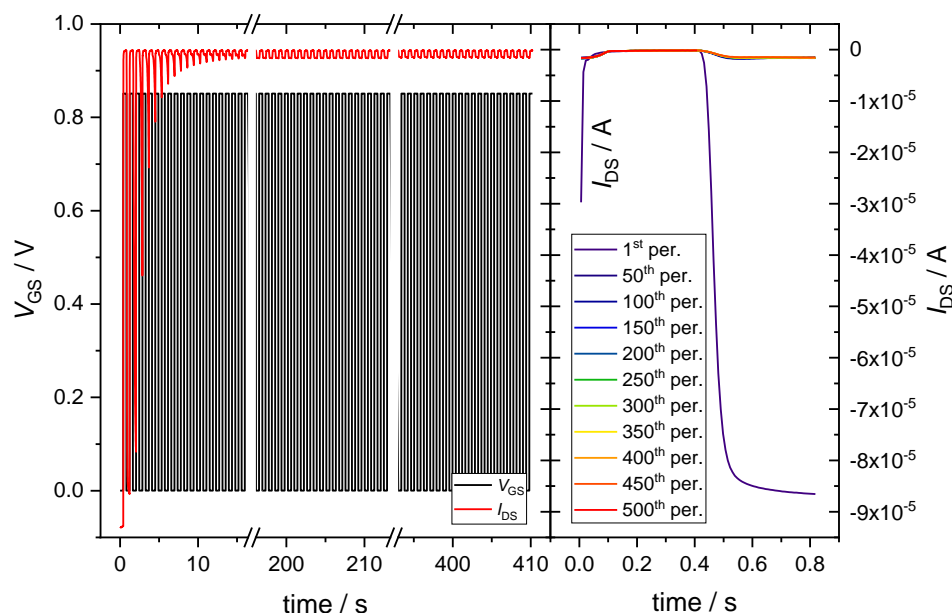
Metodou, jak omezit vliv redoxní fronty a přiblížit časy spínání a vypínání OECT je úprava topologie. Tento způsob byl poprvé použit v roce 2013 [40]. Konečné řešení bylo publikováno v roce 2017 [41]. V obou publikacích byla použita vertikální topologie. Poznamenejme, že tento přístup lze použít i v případě laterální topologie. Byly testovány tři typy topologie, viz Obr. 69. Princip úpravy spočívá v prodloužení kontaktních elektrod source a drain, čímž dojde ke zmenšení plochy kontaktu elektrolyt/kanál, ale zabrání se tím šíření redoxní fronty i za toto rozhraní. Současně s touto úpravou se sníží i celkový odpor kanálu v otevřeném stavu.



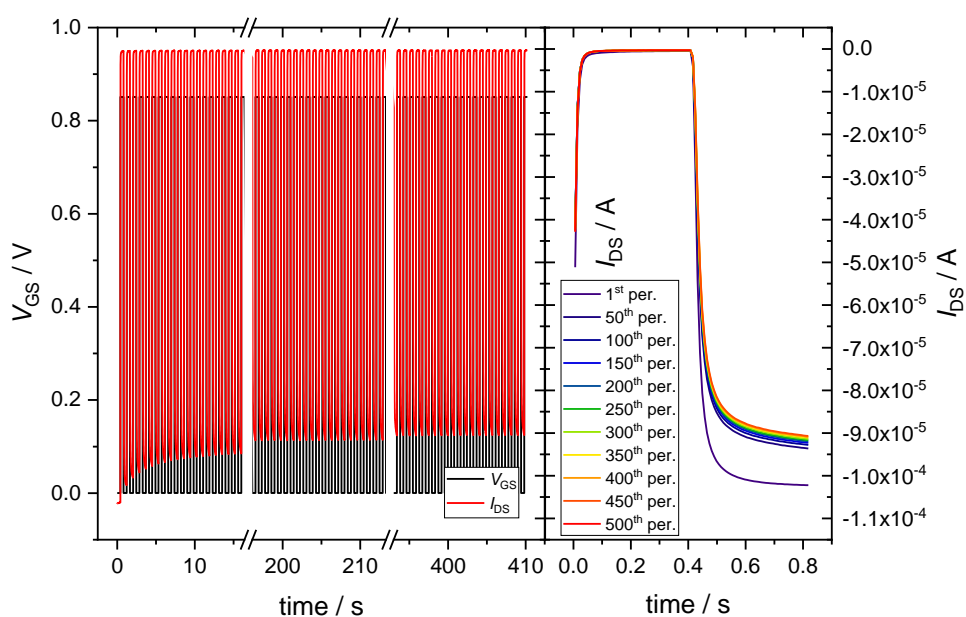
Obr. 69 Upravené topologie pro testování vlivu uspořádání kontaktních elektrod source a drain na omezení vlivu redoxní fronty. (Převzato z [40])

Na základě výše zmíněného postupu byla v našem případě navržena nová topologie OECT *Topo IV*, viz Obr. 33. Jedná se o laterální uspořádání elektrod s variantami P:P a P:C, viz Obr. 69. Varianta C:C nebyla použita z důvodů, že šíření redoxní fronty probíhá pouze směrem k záporně polarizované elektrodě. Tato varianta tak postrádá význam. Při návrhu topologie C:C si výše zmínění autoři ještě před samotným testováním omezili minimální proud ve vypnutém stavu, neboť tím, že elektrody source a drain jsou v přímém kontaktu s elektrolytem, vzniká paralelní cesta pro svodový proud, který může elektrolytem procházet v zavřeném stavu, což autoři komentují jako důvod menšího spínacího poměru v porovnání s topologií P:P. Připravené tranzistory byly podrobeny dynamickému měření (jako elektrolyt byla použita IL

B4). Na Obr. 70 jsou výsledky měření na topologii P:P, na Obr. 71 jsou výsledky měření na topologii P:C. Z výsledků je patrný vliv prodloužení drain elektrody blíže k rozhraní elektrolyt/kanál (Obr. 71), kdy sice stále dochází ke snižování proudu I_{DS} v otevřeném stavu, ale tranzistor dobře funguje i po 500 spínacích cyklech. Naopak tranzistor v uspořádání P:P během prvních 20-ti period spínání řídicího napětí V_{GS} přestává zcela spínat.



Obr. 70 Výsledky měření dynamických charakteristik OECT s uspořádáním elektrod P:P, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B4.



Obr. 71 Výsledky měření dynamických charakteristik OECT s uspořádáním elektrod P:C, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT třetí generace s IL B4.

Zhodnocení

Výše uvedené přístupy omezení vlivu redoxní fronty na funkci a stabilitu OECT je možné shrnout následovně. Přepínání polaritu řídicího napětí je funkční, ovšem nevýhodou je nutnost přepínat polaritu řídicího napětí. Úprava topologie OECT se jeví rovněž jako funkční způsob, jak jednak prodloužit životnost tranzistoru a zároveň, dle literatury, zkrátit dobu přechodu ze zavřeného, do otevřeného stavu tranzistoru, kde se projevuje nejvíce vliv redoxní fronty. Poslední zmíněná metoda, jak omezit vliv redoxní fronty na fungování OECT, která byla testována, je volba vhodných pracovních napětí a rychlost spínání řídicího napětí. Na základě dosažených výsledků se jeví tato metoda jako nejúčinnější a navíc nevyžaduje žádnou změnu polarit napětí, či změnu topologie OECT.

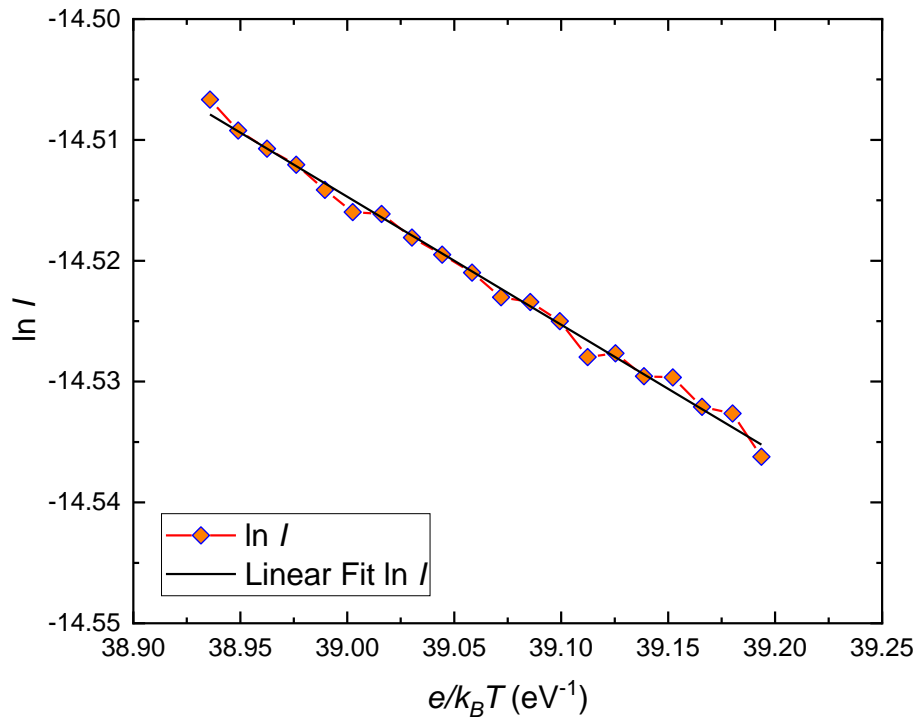
5.3 Vliv teploty na stejnosměrný proud I_{DS}

K měření byl použit OECT s IL A1. Teplotní závislost proud I_{DS} a závislost aktivační energie na napětí V_{DS} (pro napětí V_{GS} byly zvoleny dvě hodnoty, $V_{GS} = 0.5$ V, zavřený tranzistor; $V_{GS} = -0.5$ V, otevřený tranzistor) byly měřeny v rozsahu teplot 20-33 °C. Proud I_{DS} byl teplotně aktivovaný, a jeho závislost splňuje Arrheniovu rovnici (18).

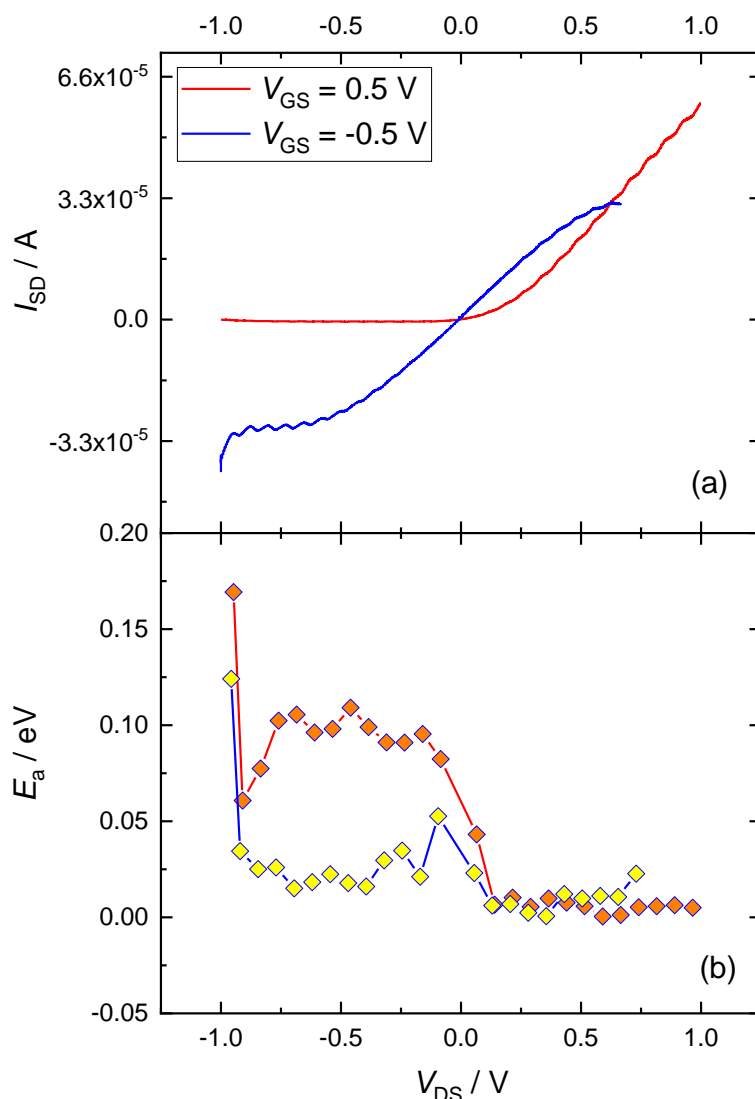
$$I_{DS} = I_0 \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right), \quad (18)$$

kde I_{DS} je elektrický proud, I_0 před-exponenciální faktor, k_B je Boltzmannova konstanta a T je teplota. Aktivační energie byla určena na základě Arrheniovy závislosti na Obr. 72, je prezentována platnost Arrheniovy rovnice. Hodnota aktivační energie byla určena jako $E_A = 0.11$ eV pro tranzistor v zavřeném stavu ($V_{GS} > 0$ V). Diskutujeme fakta prezentovaná na Obr. 73. Obr. 73 a) znázorňuje volt-ampérovou charakteristiku pro řídicí napětí $V_{GS} = -0.5$ V, tj. tranzistor je v otevřeném stavu. Charakteristika je kvazi-lineární v oblasti $V_{DS} = (-0.5 \div 0.5$ V), což svědčí o odporovém charakteru kontaktů. Přiložením kladného V_{GS} napětí (0.5 V, červená křivka) se transistor zavírá, spínací efekt je zřetelný ve třetím kvadrantu. V prvním kvadrantu je proud ohmický. To svědčí o tom, že kladné injektované ionty jsou rozloženy nejen v objemu kanálu, ale vytvářejí u kontaktu energetickou bariéru. Tato skutečnost se promítá i do aktivačních energií proudu. Je-li tranzistor zavřený (V_{GS} je kladné, viz červená křivka na Obr. 73 b), aktivační energie proudu I_{DS} je 0.11 eV, je-li tranzistor otevřený (V_{DS} je kladné) aktivační energie klesá na hodnotu 0.0025 eV (kT). V otevřeném režimu tranzistoru (modré křivky na Obr. 73) je hodnota aktivační energie 0.02 eV pro záporné V_{DS} napětí a ≈ 0.0025 eV pro kladné V_{DS} napětí. Rozdíl hodnot 0.02 eV a 0.0025 eV přisuzujeme zbytkové koncentraci iontů

v objemu kanálu po expozici kladným napětím V_{GS} . Nezávislost aktivačních energií na napětí můžeme přisoudit faktu, že elektrické efekty v tranzistoru jsou řízeny pouze lineárními procesy.



Obr. 72 Arrheniova závislost proudu I_{DS} pro OECT s IL A1, ze sklonu závislosti byla stanovena aktivační energie $E_A = 0.11$ eV.

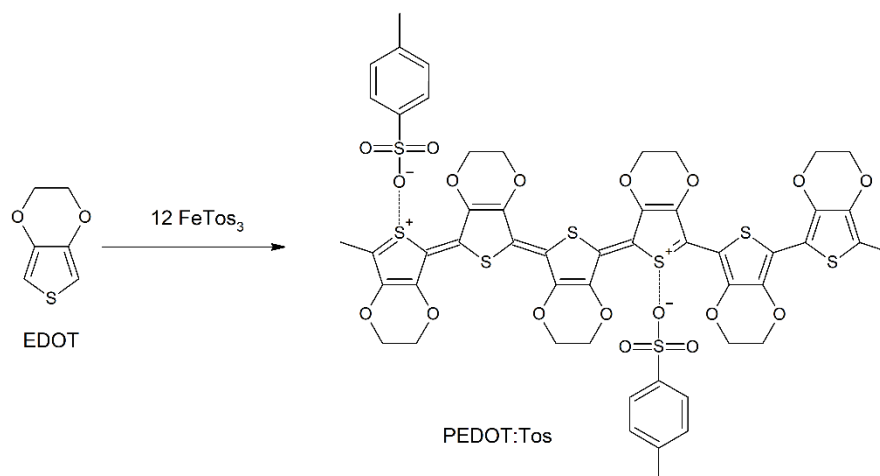


Obr. 73 (a) Výstupní charakteristiky OECT s IL Al pro dvě hodnoty řídicího napětí ($V_{GS} = 0.5$ V a $V_{GS} = -0.5$ V), (b) závislost aktivační energie OECT na napětí V_{DS} .

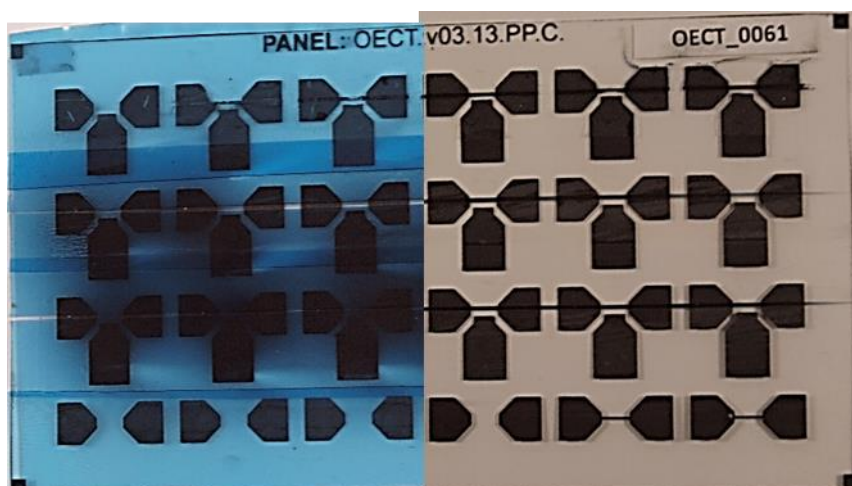
5.4 OECT – PEDOT:Tos

Nejčastěji se ve spojení s OECT používá jako materiál na kanál poly(3,4-ethylenedioxythiofen) dopovaný pomocí poly(styrenesulfonát) (PEDOT:PSS). Kromě tohoto materiálu se objevují publikace využívající PEDOT s jinými dopanty [57], polyanilin [59], ale také např. PEDOT:Tos [60, 94, 95]. PEDOT:Tos (tosylát) je hydrofobní materiál, na rozdíl od PEDOT:PSS [96]. Tato vlastnost je výhodná především při použití v běžných podmínkách, kde se může měnit vzdušná vlhkost a ovlivňovat tak chování výsledné součástky. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik měření OECT, kde byl jako materiál pro kanál použitý PEDOT:Tos. PEDOT:Tos byl připravený stejným způsobem popsáním v publikaci [96] (*in situ* polymerizace monomeru EDOT na PEDOT:Tos, viz Obr. 74).

Depozice ovšem neprobíhala odstředivým tiskem jako v uvedené publikaci, ale pomocí spreje na předem, pomocí pásky, definovaných substrátech s předtisknými uhlíkovými elektrodami (sítotisk), viz Obr. 75 (modifikovaná *Topo I*, viz Obr. 30).

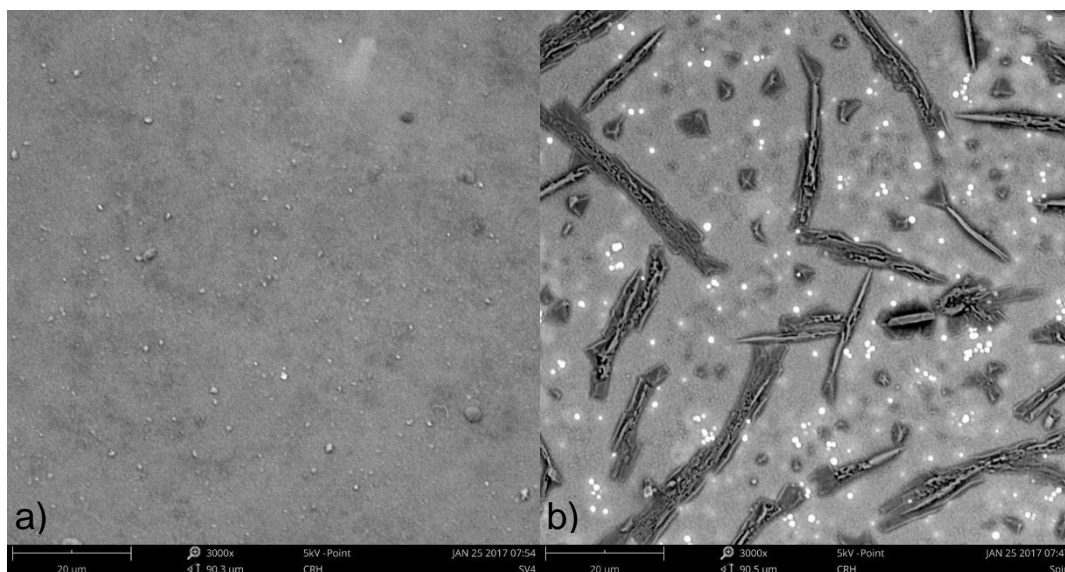


Obr. 74 Polymerizace monomeru EDOT na PEDOT:Tos. (Převzato z [96])



Obr. 75 Panel OECT s deponovaným PEDOT:Tos, nalevo ukázka vymaskování s deponovaným PEDOT:Tos, napravo OECT s PEDOT:Tos po odstranění masky.

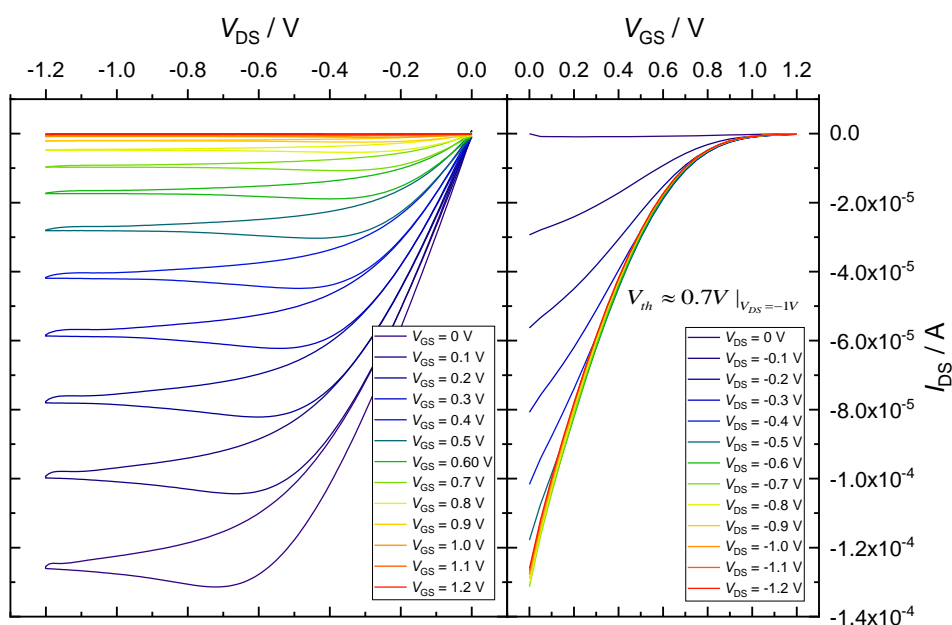
Vytištěná vrstva PEDOT:Tos byla podrobena optické inspekci na elektronovém mikroskopu a její povrch byl porovnán s vytištěnou vrstvou komerční sítotiskové formulace PEDOT:PSS, viz Obr. 76. Z tohoto porovnání je vidět nehomogenita povrchu vrstvy PEDOT:Tos, která je s největší pravděpodobností způsobena již během přípravy tiskové formulace, kdy nedochází k úplné dispergaci vstupního monomeru EDOT v použitém rozpouštědle. Na rozdíl od toho je vrstva PEDOT:PSS dle Obr. 76 a) téměř homogenní s minimem nehomogenit ve snímané ploše.



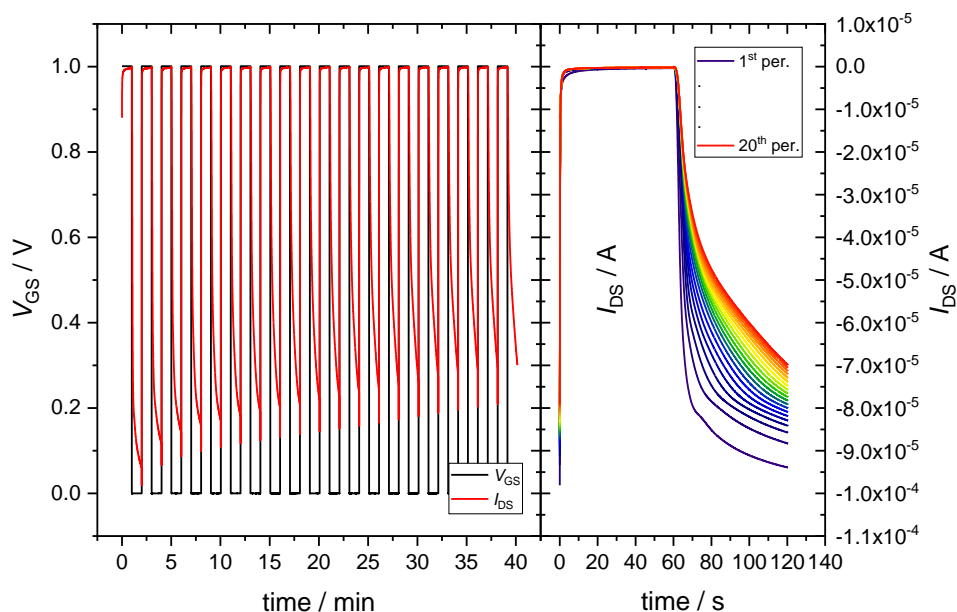
Obr. 76 Snímek povrchu vytištěné vrstvy komerční formulace PEDOT:PSS pomocí sitotisku (a) a in situ polymerizovaného PEDOT:Tos pomocí spreje (b) při zvětšení 3000x.

Tab. 10 Změřené parametry třetí generace OECT s PEDOT:Tos a IL B4.

		- I_{DS} (A)			t (s)	
Topologie	g_m (S)	ON	OFF	I_{ON}/I_{OFF} (-)	ON \rightarrow OFF	OFF \rightarrow ON
Laterální	$2.10 \cdot 10^{-4}$	$7.85 \cdot 10^{-5}$	$2.42 \cdot 10^{-7}$	325	0.8	34



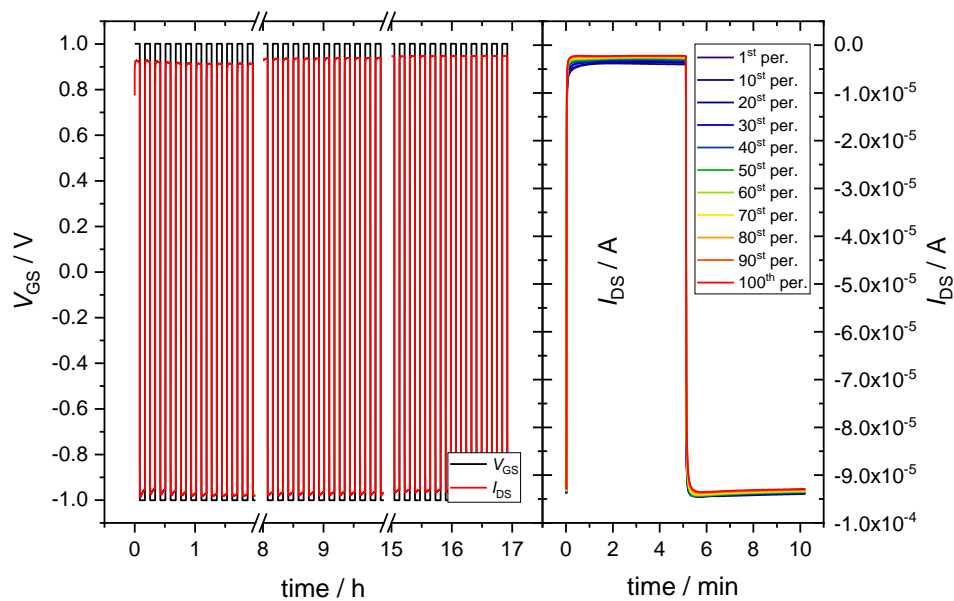
Obr. 77 Výsledky měření výstupních charakteristik (vlevo) a z nich odvozených převodních charakteristik (vpravo) OECT s PEDOT:Tos a IL B4.



Obr. 78 Výsledky měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro 20 pulzů proudu I_{DS} (vpravo), OECT s PEDOT:Tos a IL B4.

Zhodnocení

Na základě výsledků provedených měření je možné říci, že organický polymer PEDOT:Tos lze použít ve spojení s OECT jako alternativu k nejvíce používanému PEDOT:PSS. Z naměřených dat je patrné, že i u tohoto materiálu se projevuje efekt šíření redox fronty, kdy postupem času dochází k omezení funkce OECT. Nicméně bylo provedeno další měření, kdy se využila jedna z technik omezení vlivu redoxní fronty, konkrétně šlo o přepínání polarity řídicího napětí V_{GS} , což vedlo k výraznému potlačení tohoto efektu, viz Obr. 79. Tento výsledek ukazuje velice dobrou stabilitu během celého měření, které trvalo 17 hodin, ovšem je nutné uvést, že spínací poměr byl ≈ 30 a časy vypnutí a sepnutí byly 1.3 minuty, resp. 2 minuty.



Obr. 79 Výsledky 17 hodin trvajícího měření dynamických charakteristik, celkový pohled (vlevo) a kinetické křivky pro vybrané pulzy proudu I_{DS} (vpravo), OECT s PEDOT:Tos a IL B4. Využito přepínání polarity řídicího napětí V_{GS} pro omezení vlivu redoxní fronty.

6 Závěr

Hlavním tématem předkládané disertační práce je organický elektrochemický tranzistor. Konkrétně se práce věnuje optimalizaci jeho charakteristik volbou vhodných elektrolytů a provozních podmínek s cílem dosáhnout dostatečně rychlou a stabilní součástku s výhledem na možné využití ve větších funkčních celcích.

Práce je rozdělena na dva větší celky. První teoretická část práce se věnuje organickým vodivým polymerům, materiálům, které umožnily vznik a velký rozvoj organické elektroniky. Jsou vysvětleny základní principy vodivosti, přenosu náboje a zvyšování vodivosti pomocí dopování. Dále pak úvodu do problematiky organických elektrochemických tranzistorů. Jsou vysvětleny základní principy funkce, možná topologická uspořádání a v neposlední řadě jsou zde uvedeny i materiály, které je možné použít pro výrobu tohoto typu tranzistorů. Závěr 3. kapitoly je rešeršního charakteru a strnuje závěry z dostupných publikačních zdrojů věnujících se problematice organických elektrochemických tranzistorů. Dále již pokračuje experimentální část práce, kde 4. kapitola shrnuje výsledky počátečních experimentů provedených na první a druhé generaci organických elektrochemických tranzistorů, kdy šlo především o ověření funkce. Na tuto kapitolu navazuje poslední kapitola obsahující klíčové poznatky a výsledky získané na třetí generaci organických elektrochemických tranzistorů, které směřovaly k návrhu dostatečně rychlé a stabilní součástky založené na bázi organických vodivých materiálů.

Cíle disertační práce byly následující:

1. Ověření vlivu elektrolytu na chování OECT

V rámci tohoto cíle byla otestována celá řada elektrolytů. Jednalo se jak o tuhé, tak i kapalně elektrolyty. V počáteční fázi práce byl testován tuhý elektrolyt. Ten splňoval požadavek na dostatečnou velikost spínacího poměru, když jeho velikost byla v řádech tisíců (maximální 5900), ale rychlost spínání v jednotkách sekund byla nedostatečná. Tento efekt byl způsoben malou pohyblivostí iontů v tuhém elektrolytu. Z tohoto důvodu se zvolily iontové kapaliny jako elektrolyty pro OECT. Byla otestována celá řada iontových kapalin s různými kationty i anionty, celkem bylo testováno 15 iontových kapalin v kombinaci s třetí generací OECT. Na základě dosažených výsledků se jako nejvhodnější elektrolyt pro OECT jeví iontová kapalina 1-Butyl-3-

methyylimidazolium trifluoromethanesulfonát, se kterou bylo provedeno na základě vykazovaných výsledků i nejvíce testů.

2. Stabilizace vlastností a studium procesů probíhajících v OECT

Během samotných měření i na základě dostupných publikací se vyskytoval problém se stabilitou a spolehlivostí fungování OECT. Tento efekt byl pojmenován jako šíření redoxní fronty. Tento efekt ovlivňuje celkové chování OECT. Omezuje proud v *ON* stavu a snižuje rychlost opětovného spínání z *OFF* stavu, což v konečném důsledku má za následek snižování spínacího poměru a zpomalování spínání a vypínání OECT. Omezení tohoto efektu bylo tedy věnováno velké úsilí a bylo vyzkoušeno několik postupů, jak jej omezit. Na základě provedených experimentů a získaných výsledků bylo upraveno provozní napětí a také frekvence spínání, což mělo za následek zlepšení stability OECT. Bylo dosaženo spínání v řádu jednotek tisíc spínacích cyklů bez výrazné degradace sledovaných parametrů (spínací časy a poměr). Kromě výše zmíněného se podařilo upřesnit popis chování OECT zavedením tzv. rozptylového α parametru, který do popisu odezvy proudu I_{DS} zavádí i vliv redoxní fronty, která mění tvar kinetických proudových křivek.

3. Další materiály pro OECT

Vzhledem k dostupnosti sítotiskových, ale i jiných, formulací polymeru poly(3,4-ethylenedioxythiofenu) (PEDOT) dopovaného pomocí poly(styrensulfonátu) (PSS) byl tento materiál použit jako materiál pro kanál pro většinu studovaných tranzistorů. Nicméně existuje celá řada jiných polymerních materiálů, které by dle teoretických předpokladů měly vykazovat stejnou schopnost měnit svoji vodivost v závislosti na míře dopování vlivem přiloženého řídicího napětí V_{GS} . Za tímto účelem bylo provedeno několik měření *in situ* polymerizovaným materiálem poly(3,4-ethylenedioxythiofenem) dopovaným tosylátem železitým (PEDOT:Tos). Z dosažených výsledků je patrné, že i tento materiál je možné používat jako materiál pro kanál OECT.

Nad rámec výše zmíněných cílů bylo ještě provedeno měření vlivu teploty na stejnosměrný proud kanálem I_{DS} . Bylo dokázáno, že proud I_{DS} je teplotně aktivovaný, a jeho závislost splňuje Arrheniovu rovnici.

Na základě všech výše zmíněných skutečností se podařilo s využitím optimalizace pracovních napětí a volbou vhodného elektrolytu vytvořit organický elektrochemický tranzistor, který při rychlostech vypínání a zapínání, 14ms, respektive 32 ms, dobře funguje i po 2100 spínacích cyklech se spínacím poměrem ≈ 740 . Nicméně bylo dosaženo i vypínacího času 7 ms. Těchto výsledků bylo dosaženo na OECT s materiálem kanálu poly(3,4-ethylenedioxythiofenem):poly(styrensulfonátem) a iontovou kapalinou 1-Butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonátem použitou jako elektrolyt. Tato kombinace vykazuje nejlepší výsledky ze všech testovaných kombinací. Z pohledu srovnání dosažených výsledků s ostatními výzkumnými týmy po světě se jedná o srovnatelné výsledky ($t_{\text{OFF}} = 5$ ms, $t_{\text{ON}} = 20$ ms [45]), ale je potřeba zmínit, že těchto výsledků bylo dosaženo na OECT ve vertikální topologii, která je z pohledu rychlosti spínání výhodnější. Lze tedy očekávat, že pokud by jako další krok následoval přechod na vertikální topologii, mělo by dojít ke zlepšení všech sledovaných parametrů. Nicméně, planární topologie je výhodnější z hlediska tištěného tranzistoru.

Literatura

- [1] SHIRAKAWA, Hideki, Edwin J. LOUIS, Alan G. MACDIARMID, Chwan K. CHIANG a Alan J. HEEGER. *Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x* [online]. 1977. ISBN 0022-4936. Dostupné z: doi:10.1039/c39770000578
- [2] WHITE, Henry S., Gregg P. KITTLESEN a Mark S. WRIGHTON. Chemical derivatization of an array of three gold microelectrodes with polypyrrole: fabrication of a molecule-based transistor. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1984, **106**(18), 5375–5377. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja00330a070
- [3] KAR, Pradip. *Doping in Conjugated Polymers* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. ISBN 9781118816639. Dostupné z: doi:10.1002/9781118816639
- [4] UGUR, Asli, Ferhat KATMIS, Mingda LI, Lijun WU, Yimei ZHU, Kripa K. VARANASI a Karen K. GLEASON. Low-Dimensional Conduction Mechanisms in Highly Conductive and Transparent Conjugated Polymers. *Advanced Materials* [online]. 2015, **27**(31), 4604–4610. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201502340
- [5] SALANECK, W. R., I LUNDSTRÖM a Bengt G. RÅNBY. *Conjugated polymers and related materials: the interconnection of chemical and electronic structure : proceedings of the Eighty-first Nobel Symposium*. Oxford, New York: Oxford; University Press, 1993. ISBN 0198557299.
- [6] NEŠPŮREK, Stanislav a Miloš MATYÁŠ. Elektroaktivní organické materiály [online]. 2006, **51**(1), 31–50. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/141298>
- [7] ZIADAN, Kareema Majeed. Conducting Polymers Application. *New Polymers for Special Applications* [online]. 2012, **Chapter 1**, 3–24. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.5772/48316
- [8] ELSCHNER, Andreas, Stephan KIRCHMEYER, Wilfried LÖVENICH, Udo MERKER a Knud REUTER. *PEDOT: Principles and Applications of an Intrinsically Conductive Polymer* [online]. Hoboken, N.J.: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-6912-9. Dostupné z: doi:10.1201/b10318
- [9] BREDAS, Jean Luc a G. Bryan STREET. Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research* [online]. 1985, **18**(10), 309–315. ISSN 0001-4842. Dostupné z: doi:10.1021/ar00118a005
- [10] NILSSON, David. *An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic*. B.m., 2005. b.n.
- [11] HEEGER, Alan J. Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials. *Reviews of Modern Physics* [online]. 2001, **73**(3), 681–700. ISSN 0034-6861. Dostupné z: doi:10.1103/RevModPhys.73.681
- [12] HOROWITZ, G., R. HAJLAOUI, R. BOURGUIGA a M. HAJLAOUI. Theory of the organic field-effect transistor. *Synthetic Metals* [online]. 1999, **101**(1–3), 401–404. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-6779(98)00313-0
- [13] BRAGA, Daniele a Gilles HOROWITZ. High-Performance Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(14–15), 1473–1486. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200802733
- [14] KIM, Chang-Hyun, Yvan BONNASSIEUX a Gilles HOROWITZ. Compact DC Modeling of Organic Field-Effect Transistors: Review and Perspectives. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2014, **61**(2), 278–287 [vid. 2018-08-03]. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2013.2281054
- [15] WANG, Cheng-Yin, Canek FUENTES-HERNANDEZ, Wen-Fang CHOU a Bernard KIPPELEN. Top-gate organic field-effect transistors fabricated on paper with high operational stability. *Organic Electronics* [online]. 2017, **41**, 340–344 [vid. 2018-08-03]. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2016.11.026

- [16] CHAIDOGIANNOS, G., F. PETRAKI, N. GLEZOS, S. KENNOU a S. NEŠPŮREK. Soluble substituted phthalocyanines for OFET applications. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 2008, **152**(1–3), 105–108. ISSN 09215107. Dostupné z: doi:10.1016/j.mseb.2008.06.025
- [17] AL NAIM, Abdullah, Adam HOBSON, Richard T. GRANT, Antonis DRAGONEAS, Mark HAMPTON, Chris DUNSCOMBE, Tim RICHARDSON, J. Emyr MACDONALD a Martin GRELL. Water-gated organic nanowire transistors. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2013, **14**(4), 1057–1063. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2013.01.024
- [18] ZHANG, Qiaoming, Francesca LEONARDI, Stefano CASALINI, Inés TEMIÑO a Marta MASTORRENT. High performing solution-coated electrolyte-gated organic field-effect transistors for aqueous media operation. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1), 39623. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep39623
- [19] CHO, J. H., Jiyoul LEE, Yiyong HE, B. S. KIM, T. P. LODGE a C. D. FRISBIE. High-Capacitance Ion Gel Gate Dielectrics with Faster Polarization Response Times for Organic Thin Film Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2008, **20**(4), 686–690. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200701069
- [20] HAMEDI, Mahiar, Lars HERLOGSSON, Xavier CRISPIN, Rebeca MARCILLA, Magnus BERGGREN a Olle INGANÄS. Fiber-Embedded Electrolyte-Gated Field-Effect Transistors for e-Textiles. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(5), 573–577. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200802681
- [21] XIA, Yu, Jeongho CHO, Bryan PAULSEN, C. Daniel FRISBIE a Michael J. RENN. Correlation of on-state conductance with referenced electrochemical potential in ion gel gated polymer transistors. *Applied Physics Letters* [online]. 2009, **94**(1), 92–95. ISSN 00036951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3058694
- [22] THIEMANN, S., S. J. SACHNOV, M. GRUBER, F. GANNOTT, S. SPALLEK, M. SCHWEIGER, J. KRÜCKEL, J. KASCHTA, E. SPIECKER, P. WASSERSCHIED a J. ZAUMSEIL. Spray-coatable ionogels based on silane-ionic liquids for low voltage, flexible, electrolyte-gated organic transistors. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2014, **2**(13), 2423 [vid. 2015-03-28]. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/c3tc32465f
- [23] KERGOAT, Loïg, Benoît PIRO, Magnus BERGGREN, Gilles HOROWITZ a Minh Chau PHAM. Advances in organic transistor-based biosensors: From organic electrochemical transistors to electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* [online]. 2012, **402**(5), 1813–1826. ISSN 16182642. Dostupné z: doi:10.1007/s00216-011-5363-y
- [24] RIVNAY, Jonathan, Sahika INAL, Alberto SALLES, Róisín M. OWENS, Magnus BERGGREN a George G. MALLIARAS. Organic electrochemical transistors. *Nature Reviews Materials* [online]. 2018, **3**(2), 17086. ISSN 2058-8437. Dostupné z: doi:10.1038/natrevmats.2017.86
- [25] WANG, Yuedan, Xing QING, Quan ZHOU, Yang ZHANG, Qiongzhen LIU, Ke LIU, Wenwen WANG, Mufang LI, Zhentan LU, Yuanli CHEN a Dong WANG. The woven fiber organic electrochemical transistors based on polypyrrole nanowires/reduced graphene oxide composites for glucose sensing. *Biosensors and Bioelectronics* [online]. 2017, **95**(March), 138–145. ISSN 09565663. Dostupné z: doi:10.1016/j.bios.2017.04.018
- [26] KHODAGHOLY, Dion, Jonathan RIVNAY, Michele SESSOLO, Moshe GURFINKEL, Pierre LELEUX, Leslie H. JIMISON, Eleni STAVRINIDOU, Thierry HERVE, Sébastien SANAUR, Róisín M. OWENS a George G. MALLIARAS. High transconductance organic electrochemical transistors. *Nature communications* [online]. 2013, **4**, 2133. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms3133

-
- [27] AFONSO, Mónica, Jorge MORGADO a Luís ALCÁCER. Inkjet printed organic electrochemical transistors with highly conducting polymer electrolytes. *Journal of Applied Physics* [online]. 2016, **120**(16), 165502. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4966651
- [28] HUTTER, Philipp C., Thomas ROTHLANDER, Gregor SCHEIPL a Barbara STADLOBER. All Screen-Printed Logic Gates Based on Organic Electrochemical Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2015, **62**(12), 4231–4236. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2015.2491342
- [29] GUALANDI, I., M. MARZOCCHI, A. ACHILLI, D. CAVEDALE, A. BONFIGLIO a B. FRABONI. Textile Organic Electrochemical Transistors as a Platform for Wearable Biosensors. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1), 33637. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep33637
- [30] KHODAGHOLY, Dion, Thomas DOUBLET, Pascale QUILICHINI, Moshe GURFINKEL, Pierre LELEUX, Antoine GHESTEM, Esma ISMAILOVA, Thierry HERVÉ, Sébastien SANAUR, Christophe BERNARD a George G. MALLIARAS. In vivo recordings of brain activity using organic transistors. *Nature communications* [online]. 2013, **4**, 1575 [vid. 2014-07-15]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms2573
- [31] KAWAHARA, Jun, Peter ANDERSSON ERSMAN, David NILSSON, Kazuya KATOH, Yasukazu NAKATA, Mats SANDBERG, Marie NILSSON, Göran GUSTAFSSON a Magnus BERGGREN. Flexible active matrix addressed displays manufactured by printing and coating techniques. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* [online]. 2013, **51**(4), 265–271. ISSN 08876266. Dostupné z: doi:10.1002/polb.23213
- [32] KLAUK, Hagen. *Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications* [online]. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. ISBN 9783527608751. Dostupné z: doi:10.1002/3527608753
- [33] CHO, Jeong Ho, Jiyoul LEE, Yu XIA, BongSoo KIM, Yiyong HE, Michael J. RENN, Timothy P. LODGE a C. DANIEL FRISBIE. Printable ion-gel gate dielectrics for low-voltage polymer thin-film transistors on plastic. *Nature Materials* [online]. 2008, **7**(11), 900–906. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat2291
- [34] ROTHLANDER, Thomas, Philipp C. HUTTER, Elisabeth RENNER, Herbert GOLD, Anja HAASE a Barbara STADLOBER. Nanoimprint lithography-structured organic electrochemical transistors and logic circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2014, **61**(5), 1515–1519. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2014.2312986
- [35] MABECK, Jeffrey T., John a. DEFRANCO, Daniel a. BERNARDS, George G. MALLIARAS, Sandrine HOCĎ a Christopher J. CHASE. Microfluidic gating of an organic electrochemical transistor. *Applied Physics Letters* [online]. 2005, **87**(1), 1–4. ISSN 00036951. Dostupné z: doi:10.1063/1.1991979
- [36] BERNARDS, D. A. a George G. MALLIARAS. Steady-State and Transient Behavior of Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Functional Materials* [online]. 2007, **17**(17), 3538–3544. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.200601239
- [37] SZYMANSKI, Marek Zdzislaw, Deyu TU a Robert FORCHHEIMER. 2-D Drift-Diffusion Simulation of Organic Electrochemical Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2017, **In press**, 1–7. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2017.2757766
- [38] ANDERSSON, Peter, Robert FORCHHEIMER, Payman TEHRANI a Magnus BERGGREN. Printable all-organic electrochromic active-matrix displays. *Advanced Functional Materials* [online]. 2007, **17**(16), 3074–3082. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.200601241
- [39] KUMAR, Prajwal, Zhihui YI, Shiming ZHANG, Arvinh SEKAR, Francesca SOAVI a Fabio CICOIRA. Effect of channel thickness, electrolyte ions, and dissolved oxygen on the performance of organic electrochemical transistors. *Applied Physics Letters* [online]. 2015, **107**(5), 053303. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.4927595
-

- [40] ANDERSSON ERSMAN, Peter, David NILSSON, Jun KAWAHARA, Göran GUSTAFSSON a Magnus BERGGREN. Fast-switching all-printed organic electrochemical transistors. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2013, **14**(5), 1276–1280. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2013.02.027
- [41] ANDERSSON ERSMAN, Peter, David WESTERBERG, Deyu TU, Marie NILSSON, Jessica ÅHLIN, Annelie EVEBORN, Axel LAGERLÖF, David NILSSON, Mats SANDBERG, Petronella NORBERG, Magnus BERGGREN, Robert FORCHHEIMER a Göran GUSTAFSSON. Screen printed digital circuits based on vertical organic electrochemical transistors. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, **2**(4), 045008. ISSN 2058-8585. Dostupné z: doi:10.1088/2058-8585/aa903a
- [42] GUALANDI, I., M. MARZOCCHI, E. SCAVETTA, M. CALIENNI, A. BONFIGLIO a B. FRABONI. A simple all-PEDOT:PSS electrochemical transistor for ascorbic acid sensing. *J. Mater. Chem. B* [online]. 2015, **3**(33), 6753–6762. ISSN 2050-750X. Dostupné z: doi:10.1039/C5TB00916B
- [43] NILSSON, David, Robert FORCHHEIMER, Magnus BERGGREN a Nathaniel ROBINSON. The electrochemical transistor and circuit design considerations. *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design* [online]. 2005, **3**, 349–352. Dostupné z: doi:10.1109/ECCTD.2005.1523132
- [44] HAVENER, Robin, John BOYEA, Evan MALONE, Daniel BERNARDS a John DEFRANCO. Freeform Fabrication of Organic Electrochemical Transistors. *Proceedings of the 18th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin TX*. 2007, **1**(1), 14.
- [45] KAWAHARA, Jun, Peter Andersson ERSMAN, Kazuya KATOH a Magnus BERGGREN. Fast-switching printed organic electrochemical transistors including electronic vias through plastic and paper substrates. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2013, **60**(6), 2052–2056. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2013.2258923
- [46] MANNERBRO, Richard, Martin RANLÖF, Nathaniel ROBINSON a Robert FORCHHEIMER. Inkjet printed electrochemical organic electronics. *Synthetic Metals* [online]. 2008, **158**(13), 556–560. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/j.synthmet.2008.03.030
- [47] TAO, Xuyuan, Vladan KONCAR a Claude DUFOUR. Geometry Pattern for the Wire Organic Electrochemical Textile Transistor. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2011, **158**(5), H572. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.3562962
- [48] BATTISTA, Edmondo, Vincenzo LETTERA, Marco VILLANI, Davide CALESTANI, Francesco GENTILE, Paolo Antonio NETTI, Salvatore IANNOTTA, Andrea ZAPPETTINI a Nicola COPPEDÈ. Enzymatic sensing with laccase-functionalized textile organic biosensors. *Organic Electronics* [online]. 2017, **40**, 51–57. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2016.10.037
- [49] MÜLLER, Christian, Mahiar HAMED, Roger KARLSSON, Ronnie JANSSON, Rebeca MARCILLA a My HEDHAMMAR. Woven electrochemical transistors on silk fibers. *Advanced Materials* [online]. 2011, **23**(7), 898–901 [vid. 2015-02-20]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201003601
- [50] RYU, Gi Sung, Seung Hyeon JEONG, Byoung Chul PARK, Beob PARK a Chung Kun SONG. Fabrication of organic thin film transistors on Polyethylene Terephthalate (PET) fabric substrates. *Organic Electronics* [online]. 2014, **15**(7), 1672–1677. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2014.03.019
- [51] LOUWET, F., L. GROENENDAAL, J. DHAEN, J. MANCA, J. VAN LUPPEN, E. VERDONCK a L. LEENDERS. PEDOT/PSS: Synthesis, characterization, properties and applications. *Synthetic Metals* [online]. 2003, **135–136**, 115–117. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-6779(02)00518-0

- [52] STÖCKER, Thomas, Anna KÖHLER a Ralf MOOS. Why does the electrical conductivity in PEDOT:PSS decrease with PSS content? A study combining thermoelectric measurements with impedance spectroscopy. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* [online]. 2012, **50**(14), 976–983. ISSN 08876266. Dostupné z: doi:10.1002/polb.23089
- [53] KIM, J. Y., J. H. JUNG, D. E. LEE a J. JOO. Enhancement of electrical conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) by a change of solvents. *Synthetic Metals* [online]. 2002, **126**(2–3), 311–316. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-6779(01)00576-8
- [54] BRAGA, Daniele, Nicholas C. ERICKSON, Michael J. RENN, Russell J. HOLMES a C. Daniel FRISBIE. High-transconductance organic thin-film electrochemical transistors for driving low-voltage red-green-blue active matrix organic light-emitting devices. *Advanced Functional Materials* [online]. 2012, **22**(8), 1623–1631. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201102075
- [55] PANZER, Matthew J. a C. Daniel FRISBIE. Exploiting Ionic Coupling in Electronic Devices: Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2008, **20**(16), 3177–3180 [vid. 2015-03-28]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200800617
- [56] PRETL, Silvan, Michael KROUPA, Ales HAMACEK, Tomas DZUGAN, Jan REBOUN a Jiri CENERY. Characterization of the organic field-effect transistor based on solution processed P3HT. In: *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010* [online]. B.m.: IEEE, 2010, s. 24–29. ISBN 978-1-4244-7849-1. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2010.5547249
- [57] ZEGLIO, Erica, Jens ERIKSSON, Roger GABRIELSSON, Niclas SOLIN a Olle INGAN?S. Highly Stable Conjugated Polyelectrolytes for Water-Based Hybrid Mode Electrochemical Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2017, **29**(19), 1605787. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201605787
- [58] INAL, Sahika, George G. MALLIARAS a Jonathan RIVNAY. Benchmarking organic mixed conductors for transistors. *Nature Communications* [online]. 2017, **8**(1), 1767. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-017-01812-w
- [59] PAUL, Elizabeth W., Antonio J. RICCO a Mark S. WRIGHTON. Resistance of polyaniline films as a function of electrochemical potential and the fabrication of polyaniline-based microelectronic devices. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 1985, **89**(8), 1441–1447. ISSN 0022-3654. Dostupné z: doi:10.1021/j100254a028
- [60] BOLIN, Maria H., Karl SVENNERSTEN, David NILSSON, Anurak SAWATDEE, Edwin W H JAGER, Agneta RICHTER-DAHLFORS a Magnus BERGGREN. Active Control of Epithelial Cell-Density Gradients Grown Along the Channel of an Organic Electrochemical Transistor. *Advanced Materials* [online]. 2009, **21**(43), 4379–4382. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200901191
- [61] LANGE, Ulrich a Vladimir M. MIRSKY. Integrated electrochemical transistor as a fast recoverable gas sensor. *Analytica Chimica Acta* [online]. 2011, **687**(1), 7–11. ISSN 00032670. Dostupné z: doi:10.1016/j.aca.2010.12.008
- [62] TARABELLA, Giuseppe, Clara SANTATO, Sang Yoon YANG, Salvatore IANNOTTA, George G. MALLIARAS a Fabio CICOIRA. Effect of the gate electrode on the response of organic electrochemical transistors. *Applied Physics Letters* [online]. 2010, **97**(12), 1–4. ISSN 00036951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3491216
- [63] GALIŃSKI, Maciej, Andrzej LEWANDOWSKI a Izabela STEPANIAK. Ionic liquids as electrolytes. *Electrochimica Acta* [online]. 2006, **51**(26), 5567–5580. ISSN 00134686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2006.03.016
- [64] HANDY, Scott T. *Ionic Liquids - Classes and Properties* [online]. B.m.: InTech, 2011. ISBN 978-953-307-634-8. Dostupné z: doi:10.5772/853

- [65] ARMAND, Michel, Frank ENDRES, Douglas R. MACFARLANE, Hiroyuki OHNO a Bruno SCROSATI. Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future. *Nature Materials* [online]. 2009, **8**(8), 621–629. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat2448
- [66] KUBERSKÝ, Ing Petr. *Využití organických sloučenin pro detekci chemických látek*. B.m., 2012. University of West Bohemia.
- [67] ZHANG, Meng, Peng LIN, Mo YANG a Feng YAN. Fabrication of organic electrochemical transistor arrays for biosensing. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects* [online]. 2013, **1830**(9), 4402–4406 [vid. 2015-01-06]. ISSN 03044165. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbagen.2012.08.029
- [68] PREZIOSI, V., M. BARRA, A. PERAZZO, G. TARABELLA, A. ROMEO, S. L. MARASSO, P. D'ANGELO, S. IANNOTTA, A. CASSINESE a S. GUIDO. Monitoring emulsion microstructure by using organic electrochemical transistors. *J. Mater. Chem. C* [online]. 2017, **5**(8), 2056–2065. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/C6TC05149A
- [69] TARABELLA, Giuseppe, Anna Giulia BALDUCCI, Nicola COPPEDÈ, Simone MARASSO, Pasquale D'ANGELO, Stefano BARBIERI, Matteo COCUZZA, Paolo COLOMBO, Fabio SONVICO, Roberto MOSCA a Salvatore IANNOTTA. Liposome sensing and monitoring by organic electrochemical transistors integrated in microfluidics. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects* [online]. 2013, **1830**(9), 4374–4380. ISSN 03044165. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbagen.2012.12.018
- [70] LELEUX, Pierre, Jonathan RIVNAY, Thomas LONJARET, Jean-Michel BADIÉ, Christian BÉNAR, Thierry HERVÉ, Patrick CHAUVEL a George G MALLIARAS. Organic electrochemical transistors for clinical applications. *Advanced healthcare materials* [online]. 2015, **4**(1), 142–7 [vid. 2015-02-12]. ISSN 2192-2659. Dostupné z: doi:10.1002/adhm.201400356
- [71] CAMPANA, Alessandra, Tobias CRAMER, Daniel T. SIMON, Magnus BERGGREN a Fabio BISCARINI. Electrocardiographic recording with conformable organic electrochemical transistor fabricated on resorbable bioscaffold. *Advanced Materials* [online]. 2014, **26**(23), 3874–3878. ISSN 15214095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201400263
- [72] RIVNAY, J., P. LELEUX, M. FERRO, M. SESSOLO, A. WILLIAMSON, D. A. KOUTSOURAS, D. KHODAGHOLY, M. RAMUZ, X. STRAKOSAS, R. M. OWENS, C. BENAR, J.-M. BADIÉ, C. BERNARD a G. G. MALLIARAS. High-performance transistors for bioelectronics through tuning of channel thickness. *Science Advances* [online]. 2015, **1**(4), e1400251–e1400251. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1400251
- [73] PAPPA, Anna-Maria, Vincenzo F. CURTO, Marcel BRAENDLEIN, Xenofon STRAKOSAS, Mary J. DONAHUE, Michel FIOCCHI, George G. MALLIARAS a Roisin M. OWENS. Organic Transistor Arrays Integrated with Finger-Powered Microfluidics for Multianalyte Saliva Testing. *Advanced Healthcare Materials* [online]. 2016, **5**(17), 2295–2302. ISSN 21922640. Dostupné z: doi:10.1002/adhm.201600494
- [74] YANG, Sang Y., John A. DEFRANCO, Yuri A. SYLVESTER, Thomas J. GOBERT, Daniel J. MACAYA, Róisín M. OWENS a George G. MALLIARAS. Integration of a surface-directed microfluidic system with an organic electrochemical transistor array for multi-analyte biosensors. *Lab Chip* [online]. 2009, **9**(5), 704–708. ISSN 1473-0197. Dostupné z: doi:10.1039/B811606G
- [75] KHODAGHOLY, Dion, Vincenzo F. CURTO, Kevin J. FRASER, Moshe GURFINKEL, Robert BYRNE, Dermot DIAMOND, George G. MALLIARAS, Fernando BENITO-LOPEZ a Roisin M. OWENS. Organic electrochemical transistor incorporating an ionogel as a solid state electrolyte for lactate sensing. *Journal of Materials Chemistry* [online]. 2012, **22**(10), 4440. ISSN 0959-9428. Dostupné z: doi:10.1039/c2jm15716k

- [76] SCHEIBLIN, Gaëtan, Abdelkader ALIANE, Romain COPPARD, Róisín M. OWENS, Pascal MAILLEY a George G. MALLIARAS. Fully printed metabolite sensor using organic electrochemical transistor. *SPIE Organic Photonics + Electronics* [online]. 2015, **9568**(0), 95681E. ISSN 1996756X. Dostupné z: doi:10.1117/12.2186385
- [77] SCHEIBLIN, Gaëtan, Abdelkader ALIANE, Xenofon STRAKOSAS, Vincenzo F. CURTO, Romain COPPARD, Gilles MARCHAND, Róisín M. OWENS, Pascal MAILLEY a George G. MALLIARAS. Screen-printed organic electrochemical transistors for metabolite sensing. *MRS Communications* [online]. 2015, **5**(03), 507–511. ISSN 2159-6859. Dostupné z: doi:10.1557/mrc.2015.52
- [78] TANG, Hao, Peng LIN, Helen L. W. CHAN a Feng YAN. Highly sensitive dopamine biosensors based on organic electrochemical transistors. *Biosensors and Bioelectronics* [online]. 2011, **26**(11), 4559–4563. ISSN 09565663. Dostupné z: doi:10.1016/j.bios.2011.05.025
- [79] GUALANDI, Isacco, Domenica TONELLI, Federica MARIANI, Erika SCAVETTA, Marco MARZOCCHI a Beatrice FRABONI. Selective detection of dopamine with an all PEDOT:PSS Organic Electrochemical Transistor. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1), 35419. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep35419
- [80] LIN, Peng, Xiaoteng LUO, I. Ming HSING a Feng YAN. Organic electrochemical transistors integrated in flexible microfluidic systems and used for label-free DNA sensing. *Advanced Materials* [online]. 2011, **23**(35), 4035–4040. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201102017
- [81] NILSSON, David, Thomas KUGLER, Per Olof SVENSSON a Magnus BERGGREN. An all-organic sensor-transistor based on a novel electrochemical transducer concept printed electrochemical sensors on paper. *Sensors and Actuators, B: Chemical* [online]. 2002, **86**(2–3), 193–197. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/S0925-4005(02)00170-3
- [82] BUBNOVA, Olga, Magnus BERGGREN a Xavier CRISPIN. Tuning the Thermoelectric Properties of Conducting Polymers in an Electrochemical Transistor. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2012, **134**(40), 16456–16459. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja305188r
- [83] NILSSON, David, Nathaniel ROBINSON, Magnus BERGGREN a Robert FORCHHEIMER. Electrochemical logic circuits. *Advanced Materials* [online]. 2005, **17**(3), 353–358. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200401273
- [84] TU, Deyu, David NILSSON a Robert FORCHHEIMER. Electrochromic electrochemical transistors gated with polyelectrolyte- decorated amyloid fibrils. *IEEE/OSA Journal of Display Technology* [online]. 2013, **9**(9), 755–759. ISSN 1551319X. Dostupné z: doi:10.1109/JDT.2013.2278015
- [85] JOHANSSON, Tomas, Nils-Krister PERSSON a Olle INGANÄS. Moving Redox Fronts in Conjugated Polymers Studies from Lateral Electrochemistry in Polythiophenes. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2004, **151**(4), E119. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.1649749
- [86] INAL, Sahika, Jonathan RIVNAY, Anna I. HOFMANN, Ilke UGUZ, Muhammad MUMTAZ, Dimitrios KATSIKIANNPOULOS, Cyril BROCHON, Eric CLOUTET, Georges HADZIIOANNOU a George G. MALLIARAS. Organic electrochemical transistors based on PEDOT with different anionic polyelectrolyte dopants. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* [online]. 2016, **54**(2), 147–151. ISSN 08876266. Dostupné z: doi:10.1002/polb.23938
- [87] KAPHLE, Vikash, Shiyi LIU, Akram AL-SHADEEDI, Chang-Min KEUM a Björn LÜSSEM. Contact Resistance Effects in Highly Doped Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Materials* [online]. 2016, **28**(39), 8766–8770. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201602125

- [88] KNOLL, M. a M. THÄMER. An enhancement-mode electrochemical organic field-effect transistor. *Electrochemistry Communications* [online]. 2011, **13**(6), 597–599. ISSN 13882481. Dostupné z: doi:10.1016/j.elecom.2011.03.019
- [89] HAMEDİ, Mahiar, Robert FORCHHEIMER a Olle INGANÄS. Towards woven logic from organic electronic fibres. *Nature materials* [online]. 2007, **6**(5), 357–362. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat1884
- [90] EDBERG, Jesper, Abdellah MALTI, Hjalmar GRANBERG, Mahiar M HAMEDİ, Xavier CRISPIN, Isak ENGQUIST a Magnus BERGGREN. Electrochemical circuits from ‘cut and stick’ PEDOT:PSS-nanocellulose composite. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2017, **2**(4), 045010. ISSN 2058-8585. Dostupné z: doi:10.1088/2058-8585/aa8027
- [91] PRETL, Silvan. *Heterostruktury na bázo organických vodivých materiálů*. B.m., 2015. ZČU.
- [92] EFTEKHARI, Ali. Supercapacitors utilising ionic liquids. *Energy Storage Materials* [online]. 2017, **9**, 47–69. ISSN 24058297. Dostupné z: doi:10.1016/j.ensm.2017.06.009
- [93] FARIA, Gregório C., Duc T. DUONG a Alberto SALLEO. On the transient response of organic electrochemical transistors. *Organic Electronics* [online]. 2017, **45**, 215–221. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2017.03.021
- [94] MATTANA, Giorgio, Piero COSSEDDU, Beatrice FRABONI, George G. MALLIARAS, Juan P. HINESTROZA a Annalisa BONFIGLIO. Organic electronics on natural cotton fibres. *Organic Electronics* [online]. 2011, **12**(12), 2033–2039. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2011.09.001
- [95] OWENS, Róisín M. a George G. MALLIARAS. Organic Electronics at the Interface with Biology. *MRS Bulletin* [online]. 2010, **35**(06), 449–456. ISSN 0883-7694. Dostupné z: doi:10.1557/mrs2010.583
- [96] ŠTULÍK, J., R. POLANSKÝ, A. HAMÁČEK, S. NEŠPŮREK, P. SLEPIČKA, Z. KOLSKÁ a V. ŠVORČÍK. Comparison of organic thermistors based on PEDOT:PSS and PEDOT:tos thin films under various thermal and humidity conditions. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, **275**, 359–366. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2018.08.054
- [97] NILSSON, David, Miaoxiang CHEN, Thomas KUGLER, Tommi REMONEN, Mårten ARMGARTH a Magnus BERGGREN. Bi-stable and dynamic current modulation in electrochemical organic transistors. *Advanced Materials* [online]. 2002, **14**(1), 51–54. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/1521-4095(20020104)14:1<51::AID-ADMA51>3.0.CO;2-#
- [98] MATSUI, Jun, Yoshitaka SATO, Takeshi MIKAYAMA a Tokuji MIYASHITA. Fabrication of electrochemical transistor based on π -conjugate polymer langmuir-blodgett film. *Langmuir* [online]. 2007, **23**(16), 8602–8606. ISSN 07437463. Dostupné z: doi:10.1021/la063526r
- [99] BASIRICÒ, Laura, Piero COSSEDDU, Beatrice FRABONI a Annalisa BONFIGLIO. Inkjet printing of transparent, flexible, organic transistors. *Thin Solid Films* [online]. 2011, **520**(4), 1291–1294 [vid. 2015-03-27]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2011.04.188
- [100] BLAUDECK, Thomas, Peter Andersson ERSMAN, Mats SANDBERG, Sebastian HEINZ, Ari LAIHO, Jiang LIU, Isak ENGQUIST, Magnus BERGGREN a Reinhard R. BAUMANN. Simplified large-area manufacturing of organic electrochemical transistors combining printing and a self-aligning laser ablation step. *Advanced Functional Materials* [online]. 2012, **22**(14), 2939–2948 [vid. 2015-03-17]. ISSN 1616301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201102827
- [101] HÜTTER, Philipp C., Thomas ROTHLÄNDER, Anja HAASE, Gregor TRIMMEL a Barbara STADLOBER. Influence of geometry variations on the response of organic electrochemical transistors. *Applied Physics Letters* [online]. 2013, **103**(4), 043308. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.4816781

-
- [102] ZEGLIO, Erica, Martina M. SCHMIDT, Mukundan THELAKKAT, Roger GABRIELSSON, Niclas SOLIN a Olle INGANÄS. Conjugated Polyelectrolyte Blends for Highly Stable Accumulation-Mode Electrochemical Transistors. *Chemistry of Materials* [online]. 2017, **29**(10), 4293–4300. ISSN 0897-4756. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemmater.7b00474
- [103] HÜTTER, Philipp Christopher, Alexander FIAN, Karl GATTERER a Barbara STADLOBER. Efficiency of the Switching Process in Organic Electrochemical Transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2016, **8**(22), 14071–14076. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.6b02698
- [104] ZEGLIO, Erica, Mikhail VAGIN, Chiara MUSUMECI, Fatima N. AJJAN, Roger GABRIELSSON, Xuan T. TRINH, Nguyen T. SON, Ali MAZIZ, Niclas SOLIN a Olle INGANÄS. Conjugated Polyelectrolyte Blends for Electrochromic and Electrochemical Transistor Devices. *Chemistry of Materials* [online]. 2015, **27**(18), 6385–6393. ISSN 0897-4756. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemmater.5b02501

Seznam publikací autora

Publikace vztahující se k předmětu disertační práce

Vysokoškolské kvalifikační práce (písemná práce ke státní doktorské zkoušce)

- [1] MRAČEK, L. *Organický elektrochemický tranzistor*. 1. vyd. Plzeň: 2015, 65 s.

Článek v bodovaném časopise

- [2] MRAČEK, L., SYROVÝ, T., PRETL, S., NEŠPŮREK, S., HAMÁČEK, A. Influence of topology on performance of organic electrochemical transistor. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2016, roč. 60, č. 4, s. 211-216. ISSN: 2064-5260.

Stat' ve sborníku

- [3] MRAČEK, L. Organická elektronika - Organický elektrochemický tranzistor (OECT). In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 77-80. ISBN: 978-80-261-0367-7.
- [4] MRAČEK, L., PRETL, S., SYROVÝ, T., HAMÁČEK, A. Ionic liquid as an electrolyte for organic electrochemical transistor. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 11-15. ISBN: 978-1-4799-8860-0, ISSN: 2161-2528.
- [5] MRAČEK, L., SYROVÝ, T., PRETL, S., NEŠPŮREK, S., HAMÁČEK, A. Comparison of quasi-solid state and liquid electrolytes for organic electrochemical transistor. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 66-70. ISBN: 978-1-5090-1389-0.
- [6] MRAČEK, L., SYROVÝ, T., PRETL, S., NEŠPŮREK, S., HAMÁČEK, A. Influence of ionic liquids on the performance of organic electrochemical transistor. In *Book of Abstracts : 40th International Microelectronics and Packaging IMAPS Poland 2016 Conference*. Wrocław: Wrocław University of Science and Technology, 2016. s. 129-130. ISBN: 978-83-932464-2-7.
- [7] PRETL, S., MRAČEK, L., NAVRÁTIL, J., ŘEŘIČHA, T., HAMÁČEK, A. Low-voltage electrochemical transistor based on ionic liquid-gated PEDOT:PSS with copper electrodes. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 58-61. ISBN: 978-1-5090-1389-0.

- [8] PLESNIKOVA, L., POSPÍŠIL, J., MRAČEK, L., SYROVÝ, T., HAMÁČEK, A., NEŠPŮREK, S., ZMEŠKAL, O. Organic electrochemical transistor based on ionic liquid: The temperature effect. In *AIP Conference Proceedings*. New York: American Institute of Physics Publishing LLC, 2018. s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-1704-5.

Funkční vzorek

- [9] PRETL, S., MRAČEK, L., SYROVÝ, T., HAMÁČEK, A. *Organický tranzistorový spínač*. 2015.
- [10] PRETL, S., MRAČEK, L., SYROVÝ, T., HAMÁČEK, A. *FET struktura s bezpečnostním hologramem*. 2015.

Ostatní publikace

Konferenční sborník

- [1] BLECHA, T., MRAČEK, L., SOUKUP, R., PIHERA, J., TUPA, J., PROSR, P., ŘEŘIČHA, T. 39th International Spring Seminar on Electronics Technology. Pilsen, Czech Republic, 18.05.2016 - 22.05.2016.

Stat' ve sborníku

- [2] MRAČEK, L. Chytré textilie pro zkvalitnění ochrany zdraví. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 83-86. ISBN: 978-80-261-0233-5.
- [3] SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., MRAČEK, L. Textile Based Temperature and Humidity Sensor Elements for Healthcare Applications. In *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2014*. Piscataway: IEEE, 2014. s. 407-411. ISBN: 978-1-4799-4455-2 , ISSN: 2161-2528.
- [4] MRAČEK, L., KALČÍK, J. Našívaný teplotní senzor pro hasičský zásahový oblek. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 177-180. ISBN: 978-80-261-0514-5.
- [5] BLECHA, T., SOUKUP, R., KAŠPAR, P., HAMÁČEK, A., MRAČEK, L., FIALA, P., BAXA, M., BRAŠNA, V., LOUKOTA, P., KOŽELUH, J., PEKAŘ, T., KOTRČ, R. Chytrý zásahový oblek pro hasiče. In *46. Seminář Pravidelné setkání zájemců o mikrovlnnou techniku*. Praha: Česká elektrotechnická společnost, z.s., 2017. s. 1-4. ISBN: 978-80-02-02726-3.

- [6] BLECHA, T., FIALA, P., SOUKUP, R., KAŠPAR, P., HAMÁČEK, A., MRAČEK, L., ZÁRUBA, J. Chytré textilie pro zvýšení bezpečnosti hasičů. In *Radiokomunikace 2018 : sborník přednášek*. Pardubice: UNIT s.r.o., 2018. s. 245-256. ISBN: 978-80-87942-45-1.

Funkční vzorek

- [7] SOUKUP, R., ŘEBOUN, J., BLECHA, T., MRAČEK, L., KAŠPAR, P., MORAVCOVÁ, D., PILÍKOVÁ, M., BODNÁR, M., TICHÝ, M., SELYEM, T. *Textilní substráty s integrovanými propojovacími strukturami vytvořené technologiemi sítotisku, všívaných vodičů a textilní elektrody (tzv. textrody)*. 2014.
- [8] ČENGERY, J., FREISLEBEN, J., MRAČEK, L., ŘEBOUN, J., SOUKUP, R. *Vyhodnocovací jednotka pro inteligentní prostěradlo*. 2015.
- [9] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., MRAČEK, L., BLECHA, T., KAŠPAR, P., PRETL, S., HAMÁČEK, A. *Integrovaný flexibilní sensor teploty v textili*. 2015.
- [10] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., MRAČEK, L., BLECHA, T., KAŠPAR, P., MORAVCOVÁ, D., HAMÁČEK, A. *Integrovaný flexibilní sensor vlhkosti v textili*. 2015.
- [11] BLECHA, T., HAMÁČEK, A., SOUKUP, R., ŘEBOUN, J., KAŠPAR, P., MRAČEK, L., FIALA, P., ČENGERY, J., FREISLEBEN, J., KUBERSKÝ, P., ZÁRUBA, J., BAXA, M., KOTRČ, R., PEKAŘ, T., LOUKOTA, P. *Chytrý zásahový oblek Smart@Fire*. 2016.
- [12] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., BLECHA, T., KAŠPAR, P., MORAVCOVÁ, D., MRAČEK, L., PAVEC, M. *Bezešvé funkční triko pro měření dechové frekvence*. 2016.
- [13] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., BLECHA, T., KAŠPAR, P., MRAČEK, L., PEKAŘ, T., PONÍŽIL, K. *Systém pro integraci lokalizačních modulů do ochranné obuvi*. 2016.
- [14] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., BLECHA, T., KAŠPAR, P., HAMÁČEK, A., BYSTRICKÝ, T., MRAČEK, L., MORAVCOVÁ, D. *Chytré prostěradlo*. 2016.
- [15] SOUKUP, R., ŘEBOUN, J., BLECHA, T., KAŠPAR, P., HAMÁČEK, A., SMÍTKA, V., MRAČEK, L., ČENGERY, J., FREISLEBEN, J., BAXA, M., BRAŠNA, V., LOUKOTA, P., KOŽELUH, J. *Chytrý ochranný oblek s integrovaným systémem pro monitorování tepelné kapacity*. 2017.
- [16] SOUKUP, R., ŘEBOUN, J., BLECHA, T., KAŠPAR, P., HAMÁČEK, A., SMÍTKA, V., MRAČEK, L., FIALA, P., BAXA, M., BRAŠNA, V., LOUKOTA, P., KOŽELUH, J. *Chytrý ochranný oblek ADVANTEX s integrovaným mikrosystémem*. 2017.

A. PŘÍLOHA – Přehled parametrů OECT (literatura)

Tab. 11 Přehled parametrů OECT pro spínací aplikace uvedené v dostupných článcích.

Topologie	Elektrody (G, D-S)	Materiál		- I_{DS} (A)		I_{ON}/I_{OFF} (-)	t_{OFF} (s)	t_{ON} (s)	Ref.
		Kanál	Elektrolyt	ON	OFF				
Laterální	Ag, PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	-	-	-	10^3	0.02	0.5	[97]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	¹⁾	-	-	$5 \cdot 10^3$	-	-	[38]
Vertikální	ITO, Au	PHT/pDDA	LiPF ₆ /CH ₃ CN	$9 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-8}$	10^4	-	-	[98]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	¹⁾	10^{-5}	-	$5 \cdot 10^2$	-	-	[46]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	-	$2.9 \cdot 10^{-5}$	-	10^2	-	-	[99]
Vertikální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	¹⁾ + NaClO ₄	-	-	10^2	15 – 16	17 – 18	[47]
Vertikální	PEDOT:PSS, -	PEDOT:PSS	-	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-7}$	10^2	0.16	0.46	[100]
Vertikální	PEDOT:PSS, C	PEDOT:PSS	¹⁾	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 - 10 \cdot 10^2$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$> 0,1$	[40]
Vertikální	PEDOT:PSS, C	PEDOT:PSS	¹⁾	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$5 - 10 \cdot 10^2$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	[40]
Vertikální	PEDOT:PSS, C	PEDOT:PSS	¹⁾	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5 - 10 \cdot 10^2$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 3 \cdot 10^{-2}$	[40]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	¹⁾	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^3$	0,4	3,3	[101]
Vertikální	PEDOT:PSS, C	PEDOT:PSS	²⁾	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	[45]
Vertikální	PEDOT:PSS, C	PEDOT:PSS	²⁾	$1 \cdot 10^{-4}$	$< 4 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	[45]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	³⁾	-	-	2	~ 18	~ 4	[84]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	⁴⁾	-	-	$2 \cdot 10^2$	~ 23	~ 16	[84]

Tab. 11 Pokračování.

Topologie	Elektrody (G, D-S)	Materiál		- I_{DS} (A)		I_{ON}/I_{OFF} (-)	t_{OFF} (s)	t_{ON} (s)	Ref.
		Kanál	Elektrolyt	ON	OFF				
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	⁵⁾	-	-	$1.5 \cdot 10^3$	~ 5	~ 12	[84]
Laterální	PEDOT:PSS	PEDOT:PSS	¹⁾	$6.4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-2}$	0.9	[34]
Vertikální	Ag	PEDOT:PSS	⁶⁾	$4.93 \cdot 10^{-4}$	$8.65 \cdot 10^{-7}$	$7.3 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	[41]
Vertikální	Ag	PEDOT:PSS	⁶⁾	$1.93 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-1}$	[41]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTHS	⁷⁾	-	-	$3.1 \cdot 10^4$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	0.4	[102]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTHS:PEDOT-S 1:1	⁷⁾	-	-	$8.8 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	9.1	[102]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTHS:[PEDOT-S:(Oct) ₂ NH ₂] 1:1	⁷⁾	-	-	$4.4 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$7.9 \cdot 10^{-2}$	[102]
Vertikální	Ag/AgCl, Au	PEDOT-S:(Oct) ₂ NH ₂	KCl	-	-	$1.9 \cdot 10^3$	10^{-2}	$2.9 \cdot 10^{-2}$	[57]
Vertikální	Ag/AgCl, Au	PEDOT-S:(Nonyl)NH ₃	KCl	-	-	$9.9 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	[57]
Vertikální	Ag/AgCl, Au	PEDOT-S	BMIM BF ₄	-	-	$1.5 \cdot 10^3$	$5.8 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	[57]
Vertikální	Ag/AgCl, Au	PEDOT-S:(Oct) ₂ NH ₂	BMIM BF ₄	-	-	$4.6 \cdot 10^2$	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	[57]
Laterální	C	PEDOT:PSS	CaCl ₂ gel	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-8}$	$8.2 \cdot 10^3$	-	-	[103]
Laterální	C	PEDOT:PSS	-	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$	$7.5 \cdot 10^3$	-	-	[28]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PEDOT-S	⁷⁾	-	-	$6.5 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$	[104]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTEBS	⁷⁾	-	-	$5.1 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-1}$	6.9	[104]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTEBS:PEDOT-S 1:1	⁷⁾	-	-	$4.6 \cdot 10^2$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$7.1 \cdot 10^{-2}$	[104]

Tab. 11 Pokračování

Topologie	Elektrody (G, D-S)	Materiál		- I_{DS} (A)		I_{ON}/I_{OFF} (-)	t_{OFF} (s)	t_{ON} (s)	Ref.
		Kanál	Elektrolyt	ON	OFF				
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTEBS:PEDOT-S 3:2	⁷⁾	-	-	$10.8 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	[104]
Vertikální	PEDOT:PSS, Au	PTEBS:PEDOT-S 2:1	⁷⁾	-	-	$7.0 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	[104]

¹⁾ (PSSNa)/D-sorbitol/glycerol/demineralizovaná voda, ²⁾ poly[(kvartérní imidazolium) chlorid], ³⁾ PEDOT-S/komplex amyloidních fibril,

⁴⁾ PTAA, ⁵⁾ PTAA/komplex amyloidních fibril, ⁶⁾ AFI VV009 vyrobený v RISE Acreo, ⁷⁾ PHEM síť uvnitř IL BMIM BF₄.