



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTRICKÁ CHARAKTERIZACE ORGANICKÝCH ELEKTROCHEMICKÝCH TRANZISTORŮ

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF ORGANIC ELECTROCHEMICAL TRANSISTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Dundr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Jakub Dunder

ID: 211224

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Elektrická charakterizace organických elektrochemických tranzistorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student se seznámí s problematikou elektrických vlastností organických elektrochemických tranzistorů. Prostuduje metody charakterizace a zaměří se na měření základních parametrů ve fyziologickém roztoku. Na základě získaných poznatků provede charakterizaci planárních elektrochemických tranzistorů založených na polymerním materiálu PEDOT:PSS. Výstupem práce bude porovnání parametrů u zmíněných planárních struktur v závislosti na jejich geometrii.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 23.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Brodský

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá elektrickou charakterizací organických elektrochemických tranzistorů na bázi PEDOT:PSS, jejich elektrickými parametry, fyzikálními vlastnostmi a principy. V této práci jsou dále rozebrány některé oblasti použití OECT, zejména pak využití pro bioelektroniku. Poslední část práce je zaměřena na měření elektrických parametrů OECT včetně krátkého představení měřícího vybavení. Výstupem této práce je vyhodnocení vlivu překryvu materiálu PEDOT:PSS na zlatých kontaktech z pohledu sledovaných elektrických parametrů.

Klíčová slova

OECT, elektrická měření, vnitřní struktura OECT, využití OECT, bioelektronické aplikace, transkonduktance, překryv kontaktů

Abstract

This master's thesis is focused on electrical characterisation of PEDOT:PSS based organic electrochemical transistors, it's electrical parameters, physical properties and principles. This thesis further includes fields of usage of the OECT, mainly usage for bioelectronics. Last part of this thesis is focused on the measurement of the OECT electrical parameters including short introduction to the equipment for measurement. The outcome of this thesis is evaluation of PEDOT:PSS overlap on gold contacts in terms of observed electrical parameters.

Keywords

OECT, electrical measurements, OECT internal structure, OECT usage, applications for bioelectronics, transconductance, contact overlap

Bibliografická citace

Citace elektronického zdroje:

DUNDR, Jakub. *Elektrická charakterizace organických elektrochemických tranzistorů* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/152465>.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Imrich Gablech.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Jakub Dundr, Bc.
VUT ID studenta: 211224
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: *Elektrická charakterizace organických elektrochemických tranzistorů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Imrichu Gablechovi, Ph.D. a Ing. Janu Brodskému za účinnou a metodickou odbornou pomoc a cenné rady ohledně zpracování této diplomové práce. Dále pak výzkumnému ústavu CEITEC NANO za poskytnutí potřebného vybavení a vzorků.

V Brně dne: 23. května 2023

podpis autora

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (LM2023051, MŠMT, 2023–2026) CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Obsah

ÚVOD	9
1 TRANZISTORY PRO BIOELEKTRONIKU	10
1.1 TRANZISTORY ŘÍZENÉ ELEKTRICKÝM POLEM	10
1.1.1 <i>Tranzistory MOSFET</i>	10
1.2 TRANZISTORY OECT	12
1.2.1 <i>Základní princip tranzistoru OECT</i>	12
1.2.2 <i>OECT v depletičním režimu</i>	12
1.2.3 <i>OECT v akumulacním režimu</i>	14
1.2.4 <i>Elektrické parametry OECT</i>	14
2 VLASTNOSTI PEDOT KANÁLU A VYUŽITÍ OECT	19
2.1 MATERIÁL PEDOT:PSS	19
2.1.1 <i>Příprava a výroba</i>	19
2.1.2 <i>Sekundární dotace</i>	20
2.1.3 <i>Stabilita a biokompatibilita materiálu PEDOT</i>	22
2.2 BIOELEKTRONIKA A BIOMEDICÍNA	25
2.2.1 <i>Vyhodnocování aktivity nervových buněk</i>	25
2.2.2 <i>Příklad využití OECT pro EEG snímání</i>	26
2.2.3 <i>Principy snímání aktivity nervových buněk</i>	28
2.2.4 <i>Vysvětlení výhody organických materiálů v bioelektronice</i>	29
2.2.5 <i>Monitorování vlastností tkání pomocí impedančního měření</i>	31
2.3 ELEKTRICKÉ OBVODY A DIGITÁLNÍ LOGIKA	33
2.3.1 <i>Digitální obvody</i>	33
2.3.2 <i>OLED displeje</i>	36
2.4 NEUROMORFNÍ APLIKACE	38
3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OECT	39
3.1 MĚŘICÍ VYBAVENÍ	39
3.2 SPECIFICKÉ CÍLE PRÁCE A METODIKA PROVÁDĚNÝCH OPERACÍ	41
3.2.1 <i>Seznámení se vzorky</i>	41
3.2.2 <i>Výsledky studie referenčního článku</i>	42
3.2.3 <i>Příprava vlastních vzorků</i>	43
3.2.4 <i>Popis měření v čistých prostorách</i>	45
3.2.5 <i>Popis měření frekvenčních charakteristik v laboratoři</i>	50
4 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT	51
4.1 VYHODNOCENÍ VÝSTUPNÍCH A PŘENOSOVÝCH CHARAKTERISTIK	52
4.1.1 <i>Čipy A, struktury tloušťky 350 nm</i>	52
4.1.2 <i>Čipy B, struktury tloušťky 350 nm</i>	55
4.1.3 <i>Čipy D, struktury tloušťky 350 nm</i>	56
4.2 VYHODNOCENÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK	57
4.3 VYHODNOCENÍ PULZNÍ ODEZVY	59
4.4 SROVNÁNÍ PŘEDCHOZÍCH ZÁVĚRŮ SE DRUHÝM VZORKEM	61
4.4.1 <i>Čip A2, struktury tloušťky 40 nm</i>	61
4.4.2 <i>Čip B2, struktury tloušťky 40 nm</i>	62

4.4.3	<i>Čip D2, struktury tloušťky 40 nm</i>	62
4.4.4	<i>Frekvenční charakteristiky struktur s tloušťkou 40 nm</i>	62
4.4.5	<i>Vyhodnocení pulzní odezvy struktur tloušťky 40 nm</i>	63
5	ZÁVĚR	64
	LITERATURA	66
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	74
	SEZNAM PŘÍLOH	74

ÚVOD

Z pohledu dnešní doby jsou tranzistory vnímány jako běžné elektronické součástky, dostupné v mnoha variantách, provedeních a s mnoha parametry. Pravdou však zůstává, že objevení prvních tranzistorů odstartovalo revoluci na poli elektronických obvodů a dnes je s jejich pomocí realizována prakticky veškerá elektronika. S postupným rozmachem průmyslových aplikací na poli elektroniky však jde ruku v ruce i zdokonalování tranzistorů a jejich materiálů, jejichž parametry musí s rostoucími požadavky udržet krok. V průběhu času tak po prvních bipolárních tranzistorech začaly vznikat tranzistory unipolární, ale také kombinace obou (například tranzistory IGBT).

V závislosti na konkrétní aplikaci jsou pak tyto tranzistory vhodně voleny a využívány. Princip fungování a elektrické parametry však nejsou zdaleka jedinými kritérii pro výběr tranzistorů pro danou aplikaci. Vyhovovat musí také použité materiály, které musí odolávat stárnutí a nepříznivým vlivům prostředí. Tato práce se nadále bude zabývat především organickými elektrochemickými tranzistory známými pod anglickou zkratkou OECT (Organický Elektrochemický Tranzistor) a jejich vhodností pro použití v aplikacích s flexibilními substráty pro nositelnou elektroniku, tištěnou elektroniku, zdravotnictví a další speciální aplikace.

Účelem práce je také elektrická charakterizace těchto tranzistorů a srovnání význačných parametrů s běžnými, v principu podobnými tranzistory FET. K dosažení tohoto účelu se práce zabývá také metodikou vlastního měření.

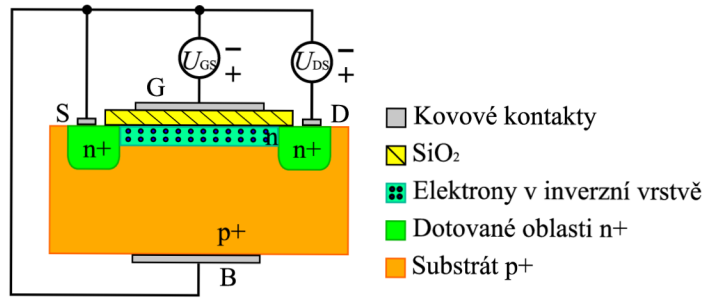
1 TRANZISTORY PRO BIOELEKTRONIKU

Organické elektrochemické tranzistory využívají ke své činnosti injektování iontů z elektrolytu pro modulaci vodivosti organického polovodičového tranzistoru, respektive jeho kanálu. Vazba iontů a elektronových nábojů v celém objemu tranzistorového kanálu má za následek změny ve vodivosti kanálu, tedy změny transkonduktance. Růst transkonduktance je však obvykle vykoupen snížením rychlosti těchto tranzistorů. Během výroby je možné OECT navrhovat s ohledem na transkonduktanci, rychlost nebo nalézt kompromis pro danou aplikaci. Parametry lze nejspíše ovlivnit volbou elektrolytu a použitých organických materiálů. Z pohledu výroby je tato vlastnost vhodná, jelikož použitím stejných struktur tranzistoru s různým typem elektrolytu lze docílit různých elektrických parametrů pro konkrétní aplikaci. Podrobnější popis zmíněných vlastností je rozveden v dalších kapitolách této práce.

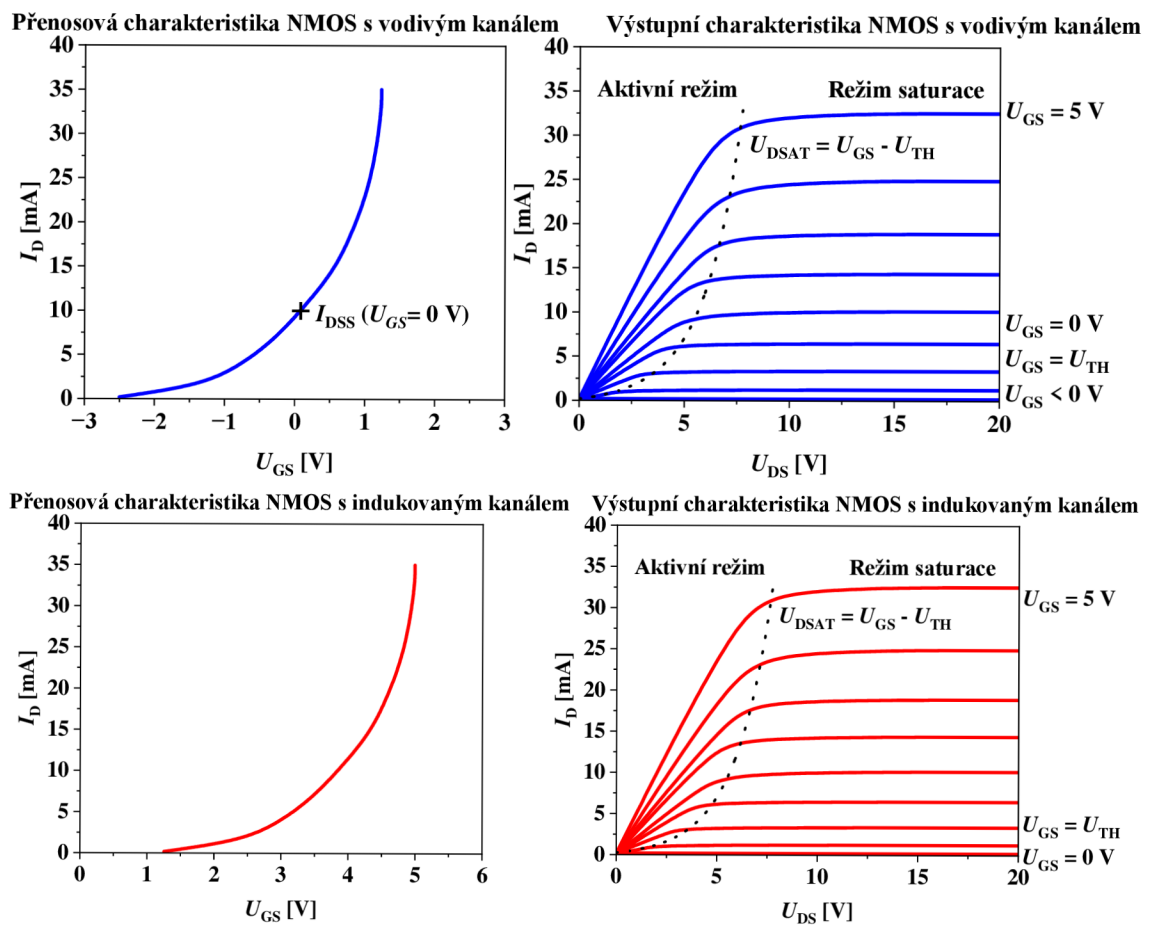
1.1 Tranzistory řízené elektrickým polem

1.1.1 Tranzistory MOSFET

Běžné tranzistory řízené elektrickým polem pracují na základě změny koncentrace volných nosičů náboje v polovodiči pomocí změny elektrického pole. Jedná se tedy o změnu koncentrace elektronů a děr. Řídicí napětí dané polaritě je přikládáno na řídicí (Gate) kovovou elektrodu, která je od polovodiče izolována tenkou vrstvou dielektrika. Zmíněný princip využívají tranzistory MOSFET, které využívají řídicí napětí k vytváření vodivého kanálu s opačným typem vodivosti (vrstva s inverzním typem vodivosti). V případě tranzistoru MOSFET (s indukovaným kanálem typu N) dochází po přiložení kladného napětí mezi řídicí elektrodu a substrát k vytvoření vodivého kanálu, který je tvořený volnými elektrony. Ty jsou odsávány z materiálu s nevlastní vodivostí typu P, kde jsou minoritními nosiči náboje. Výsledkem je tedy kanál s vodivostí typu N v polovodiči typu P v místě pod izolací hradla. Tento tranzistor se pak nazývá NMOS. Obdobně dochází při záporné polaritě tohoto napětí k vytvoření kanálu typu P v polovodiči s nevlastní vodivostí typu N v případě tranzistorů PMOS. Zmíněné typy tranzistorů existují také již s vytvořeným vodivým kanálem. Tranzistor je tak již při nulovém řídicím napětí otevřený. Po přiložení napětí se jejich vodivost zvyšuje nebo snižuje v závislosti na polaritě řídicího napětí [1],[5]. Základní konstrukce tranzistoru MOS s kanálem typu N je zobrazena na obrázku 1.1, na obrázku 1.2 jsou pak výstupní a přenosové charakteristiky NMOS tranzistoru s vodivým (modrá barva) a indukovaným kanálem (červená barva).



Obrázek 1.1: Konstrukce MOS tranzistoru s kanálem typu N



Obrázek 1.2: Přenosové a výstupní charakteristiky NMOS

1.2 Tranzistory OECT

1.2.1 Základní princip tranzistoru OECT

Postupný zájem o organické materiály a jejich využití v nízkonákladové výrobě vedl k vývoji organických elektrochemických, polem řízených tranzistorů (OFET). Tyto tranzistory našly uplatnění zejména díky své snadné výrobě na různých druzích substrátů, možnosti využití pro bioelektronické aplikace a snadné modifikovatelnosti elektronických vlastností. Jako některé z potenciálních aplikací lze jmenovitě uvést řídicí obvody pro pixelové displeje, bionickou kůži, záznam neurální aktivity, flexibilní aplikace (nositelná elektronika) a chemické senzory odolné například vůči slané vodě [1],[2].

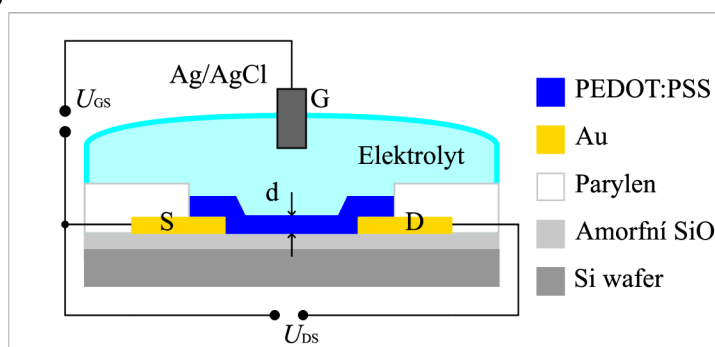
Organické elektrochemické tranzistory byly vyvinuty společností Wrighton and colleagues v osmdesátých letech minulého století. Jejich základem je organická polovodičová vrstva, která je v kontaktu s elektrolytem. Tato vrstva tvoří vodivý kanál mezi kovovými elektrodami Source (S) a Drain (D). Kontaktem s tímto materiálem je mezi elektrodami S a D definován kanál, ve kterém se mohou pohybovat volné nosiče náboje (elektrony a díry). V již zmíněném elektrolytu je ponořena řídicí elektroda Gate (G) [3].

1.2.2 OECT v depletičním režimu

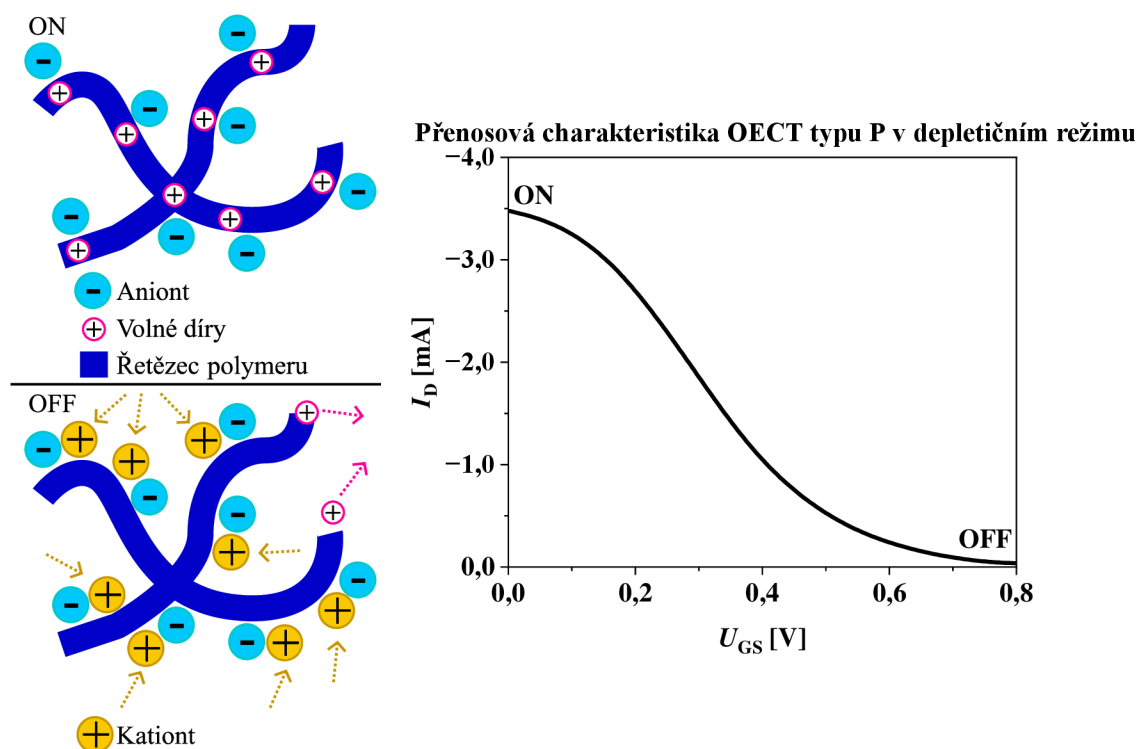
Základní princip spočívá v injekci iontů z elektrolytu do organického materiálu filmu. Vpravením iontů do tohoto materiálu dochází ke změnám v dotaci aktivního materiálu, tedy k modifikování jeho vodivosti. Injektování iontů je řízeno napětím mezi řídicí elektrodou G a kovovým kontaktem S. Přiložení napětí na kovové elektrody S a D poté při sepnutém kanálu tranzistoru způsobuje indukování drainového proudu I_D , který je přímo úměrný množství nosičů náboje (děr či elektronů) ve vodivém filmu (kanálu), tedy stavu jeho dotace a pohyblivosti těchto nosičů [3].

Zmíněný princip a konstrukce je zobrazena níže na obrázku 1.3. Struktura tranzistoru je zhotovena na amorfním SiO_2 (tmavě šedá vrstva), na níž jsou zhotoveny zlaté kontakty (žlutá oblast) D a S. Tyto kontakty jsou izolovány od elektrolytu polymerními vrstvami parylenu-C (bílé oblasti). Mezi kontakty je umístěn tenký film, utvářející vodivý kanál tranzistoru (modrá oblast). Pro zhotovení tohoto filmu je obvykle využívána kombinace polymerního polovodiče polyetylen dioxytiofenu (PEDOT) a polystyren sulfonátu (PSS), který slouží jako dopant. Tento dopant zanášá do struktury volné díry a vznikající anionty polystyren sulfonátových skupin. Na PSS lze tedy v tomto případě nahlížet jako na ionizované akceptorové příměsi. Tato kombinace pak bývá označována anglickou zkratkou PEDOT:PSS. Materiál PEDOT:PSS je tedy materiálem typu P a obsahuje díry jakožto volné nosiče elektrického náboje. Výsledkem je tedy kanál, který je v klidovém stavu bez připojení vnějšího napětí vodivý (sepnutý). Existence volných nosičů náboje umožňuje vznik děrového proudu po připojení potenciálu mezi D a S. Modifikaci

vodivosti kanálu umožňuje elektrolyt, tvořený v tomto případě solným roztokem (světle modrá oblast), s vnořenou elektrodou G. Tento roztok je zdrojem kationtů. Připojením v tomto případě kladného napětí na elektrodu G dojde k injekci těchto kationtů do aktivního materiálu PEDOT:PSS, kde dochází ke kompenzaci aniontů sulfonátových skupin. Nedochází tedy ke generaci volných děr, původně vytvořené díry jsou extrahovány přes elektrodu D. Dochází tedy ke snížení dotace, které má za následek pokles množství volných nosičů náboje a tím i růst odporu kanálu. Popsaný režim fungování OEET se nazývá depleční či ochuzený [1],[2]. Situace a přenosová charakteristika je znázorněna na obrázku 1.4.



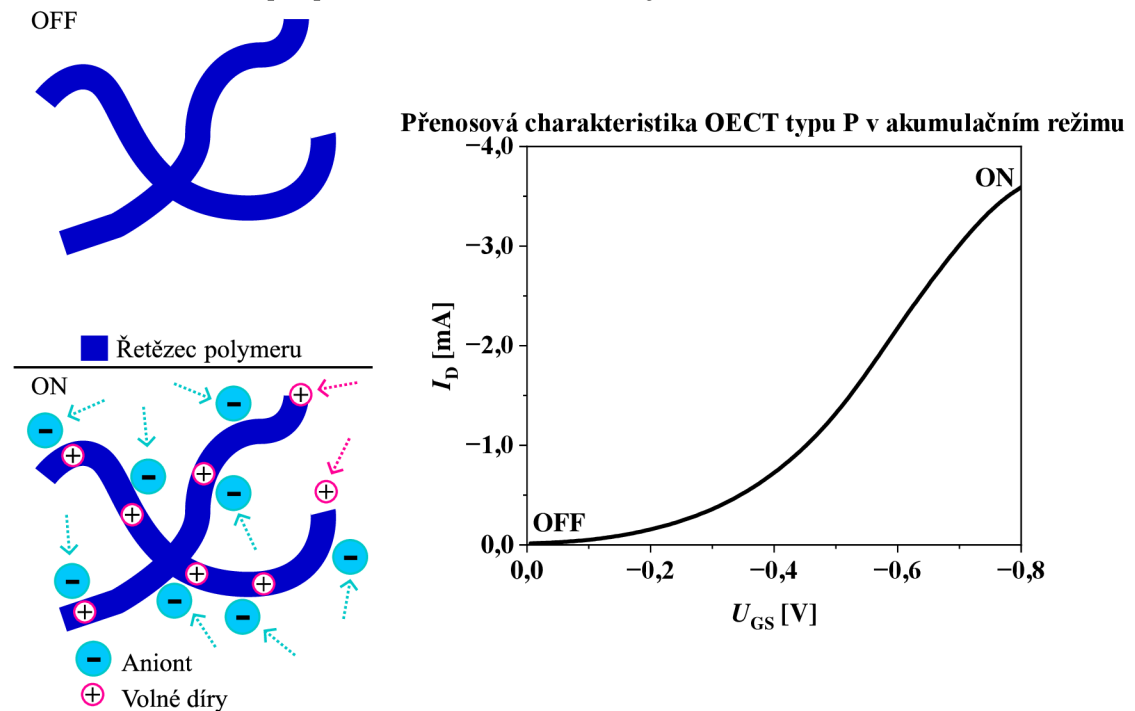
Obrázek 1.3: Řez strukturou tranzistoru OEET



Obrázek 1.4: OEET typu P v deplečním režimu a jeho přenosová charakteristika

1.2.3 OECT v akumulacním režimu

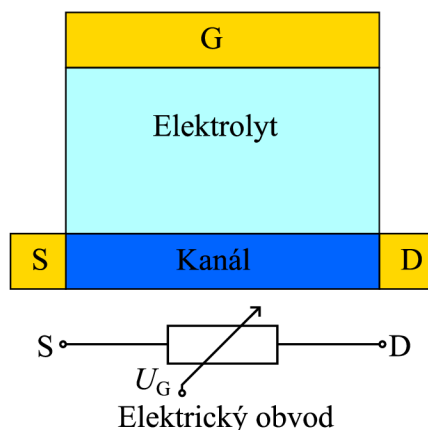
Funkci OECT v akumulacním režimu lze v jednoduchosti popsat jako inverzní k OECT v již popsanému deplečním režimu. Základní princip fungování však zůstává stejný. Kanál tohoto tranzistoru obsahuje bez připojení řídicího napětí malé množství děr vlivem nižší dotace PEDOT:PSS. Přiložením záporného řídicího napětí dochází k injekci aniontů z elektrolytu a tím i k chemickému dotování kanálu dírami podobně jako v předchozím případě. Výsledkem je kanál, který je v klidovém stavu bez přiloženého napětí nevodivý, tranzistor je tedy rozepnutý. K sepnutí dochází přiložením záporného napětí na řídicí elektrodu [1]. Princip a přenosová charakteristika je zobrazena na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: OECT typu P v akumulacním režimu a jeho přenosová charakteristika

1.2.4 Elektrické parametry OECT

Důležitým doplněním předcházejících kapitol je fakt, že ke změnám dotace, tedy i koncentrace volných nosičů náboje v kanálu tranzistoru dochází v celém objemu tohoto kanálu, jak je podrobněji vysvětleno v pokračování této kapitoly. Díky tomuto faktu postačuje malé řídicí napětí U_G k dosažení velké modulace drainového proudu a OECT mohou být dobrými zesilovači i spínači [1].



Obrázek 1.6: Elektrické schéma OECT [1]

Z pohledu elektrického obvodu lze na OECT pohlížet v souladu s obrázkem 1.6 jako na odpor, řízený napětím U_G , jelikož změnami tohoto napětí se mění dotace kanálu volnými nosiči náboje a tím dochází ke změnám odporu kanálu tranzistoru. Toto chování vhodně vystihuje přenosová charakteristika tranzistoru, která je závislostí drainového proudu I_D na velikosti přiloženého napětí U_G . Jako příklad tohoto průběhu mohou posloužit obrázky 1.4 a 1.5. Strmost této charakteristiky určuje velikost změny proudu I_D v závislosti na přiloženém U_G , tedy jeho schopnost zesilovat vstupní řídicí signál [1],[2]. První derivací přenosové charakteristiky získáváme transkonduktanci (přenosovou vodivost) tranzistoru dle vzorce (1.1), která je jedním z určujících parametrů tranzistorů řízených elektrickým polem.

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_G} \text{ [S]} \quad (1.1)$$

Kde g_m [S] představuje transkonduktanci

∂I_D [A] proud elektrodou D (respektive jeho derivaci)

∂U_G [V] řídicí napětí mezi elektrodami G a S (respektive jeho derivaci).

Důležitým pohledem pro vysvětlení některých elektrických parametrů je náhradní iontový obvod a kapacity těchto tranzistorů, k čemuž poslouží obrázky 1.7 a 1.8. Obrázky 1.6 a 1.7 utvářejí společně Bernardsův model (elektrický a iontový obvod). Tento model nahrazuje tranzistor jak elektrickým, tak iontovým obvodem. Iontový obvod se zaměřuje na popis toku iontů strukturou řídicí elektrody G, elektrolytem a strukturou kanálu. Elektrický obvod pak popisuje tok elektrického náboje od S k D přes strukturu kanálu v souladu s Ohmovým zákonem. Iontový obvod se skládá z kapacity C_G elektrody G, rezistoru R_E , představujícího elektrolyt a kapacity kanálu C_{CH} . Rezistor zde charakterizuje tok iontů v elektrolytu a kapacita C_{CH} pak ionty uložené v kanálu. Dle tohoto modelu ionty z elektrolytu pouze elektrostaticky kompenzují přítomnost opačného náboje v kanálu, přičemž nedochází k výměně náboje s organickým filmem. V klidovém stavu

je tedy kapacita kanálu C_{CH} nabita a řídicí elektrodou neprotéká žádný proud [1]. Lze tedy konstatovat, že chování obvodu (zejména rychlost odezvy) je do velké míry určeno časovou konstantou, jejíž velikost je dána odporem R_E a příslušnými kapacitami. Výsledný model definuje transkonduktanci dle vzorce (1.2), v případě tranzistoru v akumulacním módu jsou obrácena znaménka napětí.

Obrázek 1.7 dále ukazuje rozdíl mezi ideálním a neideálním řízením tranzistoru. V ideálním případě by měl být největší úbytek řídicího napětí U_G na rozhraní elektrolytu a kanálu. Tento úbytek totiž řídí ionty ve struktuře. V neideálním případě je největší úbytek na rozhraní G elektrody. Pro ideální případ by tedy dle vztahu (1.3) měla být kapacita $C_{CH} < C_G$ [1].

$$g_m = \frac{w}{l} \cdot d \cdot \mu \cdot C^* \cdot (U_{TH} - U_{GS}) \text{ [S]} \quad (1.2)$$

Kde g_m [S] je transkonduktance

w , l a d [m] jsou šířka, délka a tloušťka kanálu tranzistoru

μ [m^2/Vs] je pohyblivost volných nosičů náboje

C^* [F/m^2] je objemová kapacita kanálu

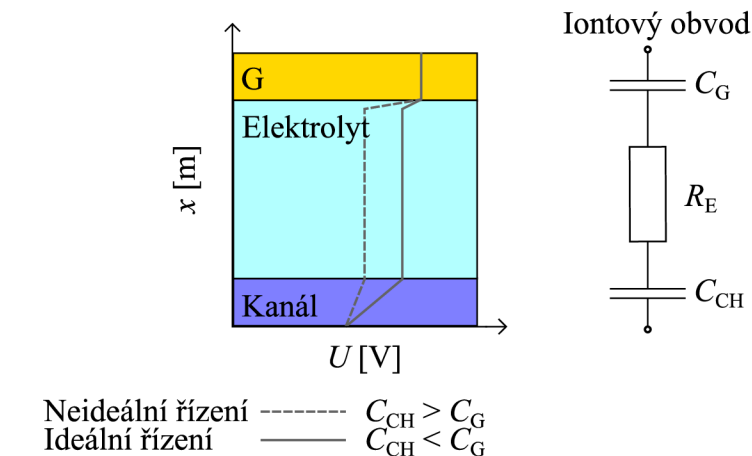
U_{TH} a U_{GS} [V] jsou prahové a řídicí napětí tranzistoru.

$$u_C = \frac{i_C \cdot \Delta t}{C} \text{ [V]} \quad (1.3)$$

Kde u_C [V] je napětí na kondenzátoru

i_C [A] je proud kondenzátorem

C [F] je kapacita kondenzátoru.



Obrázek 1.7: Iontový obvod a rozložení potenciálu ve struktuře OECT [1]

Pro lepší pochopení mechanismů přenosů náboje poslouží obrázek 1.8, který srovnává účinnosti indukování elektrického náboje v jednotlivých strukturách. V případě tranzistorů FET (MOSFET) dochází k akumulaci volných nosičů náboje pod rozhraním

polovodiče a izolačního oxidu pouze pod řídicí elektrodou. Tento náboj je kompenzován opačným nábojem kovové elektrody. Strukturu lze nahradit deskovým kondenzátorem, kde oxid představuje dielektrikum kondenzátoru. Množství indukovaného náboje na rozhraní polovodiče a izolantu je pak přímo úměrné velikosti přiloženého napětí a kapacitě dielektrické vrstvy dle vztahu (1.4). Kapacita je nepřímo úměrná tloušťce oxidové vrstvy, zároveň je přímo úměrná množství indukovaného náboje a tím i velikosti výsledného proudu I_D tranzistoru [3].

$$Q = C \cdot U = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{l} \cdot U \quad [C] \quad (1.4)$$

Kde Q [C] je elektrický náboj

C [F] je kapacita kondenzátoru

U [V] je přiložené napětí

ε_0 [F/m] je permitivita vakua

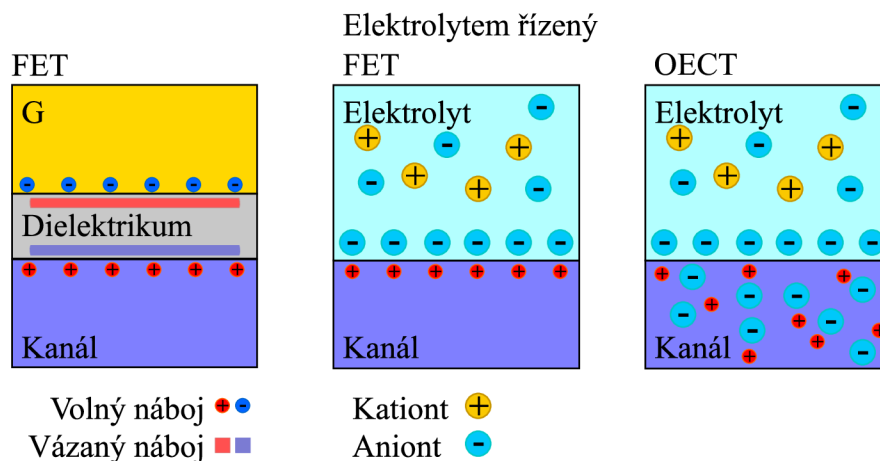
ε_r [-] je relativní permitivita oxidu

S [m²] je plocha kovové elektrody

l [m] je tloušťka oxidu.

V případě tranzistoru FET s elektrolytem lze na situaci pohlížet jako na dvouvrstvý kondenzátor. Indukovaná vrstva volných nosičů náboje na rozhraní kanálu a elektrolytu je kompenzována vrstvou iontového náboje opačné polarity. Struktura se chová podobně jako v předchozím případě, pouze tloušťka dielektrika je zde velice malá – definována poloměrem iontů, tvořící kompenzující vrstvu [1]. Dle vztahu (1.4) je poté výsledná kapacita velmi vysoká, jelikož kapacita závisí na tloušťce dielektrika nepřímo úměrně.

V případě OEET vlivem průniku iontů do materiálu polovodiče dochází ke změnám dotace v oblasti kanálu. Dochází tedy k objemovým změnám nábojového stavu a tím i k objemovým změnám kapacity. Při podobných rozměrech v porovnání s FET tranzistory dochází při přiložení stejného napětí U_{GS} v případě OEET k indukování většího množství náboje v oblasti kanálu. Výsledkem je větší proud drainem v případě OEET při stejném U_{GS} , což vysvětluje jeho zesilovací schopnost [1].



Obrázek 1.8: Srovnání účinnosti indukování náboje polem řízených tranzistorů [1]

Shrnutím celé kapitoly se stává skutečnost, že vlivem změn dotace kanálu v celém objemu tranzistoru OEET sice dochází k dosažení většího zesílení, zároveň však ke snížení rychlosti odezvy. Ta je totiž určena celým Bernardovým modelem, tedy iontovým a elektrickým náhradním obvodem. Výsledná časová konstanta je pak dána součinem odporu elektrolytu a kapacity kanálu. Vyjdeme-li ze vztahu (1.2), pak tloušťka kanálu d je zde určujícím parametrem pro volbu mezi vyšším zesílením a nižší rychlostí odezvy či naopak, jelikož nižší d zapříčiní menší kapacitu kanálu, vyšší d pak růst transkonduktance a tím i zesílení [1].

V praxi je rychlost odezvy těchto tranzistorů při nejlepším v řádech desítek μs , rychlost odezvy je tedy omezena na frekvence signálu v řádu desítek kHz. Použitím elektrolytu například ve formě gelu dochází k dalšímu snižování rychlosti odezvy, což limituje oblast jejich použití [3]. Pro aplikace na poli biomedicíny jsou však tyto rychlosti dostačující.

2 VLASTNOSTI PEDOT KANÁLU A VYUŽITÍ OECT

V závěru kapitoly 1.2.4 byla jako hlavní oblast využití tranzistorů OECT označena biomedicína. Jelikož tyto tranzistory mají v bioelektronice, biomedicíně a výzkumu značný potenciál, je následující část práce zaměřena na podrobnější rozbor jednoho z nejpoužívanějších materiálů pro kanály těchto tranzistorů. Dále pak na jednotlivé způsoby využití OECT.

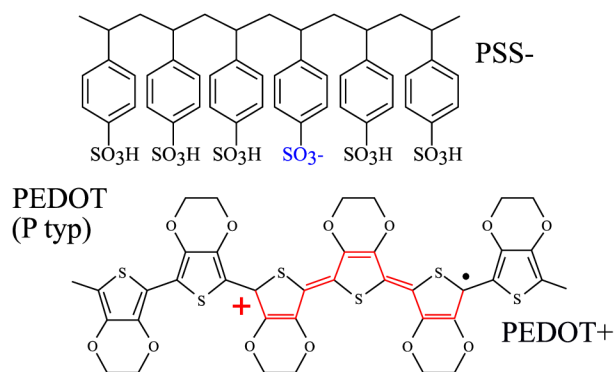
2.1 Materiál PEDOT:PSS

S vývojem elektroniky pro bioelektroniku dochází také k vývoji nových materiálů za účelem modifikace parametrů těchto součástek. V případě OECT je hojně využíván materiál PEDOT:PSS, který se stal neúspěšnějším materiálem pro konstrukci těchto tranzistorů s využitím zaměřeným na bioelektroniku. Oproti jiným vodivým polymerům, například polypyrrolu či polyanilinu disponuje tento tři desetiletí vyvíjený polymer některými výhodami. Mezi tyto výhody patří například nízká náchylnost k oxidaci, stabilita v oxidovaném stavu a pro bioelektroniku rozumná šířka přenášeného pásma. Dále se vyznačuje vysokou konduktivitou 400 S/cm – 600 S/cm a výhodná může být také jeho průhlednost v případě tenkých vrstev oxidovaného materiálu [13].

2.1.1 Příprava a výroba

Samotný PEDOT disponuje i některými nedostatky. Nejvýznamnější je nerozpustnost tohoto polymeru ve vodě a dalších roztocích. Tato vada je kompenzována polymerizací monomeru EDOT v roztoku polystyren sulfonátové (PSS) kyseliny. Polymerizace je prováděna elektrochemickou oxidací nebo chemickou oxidací s přidáním oxidantu. Během vzniklé chemické reakce je tento monomer oxidován PSS kyselinou a vzniká tak emulze, která je dobře rozpustná ve vodě. Emulze je tmavě modré barvy a je vhodná k průmyslovému využití, například pro depozici metodou spin coating.

Výsledný materiál PEDOT:PSS je složen z kladně nabitých řetězců PEDOT a záporně nabitých řetězců PSS. Tyto dva typy řetězců jsou spojeny prostřednictvím Coulombovských sil (iontovými vazbami). PSS zde kromě zajištění rozpustnosti slouží také jako modifikátor koncentrace nosičů náboje, jelikož představuje pro PEDOT zdroj iontů opačného náboje. Chemická stavba tohoto materiálu je znázorněna na obrázku 2.1 [13],[14].



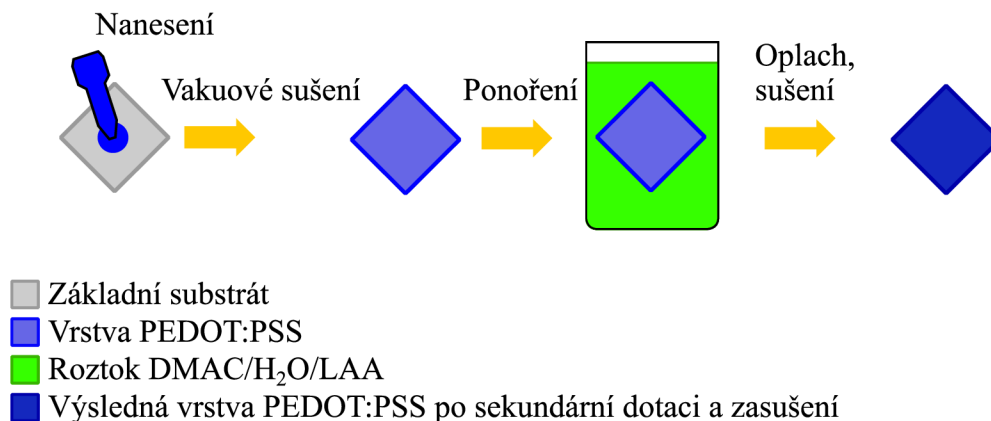
Obrázek 2.1: Chemická stavba materiálu PEDOT:PSS [6]

2.1.2 Sekundární dotace

V některých případech existuje požadavek na dodatečnou modifikaci vodivosti materiálu PEDOT:PSS. K tomuto účelu se využívá sekundární dotace, která má vliv na výslednou elektrickou vodivost a dále pak na termoelektrické vlastnosti zhotovovaných struktur [14]. Sekundární dotaci lze provádět dvěma způsoby.

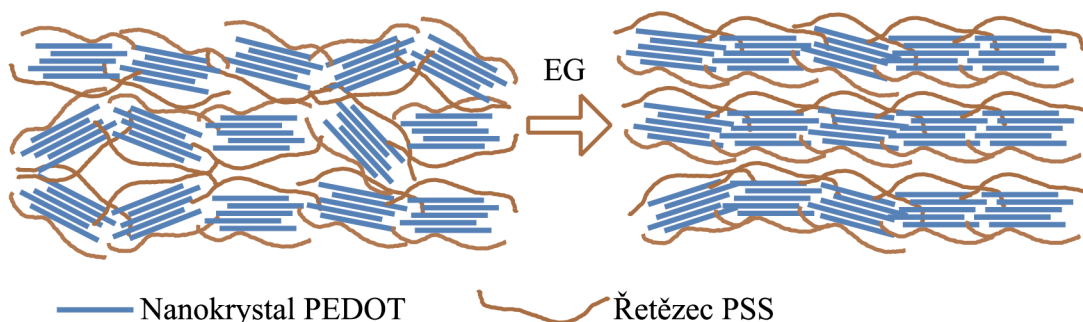
Prvním je přidání druhého typu dopantu do roztoku PEDOT:PSS, tedy před jeho použitím. Při této metodě dotování roztoku se jako sekundární dopant využívají organické polární látky jako dimethylsulfoxid (DMSO) nebo etylen glykol (EG). Ve speciálním případě bývá používána kombinace DMSO s oxidem polyetylenu (PEO). Tímto postupem bylo docíleno zvýšení vodivosti materiálu až na 1300 S/cm se současným zvýšením Seebeckova koeficientu [14].

Druhým způsobem je dodatečná dotace již zhotovené struktury v rámci následujících operací (post – treatment). V tomto případě je tedy upravována již nanosená struktura. Jedna z modernějších metod využívá k tomuto účelu roztok připravený z dimethylacetamidu (DMAC), deionizované vody a kyseliny L-askorbové (LAA). V prvním kroku je na základní substrát nanesen vstupní materiál například pomocí metody spin coating. Ten je následně vakuově sušen, aby bylo zabráněno jeho kontaminaci a došlo k vytvoření optimální vrstvy. Takto připravená struktura je ponořena do připraveného roztoku DMAC, H₂O a LAA. Po následném oplachu a sušení vzniká finální struktura s modifikovanými elektrickými a termoelektrickými vlastnostmi [16],[17], [18]. Tento postup je zobrazen na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Příklad provedení sekundární dotace metodou post – treatment

Účelem obou variant dotace není přímo zvýšení elektrické vodivosti v důsledku růstu koncentrace volných nosičů náboje, ale zlepšení výsledné morfologie tohoto materiálu a tím i pohyblivosti nosičů náboje. Model vylepšené morfologie v případě metody post – treatment je zobrazen na obrázku 2.3. Použitím EG dochází k reorganizaci řetězců PSS, které obklopují nanokrystaly PEDOT, přičemž dochází k jejich seřazení a vrstvovému uspořádání. Tato morfologie s vyšší krystalinitou má za následek snazší přenos elektrického náboje strukturou, tedy vyšší pohyblivost nosičů náboje μ [14],[15],[16],[17].



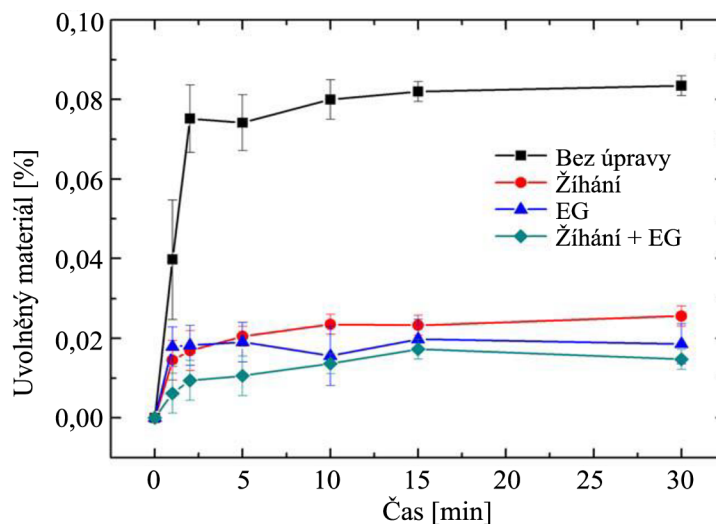
Obrázek 2.3: Model morfologického uspořádání při sekundární dotaci [15]

2.1.3 Stabilita a biokompatibilita materiálu PEDOT

Jednou z nejdůležitějších vlastností pro úspěšnou aplikaci tranzistorů OECT v moderní biomedicíně je kompatibilita s biologickými vzorky. S biokompatibilitou úzce souvisí také stabilita používaných materiálů v běžném prostředí a v prostředí fyziologických roztoků [17], [18].

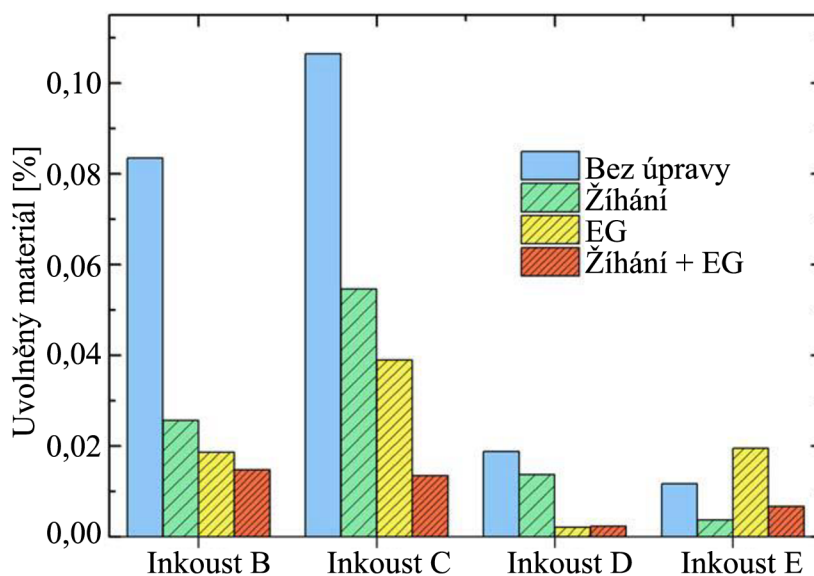
Zatímco pro senzorické a další čistě elektronické aplikace je důležitější většinou stabilita v suchém prostředí, pro bioelektroniku je důležitá stabilita v kultivačních roztocích a fyziologickém prostředí. Materiál PEDOT vykazuje hydrofilní vlastnosti. U tenkých filmů tohoto materiálu po ponoření do vody dochází k jeho absorpci a částečnému rozkladu a dochází k nežádoucím změnám v mechanických i elektrických vlastnostech materiálu [17], [18].

Částečné rozpouštění má navíc za následek uvolňování sloučenin, které se běžně nevyskytují v živých vzorcích, ani kultivačních médiích. K eliminaci tohoto jevu je možné využít ošetření pomocí EG, popsané v kapitole 2.1.2 či tepelné žíhání. Vliv těchto operací a jejich kombinování byl podrobněji sledován ve zdroji [18]. Zde bylo použito 6 materiálů PEDOT:PSS ve formě inkoustu od různých výrobců, z toho jeden (inkoust E) byl vyroben přímo autory práce a byl využíván jako referenční. Inkousty A – F byly na připravené a očištěné vzorky nanášeny metodou spin coating. Výsledkem byly struktury s tloušťkou kanálu 30 nm, délkou 30 mm a šířkami 50, 75, 100, 150 a 200 μm . Pro sledování stability pro bioelektroniku byly později inkousty D a F vyřazeny, jelikož šlo o inkousty s vysokým elektrickým odporem, tudíž nevhodné pro OECT. U zbylých vzorků byla dále sledována stabilita v roztoku demineralizované vody. Míra rozpustnosti byla měřena sledováním objemových procent uvolněného materiálu kanálu do roztoku s ním v kontaktu. Měření bylo realizováno UV – Vis spektrometrií porovnáváním s kalibrační křivkou. Výsledek prvního měření je uveden na obrázku 2.4. Z výsledků lze konstatovat, že k nejvyššímu uvolňování materiálu dochází během prvních 2 minut, po kterých nastává stabilizace množství materiálu v roztoku. Žíhání a přidání EG poté stabilitu výrazně zvýšilo oproti původnímu stavu bez úpravy (pouze po lehkém zapečení po depozici) [18].



Obrázek 2.4: Počáteční uvolňování materiálu ve vodě u inkoustu B [18]

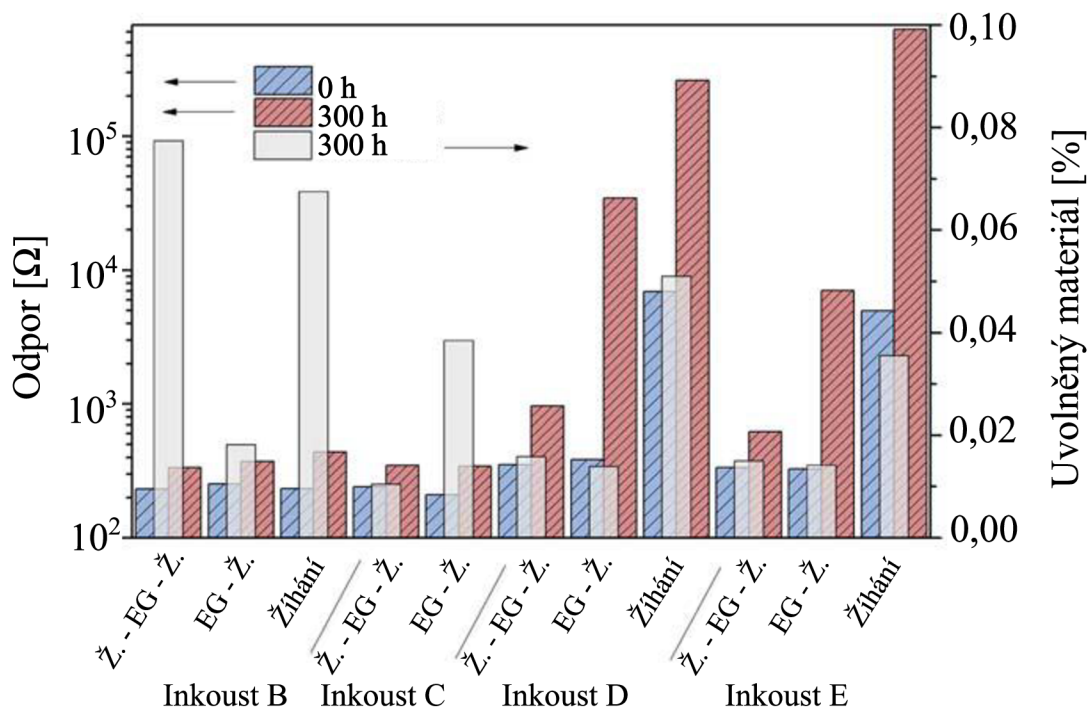
Obrázek 2.5 pak srovnává výsledky pro všechny testované inkousty. Obecně lze říci, že následné operace a jejich kombinace stabilitu zvyšují, je však nutné operace volit vhodně s ohledem na složení použitého roztoku PEDOT:PSS. Například u vzorku E po přidání EG došlo ke zhoršení stability [18].



Obrázek 2.5: Uvolňování materiálu ve vodě po 30 minutách [18]

Obrázek 2.6 pak ukazuje stabilitu po expozici roztoku po dobu 300 h (pravá osa y) při kombinaci žihání a přidání EG. Z výsledků bylo zjištěno, že přidání EG s následným žiháním bylo docíleno vyšší stability. Výjimkou je inkoust C, kde bylo pro vyšší stabilitu nutno provést žihání, následně přidání EG a opětovné žihání. V případě inkoustu A byl výsledný efekt opačný. Vhodnou volbou operací však bylo obecně docíleno vyšší stability

v tomto třísethodinovém pozorování. Absence vzorků bez dodatečných operací je způsobena tím, že bez přidání EG či žihání došlo po 300 hodinách k úplnému rozpuštění neošetřených vzorků [18].



Obrázek 2.6: Stabilita a odpor v čase [18]

Ohledně stability a biokompatibility materiálu PEDOT:PSS lze konstatovat, že v horizontu dní lze dosáhnout při použití vhodných operací a jejich kombinací v rámci post – treatmentu vysoké stability. Konkrétně vzorek B při přidání EG a následném žihání vykazuje stejné objemové množství materiálu (0,02 %) po 30 minutách i 300 hodinách. Získaná data jsou dále významná pro biokompatibilitu. V případě běžné laboratorní praxe zahrnujících kultivaci buněk jsou vzorky s PEDOT:PSS ve formě filmu nejprve sterilizovány. Následně dochází k aplikaci kultivačních proteinů a k následné kultivaci buněk. Znalost množství uvolňovaného materiálu umožňuje posouzení stability materiálu, a tudíž i vhodnost pro následnou kultivaci buněk [18]. Z hlediska dlouhodobé stability v laboratoři lze takováto data považovat z hlediska stability a biokompatibility za dostatečná, jelikož expozice buněk a dalších vzorků je prováděna většinou v řádu dní. V praktickém využití však tyto závěry nemusí být dostačující, jelikož například u nositelné elektroniky může docházet k mnohem delšímu kontaktu za ztížených podmínek.

2.2 Bioelektronika a biomedicína

Hlavním oborem biomedicíny pro účely využití OECT je elektrofyziologie. Aplikace v tomto oboru se obecně dělí na sledování biologických vzorků v kádince v rámci laboratoře (tzv. *in vitro*) a sledování v živých organismech (tzv. *in vivo*). Tato práce se dále zabývá především *in vitro* aplikacemi [3].

Kromě sledování aktivity buněk existují i uplatnění pro jejich stimulaci. Snímání a stimulování aktivit živých buněk umožňuje rozvoj bioelektronických rozhraní.

2.2.1 Vyhodnocování aktivity nervových buněk

V medicíně je v dnešní době možné sledovat elektrickou aktivitu některých buněk. Zejména se nabízí sledování elektrické aktivity mozku, k čemuž slouží v současnosti známé metody EEG (elektroencefalografie) či ECoG (elektrokortikografie). EEG je metodou neinvazivní, ECoG pak invazivní. Znamější metodou je v tomto případě EEG, ta sleduje změny napětí v čase pomocí pole elektrod, které jsou umístěny na hlavě pacienta. Tyto změny napětí reflektují aktivitu neuronů v mozku. Pomocí těchto metod lze například předvídat možnosti vzniku epileptických záchvatů či mapovat oblasti mozku pro případné chirurgické zákroky [4].

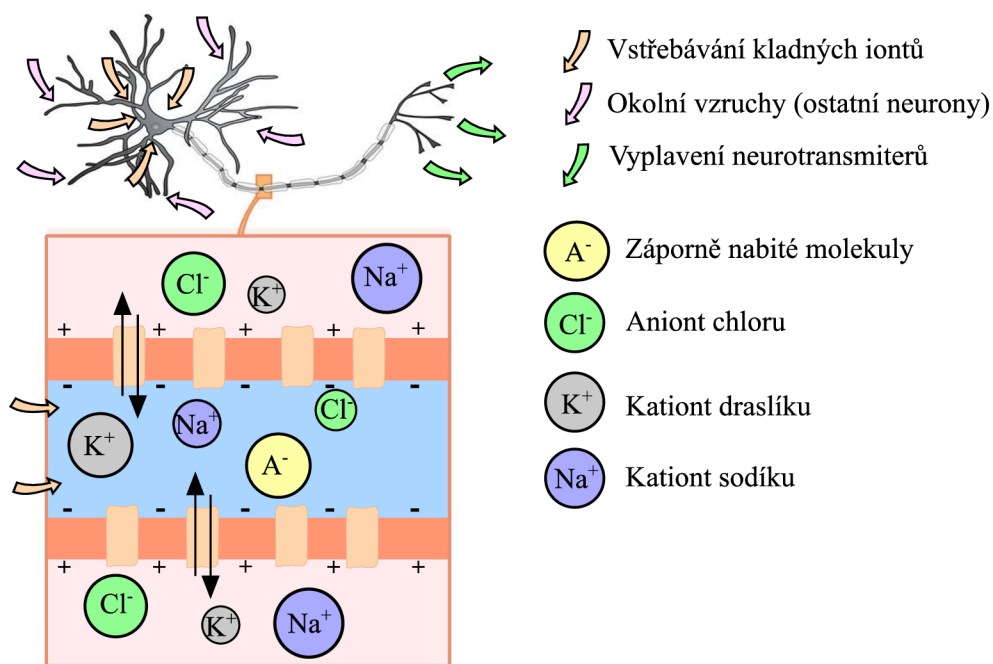
Sledované signály jsou zejména alfa vlny (frekvenční rozsah 8 – 15 Hz) a gama vlny (>32 Hz). Amplitudy těchto měřených signálů dosahují až jednotek mV. Používané elektrody mívají běžně průměr i několik cm. Vzhledem k jejich velikosti a vnější aplikaci na pokožku s vlasy může docházet k nežádoucímu nárůstu impedance kontaktu a tím i ke zhoršení výsledků měření. OECT při volbě vhodných materiálů umožňují lepší adhezi elektrod s menší impedancí. Užitečná je také jejich vyšší odolnost mechanickým deformacím při manipulaci s elektrodami. Při současném použití magnetoencefalografie vykazují elektrody s tranzistory na bázi PEDOT:PSS lepší kompatibilitu s magnetickým polem [3]. Postupný výzkum navíc naznačuje možnost aplikace takovýchto elektrod do nositelné elektroniky, která by umožňovala EEG měření v rámci běžného života.

ECoG na rozdíl od EEG je invazivní metodou. Pole elektrod je umísťováno přímo na mozek pacienta. Vzhledem k invazivní povaze vyšetření je nutné při použití OECT dbát na biologickou kompatibilitu elektrod s živou tkání pacienta. Při volbě nevhodné kombinace materiálů a elektrolytu může docházet k reakci s imunitním systémem pacienta. Jedním z fyzikálních požadavků na OECT a celou soustavu elektrod je mechanická ohebnost, díky které dojde ke správnému kontaktu s povrchem mozku [3].

2.2.2 Příklad využití OECT pro EEG snímání

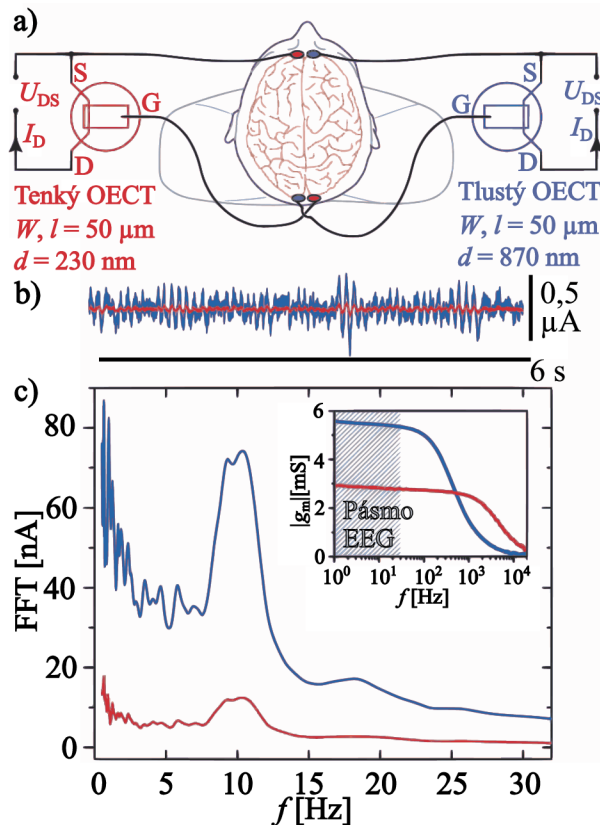
Vedení vzruchů neuronů je založeno na změnách koncentrací iontů vápníku, sodíku, draslíku a chloru za cenu vlastní metabolické energie. Tento náboj jsou neurony schopné přemísťovat prostřednictvím membrán. Na těchto membránách vzniká i v klidovém stavu rozdíl napětí s typickou klidovou hodnotou -70 mV. Ten je způsoben zejména existencí záporně nabitých molekul uvnitř buňky. Na základě vnějších stimulů může v neuronových membránách dojít k další polarizaci či depolarizaci. Na neuronech dále může docházet ke vzniku akčního potenciálu, který může způsobit napěťové špičky 1-2 ms dlouhé, s amplitudou až 150 mV. Po tomto výkyvu dochází k opětovné repolarizaci a návratu ke klidové hodnotě. Tato napěťová změna je dána chováním iontových kanálů, kterými kladné a záporné ionty prochází z vnitřku buňky do vnějšího prostředí a obráceně. Tyto kanály fungují vlastně jako jakési ventily řízené rozdílem napětí uvnitř a vně buňky. Klidový stav lze tedy narušit uměle z vnějšku, což může být využito například v neuromorfních aplikacích (kapitola 2.4) nebo například vnitřním stimulem během předávání informace mezi neurony. Jsou-li vnější stimuly dostatečně silné, dojde k vyplavení neurotransmiterů, které mohou způsobovat svalové stahy [3],[23]. Situace je znázorněna na obrázku 2.7.

OECT pak po připojení na pokožku těla mohou detekovat vnější změny v elektrickém poli, které jsou dány součtem nervových vzruchů neuronů a tyto změny přímo u zdroje zesilovat. Toto je jednou z výhod OECT oproti běžným metalickým elektrodám, kterými je signál pouze veden a zesílení probíhá až ve vyhodnocovací elektronice v rámci předzesílení. Dalším rozdílem je, že konvenční elektrody snímají přímo malé rozdíly napětí, naproti tomu OECT převádí tyto změny na zesílený proud. Při invazivním ECoG popsaném v předchozí kapitole je pak možno docílit vyšší citlivosti a detekovat impulzy i desítek neuronů [3],[23],[24].



Obrázek 2.7: Neuron a ionty v tělní tekutině [24]

Pokus s EEG snímáním s využitím OEET byl prováděn ve článku [24]. Zde byla použita dvojice tranzistorů, připojená na hlavu dobrovolníka dle zapojení na obrázku 2.8 a). Tranzistory jsou ovládány změnou napětí na G a vyhodnocuje se jejich proudová odezva při $U_{DS} = -0,6$ V. Na obrázku b) je pak šestisekundový záznam měřených signálů. Zmíněné tranzistory mají stejnou délku a šířku tranzistorového kanálu, liší se však tloušťkou. Dle vztahu (1.2) lze pak předpokládat vyšší transkonduktanci pro tlustší tranzistor, což je potvrzeno frekvenční charakteristikou na obrázku c). Zde je navíc spektrální Fourierova analýza z minutového měření EEG pro spektrum šířky 30 Hz. Tento rozsah odpovídá klinicky vyhodnocovaným signálům během EEG měření. Na výsledném spektru pro tlustější tranzistor lze vidět výraznější špičku kolem 10 Hz, která odpovídá α vlnám. Ty jsou aktivní v klidovém, bdělém stavu pacienta. Kromě samotného zesílení vykazuje tlustější tranzistor také bohatější spektrum při nižších frekvencích signálu [24].

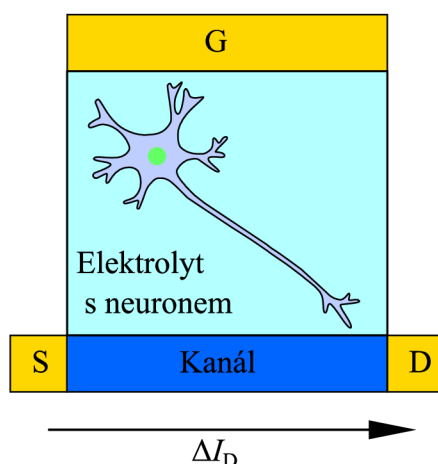


Obrázek 2.8: Zapojení OECT při EEG měření a získané signály [24]

2.2.3 Principy snímání aktivity nervových buněk

Aktivitu nervových buněk lze detekovat umístěním těchto buněk do elektrolytu mezi rozhraní kanálu a elektrody G (obrázek 2.9). Zde změny elektrické aktivity způsobují měřitelnou změnu drainového proudu změnou v polarizaci elektrolytu (dielektriku). Změna polarizace v souladu s principem funkce těchto tranzistorů totiž způsobuje změnu transkonduktance v kanálu tranzistoru.

Vzhledem k malým potenciálům, které jsou generovány při sledování neuronů a činnosti mozku je zde kritickým parametrem odstup signál – šum SNR (Signal to Noise Ratio). OECT jako náhrada běžných elektrod z platiny, zlata či iridia skýtá výhodu v podobě lokálního zesílení snímaných signálů, na které jsou tyto tranzistory potenciálně citlivější [4]. Jako příklad dosažení perfektních výsledků lze uvést použití neurální elektrody z organického polovodiče pro snímání činnosti mozku v kombinaci s OECT s kanálem PEDOT:PSS. Společně s pozlacením elektrod zlatem bylo dosaženo o řád menší impedance při frekvencích signálu 1 kHz. Díky kombinaci těchto faktorů bylo možné měřit jednotlivé napěťové špičky způsobené depolarizací elektrolytu (dielektrika) jednotlivými neurony [3].

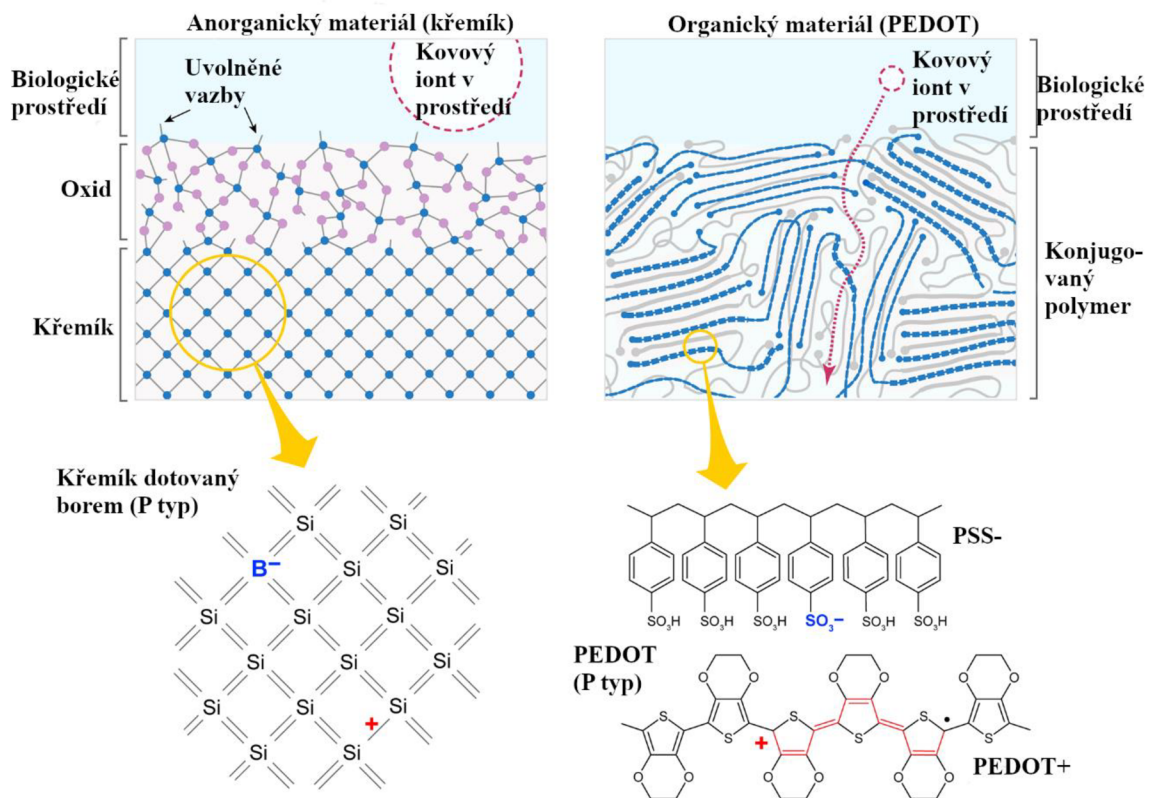


Obrázek 2.9: Princip sledování činnosti neuronů [1]

2.2.4 Vysvětlení výhody organických materiálů v bioelektronice

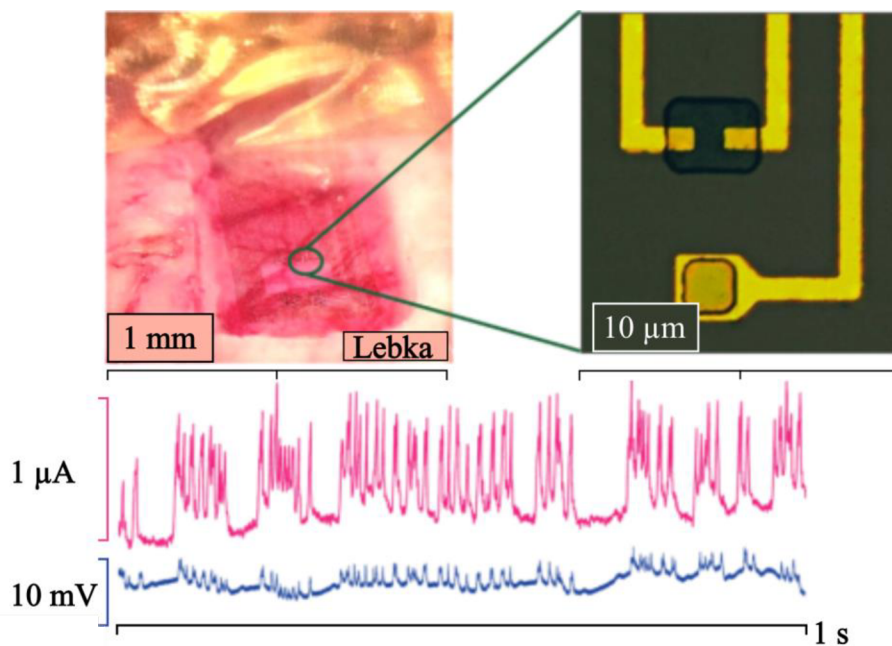
V kapitole 2.2.1 byly vysvětleny konkrétní výhody tranzistorů OECT pro snímání mozkové aktivity z hlediska parametrů jako je impedance či odstupů signál – šum. Zásadní výhodou těchto tranzistorů (a organických materiálů obecně) je samotné snímání signálů z tkání. Jako příklad kontaktu materiálu s tkání (elektrolytem) poslouží obrázek 2.10. Oba materiály jsou zde v kontaktu s rozpuštěnými ionty v roztoku elektrolytu, přičemž velikost těchto iontů na obrázku reprezentuje reálné velikostní poměry.

Struktura křemíku je formována prostřednictvím kovalentních vazeb, kdy dochází ke sdílení valenčních elektronů čtyř sousedních atomů. Naproti tomu polymer PEDOT:PSS je složen z makromolekulárních bloků, jejichž atomy spolu tvoří kovalentní vazby. Tyto bloky jsou k sobě vázány slabými van der Waalsovými vazbami. Výhodou organických materiálů je zde tedy možnost realizace rozhraní s elektrolytem bez vrstvy oxidu, který navíc při kontaktu s roztokem u anorganických materiálů může degradovat a rozpouštět se v roztoku. Následné pronikání iontů umožňuje změny v dotaci kanálu, tedy v celé struktuře, namísto pouhého rozhraní materiálů. Povrch organických materiálů dále neobsahuje volné vazby, u kterých by hrozilo zabudování iontů. Některé materiály dále podporují schopnost iontů z roztoku pronikat díky svým hydrofilním vlastnostem [6].



Obrázek 2.10: Organické a anorganické materiály pro biologická rozhraní [6]

Experimentálně byly tyto vlastnosti zkoumány za pomoci pole OEET, které bylo využito pro snímání aktivity mozku krysy. Červená křivka reprezentuje změny proudu I_D tranzistoru OEET vlivem aktivity nervových buněk, modrá křivka na obrázku 2.11 pak reprezentuje napěťový signál běžných elektrod. Z průběhů lze vidět jednoznačně zesílené proudové pulzy, které jsou od sebe lépe rozlišitelné. V případě běžných elektrod je pak vidět také horší detekce slabších impulzů a horší odstup signál – šum, jelikož napěťové špičky jsou oproti pomyslné klidové hodnotě signálu menší [6].



Obrázek 2.11: Aktivita mozku krysy měřená pomocí OECT a běžných elektrod [6]

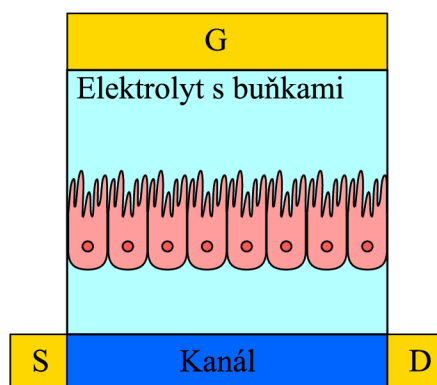
2.2.5 Monitorování vlastností tkání pomocí impedančního měření

Měřením elektrické impedance lze sledovat morfologii buněk, integritu tkáně a pohyb buněk. Princip sledování zmíněných vlastností je využíván například při pozorování elektricky neaktivních tkání a buněk, kde nahrazuje dosavadní optické metody. Metody jsou využívány zejména pro toxikologické účely [7].

Elektroimpedanční snímání (EIS) se zabývá sledováním reakcí na rozhraní elektrody a elektrolytu. Metoda spočívá v přivedení malého střídavého signálu na sledovaný materiál (například živou tkáň) a měření proudové odezvy systému v definovaném rozsahu frekvencí. Kompatibilitě s biologickými systémy nahrává skutečnost, že amplitudy používaných střídavých signálů jsou typicky menší než 50 mV. Ke změnám v impedanci dochází v důsledku přítomnosti buněk na nebo v blízkosti elektrody G. Situace je znázorněna na obrázku 2.12. Odporová složka impedance je dána zhoršením pronikavé schopnosti iontů při přechodu z prostředí do struktury při změnách řídicího napětí, jelikož je do cesty těchto iontů umístěna vrstva buněčného materiálu. Reaktanční složka impedance je pak přisuzována faktu, že buněčná vrstva představuje v materiálu dielektrikum, chová se tedy jako kondenzátor a tato složka má tak kapacitní charakter. Účinnou reprezentací impedančních měření jsou Bodeho frekvenční charakteristiky, znázorňující velikost impedance v závislosti na frekvenci. Příklad měření a výsledné charakteristiky jsou na obrázku 2.13. Tyto charakteristiky jsou měřeny v prostředí s definovanou vlhkostí a atmosférou s obsahem 5 % CO_2 při teplotě 37°C . Pracovní bod tranzistoru dle zapojení a) na obrázku 2.13 byl nastaven s $U_{\text{DS}} = -0.6 \text{ V}$, vstupní sinusové napětí amplitudy 10 mV s krokovanou frekvencí v rozsahu 2 Hz – 20 kHz. Pomocí měření

vstupního proudu I_G , napětí U_G a proudu I_D bylo možné vykreslit příslušné charakteristiky b) – d) na obrázku 2.13. Transkonduktance a impedance byla stanovena pomocí vztahů (2.1) a (2.2). Jako modelový systém zde posloužily buňky psích jater MDCK I, které byly kultivovány na struktuře kanálu OECT v nanosené vrstvě kolagenu po dobu 3 dnů. Výsledkem je homogenní vrstva buněk s těsným uspořádáním [1],[7].

Z výsledků měření lze konstatovat, že pro nízké frekvence (pod mezní frekvenci) je transkonduktance velká a konstantní, malé vstupní signály jsou tedy zesilovány v podobě proudu I_D . Přidáním vrstvy buněčné tkáně dochází k posunu mezní frekvence na nižší kmitočty, v tomto případě zhruba o 2 řády. Impedance je pak nejnižší pro vysoké frekvence a dochází zde také k menším chybám měření. Přidáním buněčné tkáně dochází na průběhu impedance k vytvoření rovinné oblasti v široké oblasti kmitočtů [7].



Obrázek 2.12: Vrstva buněčné tkáně při měření impedance [1]

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_G} \text{ [S]} \quad (2.1)$$

Kde g_m [S] je transkonduktance

ΔI_D [A] je změna proudu drainem

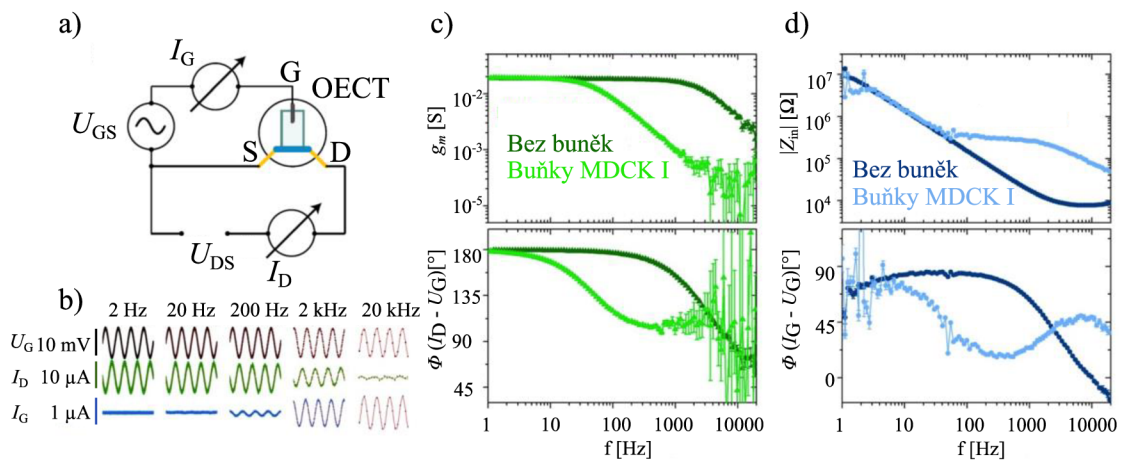
ΔU_G [V] je změna řídicího napětí.

$$|Z| = \frac{\Delta U_G}{\Delta I_G} \text{ [\Omega]} \quad (2.2)$$

Kde $|Z|$ [Ω] je absolutní hodnota impedance

ΔI_G [A] je změna řídicího proudu

ΔU_G [V] je změna řídicího napětí.



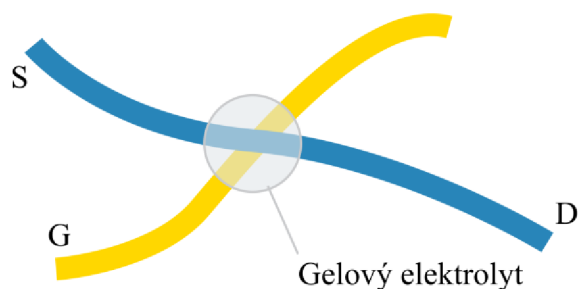
Obrázek 2.13: a) Schéma zapojení. b) Příklad vstupních signálů a reakce výstupního proudu pro 5 různých frekvencí. c), d) Porovnání EIS křivek a fázových posunů.

2.3 Elektrické obvody a digitální logika

Vlastnosti jako vysoká transkonduktance a nízké provozní napětí umožňuje také využití OEET v některých elektronických obvodech. Ačkoliv nízké rychlosti spínání neumožňují využití na poli digitálního zpracování vysokofrekvenčních signálů, jejich kombinace s integrovanými obvody na bázi křemíku umožňuje jejich využití pro nositelnou elektroniku či displeje, tištěné na ohebné substráty. V některých případech jsou OEET dokonce využívány pro realizaci základních logických členů nebo v aplikacích pracujících se senzory [1].

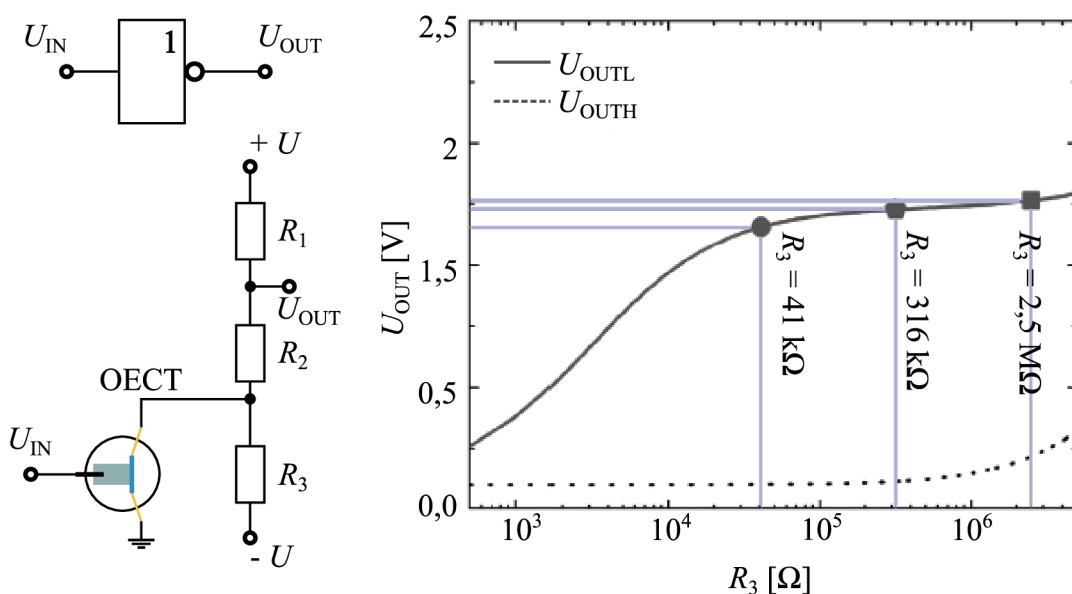
2.3.1 Digitální obvody

Uplatnění v digitálních obvodech nachází OEET především v aplikacích s flexibilními substráty. Jako substrát nejčastěji slouží papír, plastové fólie, textil, ale i tkané struktury. Poslední zmíněné struktury využívají paralelní uspořádání tkaných vláken na bázi PEDOT:PSS v kombinaci s elektrolytem například ve formě gelu. Tato konstrukce je v principu zobrazena na obrázku 2.14 a je využívána také pro aplikace zaměřené na snímání sensorových polí a další podobné aplikace. Zde tranzistory OEET mohou sloužit jako adresační spínače a řadiče, které realizují adresování sensorů či jiných prvků v maticovém uspořádání v rámci příslušných řádků a sloupců [1],[8].



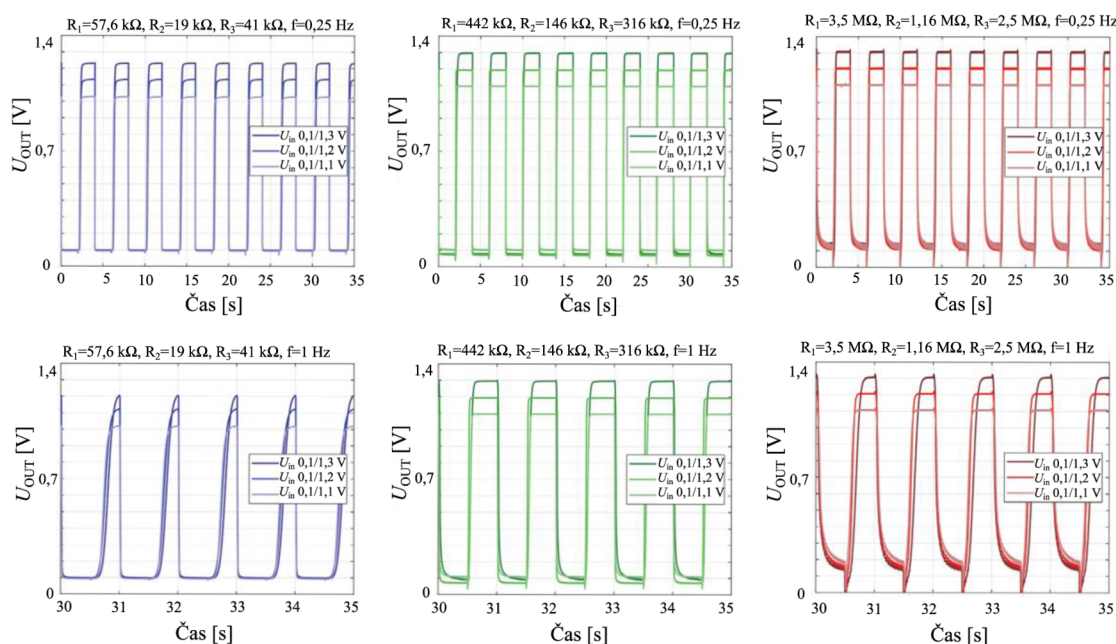
Obrázek 2.14: Typické paralelní uspořádání vláken tkaniny [1]

Jedním ze základních prvků digitálních obvodů je invertor. Praktické použití OECT je v tomto případě možné například ve struktuře zobrazené na obrázku 2.15. Základem je samotný tranzistor připojený na jeden z odporů napěťového děliče, který je tvořen třemi rezistory. Velikost výstupního napětí je v tomto případě definována řídicím napětím tranzistoru, napájecím napětím děliče a hodnotami rezistorů R_1 , R_2 a R_3 , respektive jejich poměrem. Při připojení nízkého vstupního napětí U_{INL} je tranzistor sepnut, výstupní napětí děliče je pak určeno kombinací odporů R_1 , R_2 a odporem kanálu sepnutého tranzistoru. V opačném případě, tedy po připojení napětí U_{INH} je tranzistor zavřený, jeho kanál je ve stavu vysoké impedance a výstupní napětí je dáno třemi rezistory děliče. Pro OECT s plochou kanálu $150 \times 80 \mu\text{m}$ jsou typické hodnoty odporu kanálu v sepnutém stavu (R_{ON}) přibližně $2 \text{ k}\Omega$ při $U_G = 0 \text{ V}$ a $U_{DS} = -0,1 \text{ V}$, v rozeprnutém (R_{OFF}) pak přibližně $50 \text{ M}\Omega$ při $U_G = 1,2 \text{ V}$ a $U_{DS} = -1,5 \text{ V}$.

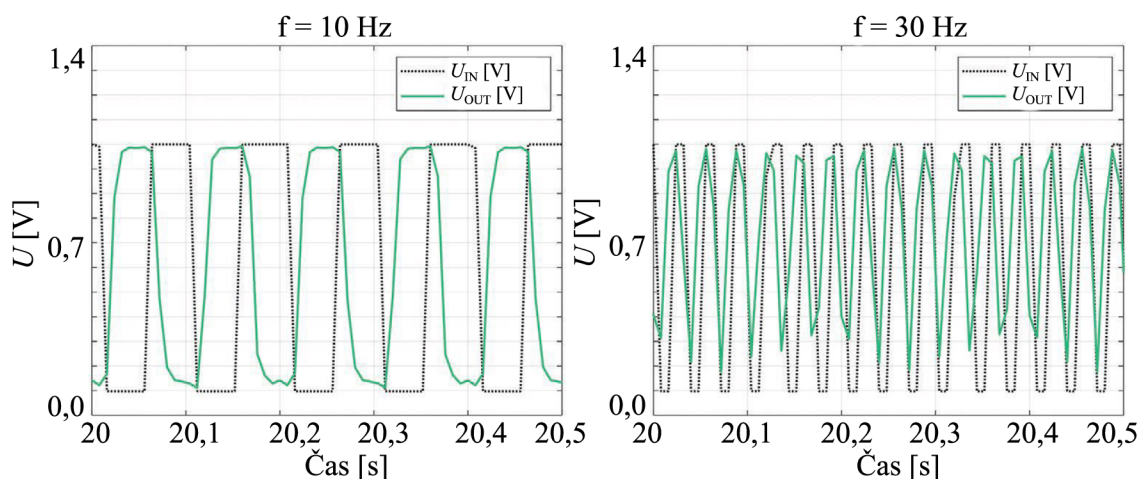


Obrázek 2.15: Zapojení OECT ve struktuře invertoru a závislost U_{OUT} na odporu R_3 [8]

Pro stanovení optimálních hodnot rezistorů lze využít charakteristik na obrázcích 2.16 a 2.17. Zde je nejprve znázorněno měření při frekvencích vstupního signálu 0,25 a 1 Hz. Testováno je vstupní napětí s úrovní U_{INL} 0,1 V a U_{INH} 1,1, 1,2 a 1,3 V při napájecím napětí můstku v rozmezí $\pm 4,4$ až $\pm 5,3$ V. Z těchto charakteristik lze dále stanovit propagační zpoždění (mezi 10 a 90 % U_{OUT}), které je přibližně 14 ms pro nejmenší hodnoty odporů, 26 ms pro střední a 110 ms pro vysoké hodnoty odporů děliče. Konfigurace rezistorů tedy určuje kromě statické spotřeby i rychlost odezvy, nižší hodnoty odporů znamenají vyšší rychlost, ale také vyšší spotřebu. Výhodou OECT je relativně široké okno pro logické úrovně 0 a 1 při nízkém řídicím napětí (kolem 1 V). Využití je však limitující, jak ukazují charakteristiky na obrázku 2.16. Při frekvencích 30 Hz zde okno mezi logickými úrovněmi na výstupu představuje jen zhruba 70 % vstupního rozsahu U_{GS} [8].



Obrázek 2.16: Napětí U_{OUT} pro různé hodnoty odporů děliče a různé frekvence U_{IN} [8]



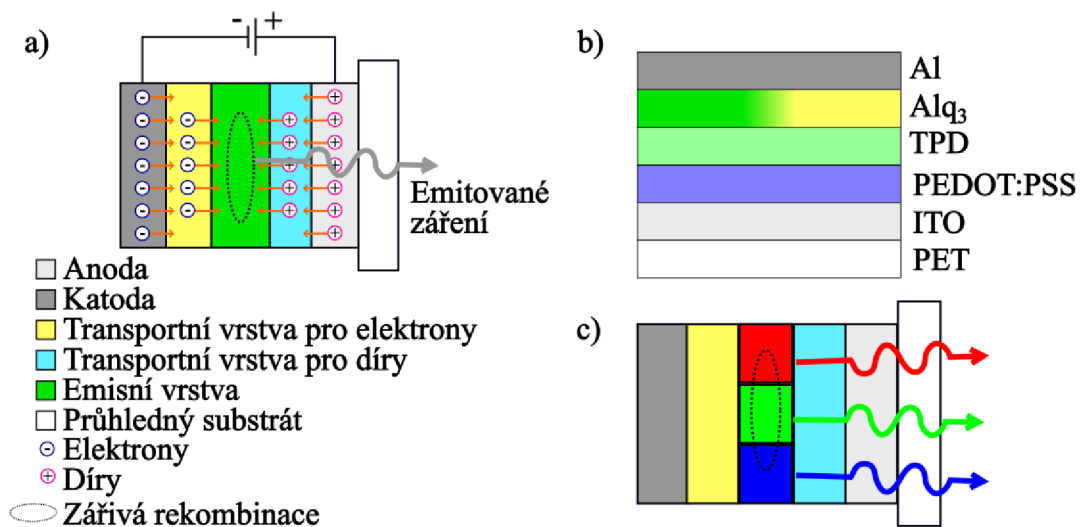
Obrázek 2.17: Napětí U_{OUT} pro střední hodnoty odporů a frekvence 10 a 30 Hz [8]

2.3.2 OLED displeje

Využití pro materiál PEDOT:PSS a další polymery lze nalézt také u moderních OLED displejů. Princip funkce těchto displejů je znázorněn na obrázku 2.18 a).

Mezi katodou (většinou z hliníku) a anodou z dotovaného oxidu inditého (ITO) je vložena vrstva emisního materiálu z organického polovodiče. Na tento polovodič lze nahlížet analogicky jako na anorganický, co se týče pásového modelu. Jediným rozdílem je, že se v tomto modelu místo atomů zabýváme molekulami organického materiálu. Elektronů v tomto modelu se nacházejí na takzvaných HOMO a LUMO hladinách. Hladina HOMO je stabilní hladina, která je ekvivalentem valenčního pásu polovodiče. LUMO pak představuje excitační hladinu, která je ekvivalentem vodivostního pásu. Po připojení zdroje napětí dochází k přesunu elektronů z HOMO do LUMO hladiny přes vnější obvod, ty za sebou zanechávají díry. Po přivedení těchto elektronů přes katodu do LUMO hladiny dojde k jejich opětovné zářivé rekombinaci s vytvořenými dírami. Tím vzniká při vhodném rozdílu energie mezi pásy záření ve viditelném spektru. Přechodu elektronů přes rozhraní elektrod brání energetická bariéra, proto bývá emisní vrstva vložena mezi dvě transportní vrstvy, které umožňují větší efektivitu přechodu. Anoda je z průsvitného materiálu a umožňuje výstup generovaného záření [22].

Jednotlivé pixely displeje jsou pak zpravidla tvořeny jednou strukturou nebo třemi takovými strukturami vedle sebe. Při jedné buňce je vyzařováno bílé světlo, které je na výstupu filtrováno RGB filtrem, který zapříčiní míchání barev. Alternativou jsou tříbarvkové struktury, které vyzařují červené, zelené a modré světlo. Tříbarvková struktura je zobrazena na obrázku 2.18 c). Výsledné barevné spektrum světla je pak dáno splynutím těchto složek v malém bodě, tvořící pixel. Jednotlivé pixely jsou uspořádány v matici utvářející displej, který je opatřen polarizačním filtrem [22]. Modernějším nástupcem těchto displejů jsou displeje AMOLED, kde jsou jednotlivé pixely ovládány tranzistory.



Obrázek 2.18: a) Princip OLED. b) Příklad konstrukce OLED s materiálem PEDOT:PSS. c) Tříbunňková struktura pixelu.

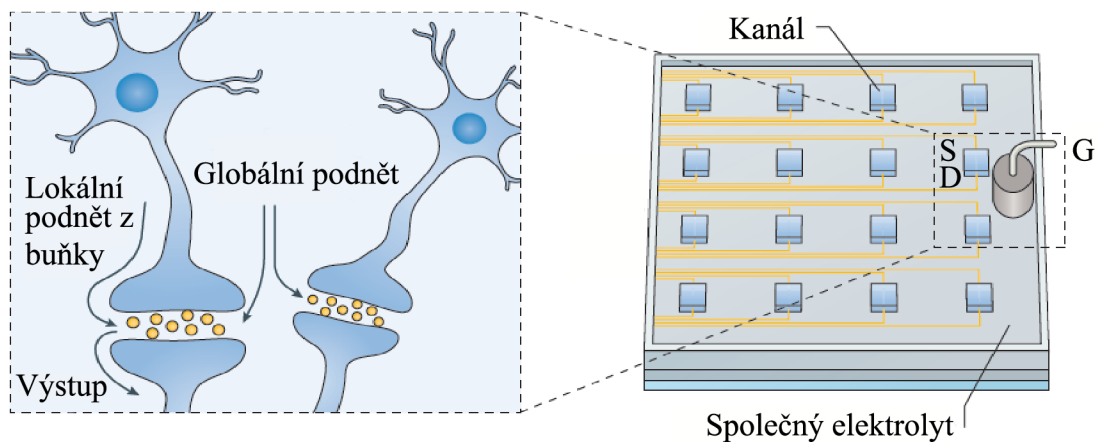
Obrázek 2.18 b) pak zobrazuje příklad použití materiálu PEDOT v článku [22]. Zde je mezi hliníkovou katodou a anodou z ITO vložena vrstvá struktura. Vrstva PEDOT:PSS slouží jako injekční vrstva pro díry. Vrstva z difenylbenzidinu (TPD) je transportní vrstva pro díry. Vrstva tris(8-Hydroxyquinolate) aluminum (Alq₃) sdružuje funkci emisní vrstvy a transportní vrstvy pro elektrony. Celá struktura je zhotovena na substrátu z polyetylentereftalátu (PET).

Výsledkem takto modifikované struktury je vyšší intenzita generovaného optického záření, pokles zapínacího napětí a tím i celkové spotřeby při stejné intenzitě výstupního záření [21].

2.4 Neuromorfní aplikace

Inovativním způsobem využití jsou neuromorfní aplikace, jejichž cílem je napodobování struktury a funkce nervového systému. Tyto systémy jsou založeny na permanentních a dočasných změnách elektrických parametrů, které simulují dlouhodobou a krátkodobou paměť mozku. V případě OEET k těmto změnám dochází vlivem působení iontů elektrolytu, proto jsou pro tuto aplikaci jedním z využitelných prvků [1].

Kombinací různých materiálů elektrolytu a kanálu lze modifikovat vlastnosti OEET pro simulování různých funkcí lidského mozku. Příkladem lze uvést již zmíněnou krátkodobou a dlouhodobou paměť. U OEET pro neuromorfní aplikace s kanálem PEDOT:PSS dochází k paměťovému efektu, který trvá řádově několik sekund. Nahrazením tohoto materiálu modifikovaným polymerem, který po nabití projde strukturální změnou lze tento čas prodloužit na několik hodin. Příklad struktury, která je schopna sledovat aktivitu jednotlivých buněk a zároveň umožňuje buňky globálně stimulovat pomocí elektrody G je uvedena na obrázku 2.19. Zde dochází ke stimulování neurotransmiterů (na obrázku vyznačeny žlutě) a to buď individuálně samotnými neurony nebo pomocí přiloženého napětí na G [1].



Obrázek 2.19: Příklad struktury neurální sítě s možností globální kontroly [1]

3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OECT

3.1 Měřicí vybavení

Pro měření charakteristik OECT bylo využito zařízení Keithley 4200, které je zobrazeno na obrázku 3.1. Jde o analyzátor parametrů používaný zejména k měření a elektrické charakterizaci polovodičových prvků a součástek. Díky až devíti připojeným rozšiřujícím modulům umožňuje přístroj velmi přesná měření stejnosměrných charakteristik, střídavých charakteristik a velmi rychlých přechodových dějů. Obsluhu umožňuje vlastní software Clarius, který umožňuje kromě obsluhy měření i vykreslování měřených dat a provádění operací s naměřenými daty [9].

Tabulka 3.1 Nejdůležitější rozšiřující moduly pro přístroj Keithley 4200

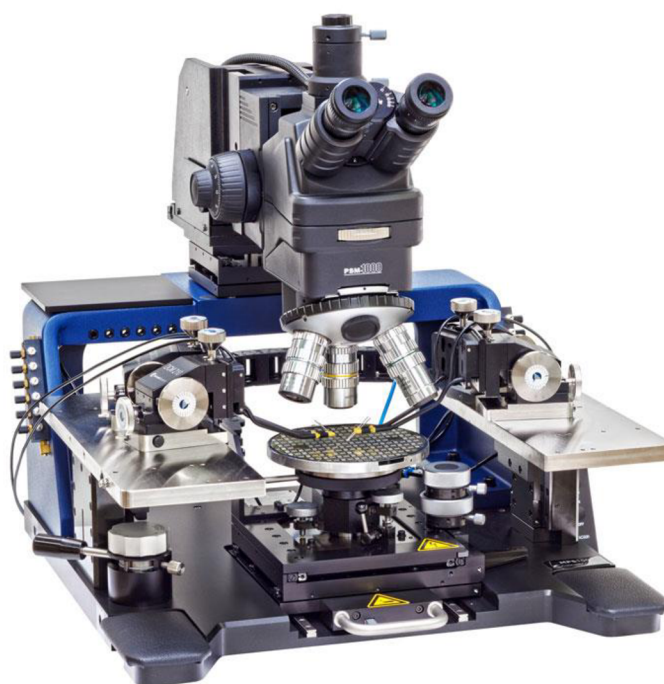
Název modulu	Klíčové specifikace
I – V jednotka pro voltampérová měření (SMU)	$\pm 210 \text{ V}/100 \text{ mA}$ nebo $\pm 210 \text{ V}/1 \text{ A}$
	Rozlišení 100 fA – 10 aA (s předzesilovačem)
	Nízkofrekvenční kapacitní měření 10 mHz – 10 Hz
	4 kvadrantová operace
	2- nebo 4-4-vodičové připojení
C – V jednotka pro impedanční měření (CVU)	Střídavá impedanční měření v režimu C – V, C – f, C – t
	Rozsah frekvencí 1 kHz – 10 MHz
Pulzní I – V měření (PMU)	Měření pomocí dvou nezávislých či synchronizovaných zdrojů
	Vzorkování 200 MS/s, 5 ns
	$\pm 40 \text{ V}$, $\pm 800 \text{ mA}$
	Tranzientní měření se záznamem Programovatelný průběh napětí
Vysokonapět'ový pulzní modul (PGU)	Dvoukanálový vysokorychlostní pulzní zdroj
	$\pm 40 \text{ V}$, $\pm 800 \text{ mA}$
I – V/C – V přepínací modul (CVIV)	Přepínání režimů bez změn zapojení a bez potřeby opakovaného kontaktování měřících hrotů
Dálkově řízený předzesilovač (RPM)	Přepínání mezi jednotkami SMU, PMU a CVU



Obrázek 3.1: Analyzátor parametrů Keithley 4200 [9]

Přístroj na obrázku 3.1 kromě zmíněných vlastností disponuje dotykovou obrazovkou s rozlišením 1920 x 1080 pixelů, porty VGA, DisplayPort, HDMI, audio výstupy, porty Ethernet a USB na zadní straně přístroje. Přední strana je pak opatřena taktéž porty USB pro snazší připojení periférií pro usnadnění obsluhy [9].

Pro samotné kontaktování lze využít zařízení Cascade MPS 150, které je dostupné v laboratořích CEITEC NANO a které umožňuje propojení se zařízením Keithley 4200. Toto zařízení disponuje čtyřmi kontaktovacími hroty, které spolu s optickým systémem umožňují správné kontaktování pracovních elektrod OECT [10].



Obrázek 3.2: Zařízení Cascade MPS 150 [10]

3.2 Specifické cíle práce a metodika prováděných operací

3.2.1 Seznámení se vzorky

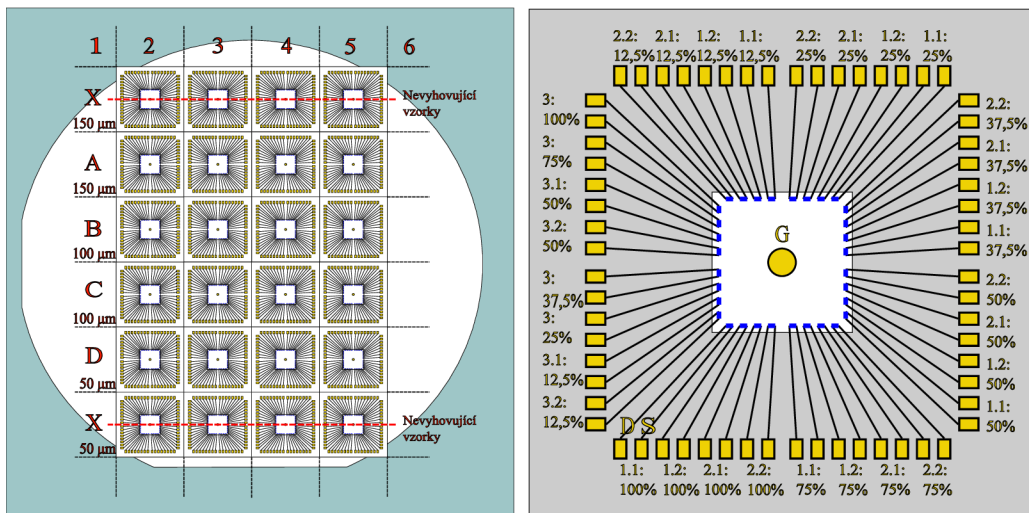
V praktické části práce je sledován vliv geometrie zhotovených vzorků na elektrické parametry. Za tímto účelem byl vyroben wafer, obsahující čipy se dvěma druhy tranzistorů.

Prvním druhem jsou struktury pro sledování vlivu překryvu materiálu kanálu na zlatých kontaktech, přičemž překryvy jsou realizovány dvojím způsobem. Prvním provedením je leptání otvorů do zlatých kontaktů, tím dochází k ubírání kontaktní plochy pro materiál kanálu. Druhým způsobem je naopak vytváření nevodivé vrstvy na těchto zlatých kontaktech pomocí růstu vrstvy SiO_2 .

Druhým typem tranzistorů jsou struktury s proměnnou velikostí parylenových otvorů pro zhotovovaný kanál. Tyto struktury slouží zejména pro ověření závěrů z článku [19], kterým byla část měření inspirována. Závěry z tohoto článku jsou rozvedeny v kapitole 3.2.2. Rozvržení waferu a označení tranzistorů je zobrazeno na obrázku 3.3. Čipy jsou umístěny ve sloupcích 2 – 5, všechny čipy mají konstantní délku kanálu $50\ \mu\text{m}$ a proměnnou šířku kanálu 50 , 100 a $150\ \mu\text{m}$. Šířka je však konstantní v rámci každé řady (A – D). Tloušťka kanálu je dána způsobem depozice. V tomto případě byl použit spin coating při 650 otáčkách/min, čemuž dle křivky závislosti tloušťky nanášeného materiálu na otáčkách odpovídá tloušťka $\approx 350\ \text{nm}$. Označení tranzistorů během příslušných měření

se skládá z písmena T, označení a velikosti překryvu v procentech. Zbylé tranzistory jsou vždy párové, T 1.1 a 2.1 jsou pro daný překryv dvojicemi s kontakty s leptaným zlatem, T 1.2 a 2.2 jsou s kontakty s naneseným SiO₂. Výsledné označení stránek při měření navíc nese i označení čipu. A2 T1.1 12,5 % tedy označuje první tranzistor s kontakty s leptaným zlatem s překryvem kontaktů 12,5 % na čipu A2. Struktury T3 jsou tranzistory pro ověření článku, pokud nesou označení ve formátu 3.x, jde o rozlišení dvojic stejných tranzistorů.

Tranzistory v rámci každého čipu sdílejí společnou elektrodu G, která je při měření umístěna do elektrolytu v umístěném okénku z polydimethyl siloxanu (PDMS). Z měření byly vyřazeny okrajové vzorky označené písmenem X, později také řada C, jelikož se jedná o identickou šířku kanálu s řadou B. Toto rozhodnutí bylo učiněno za účelem urychlení měření a k dosažení shodného množství dat pro následné statistické porovnávání.



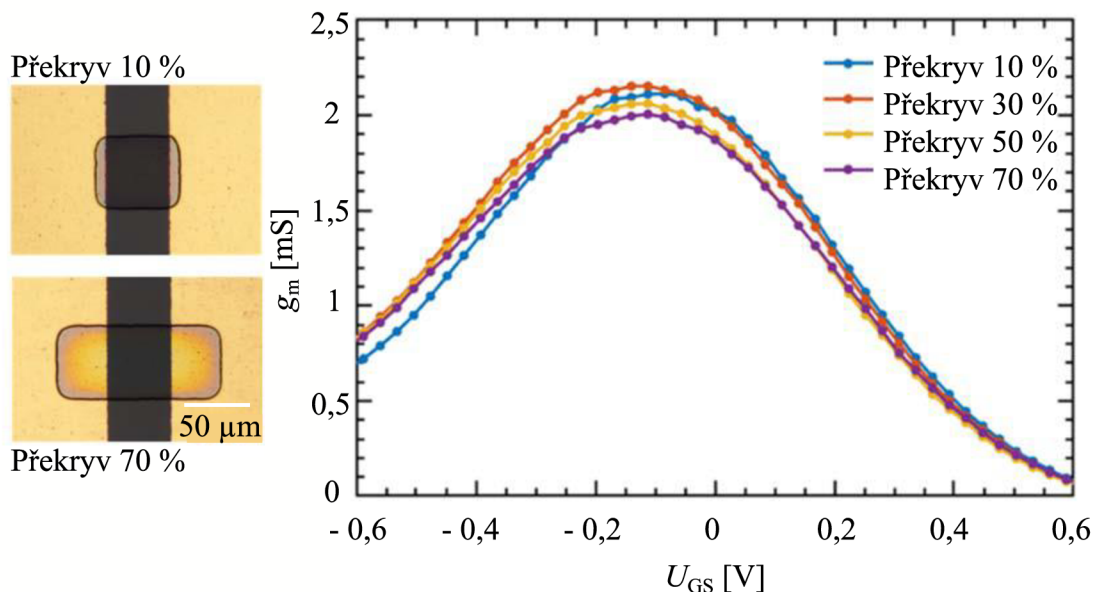
Obrázek 3.3: Rozložení waferu v souřadnicovém systému a označení tranzistorů

3.2.2 Výsledky studie referenčního článku

Jak bylo zmíněno v předcházející kapitole, část měření je zaměřena na ověření výsledků článku. Tento článek byl zaměřena na sledování transkonduktance a šumu OECT v závislosti na velikosti překryvu materiálu kanálu na zlatých S a D elektrodách.

Z obrázku 3.4 lze pozorovat změnu barvy v oblasti otevřeného otvoru v parylenu, což indikuje možnou změnu tloušťky kanálu těchto tranzistorů v důsledku rozdílu ve velikosti parylenového okénka. V takovém případě by neplatil předpoklad konstantní tloušťky těchto vzorků a výsledné charakteristiky by pak nemusely platit. Za předpokladu zachování konstantní tloušťky tranzistorových kanálů získaná data a závěry naznačují, že transkonduktance co do velikosti je jen minimálně ovlivněna velikostí překryvu, je tedy možné teoreticky zhotovovat zařízení s minimálním překryvem kontaktních ploch bez vlivu na výsledné elektrické parametry [19]. Dle obrázku 3.4 byl výsledný rozptyl maximální dosažené transkonduktance pro jednotlivé překryvy přibližně od 1,9 do 2,1

mS, tedy 0,2 mS. Geometrické rozměry vzorků z článku byly l , $w = 50 \mu\text{m}$ a předpokládaná tloušťka $d = 100 \text{ nm}$. Těmto rozměrům tedy nejvíce odpovídají čipy D na druhém z měřených waferů. Zde mají struktury stejnou délku a šířku, avšak rozdílnou tloušťku.

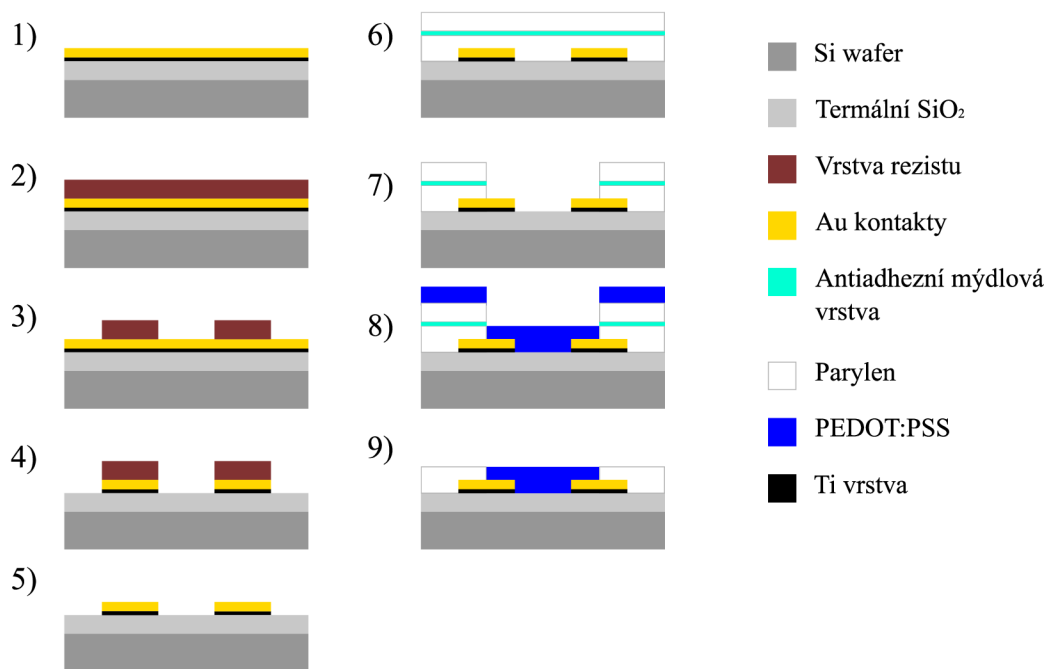


Obrázek 3.4: Konstrukce struktur z článku s různými překryvy kontaktů [19]

3.2.3 Příprava vlastních vzorků

Obecný princip výroby vzorků je zobrazen na obrázku 3.5, v našem případě byly použity další dílčí kroky pro vytvoření kontaktů s leptanými okénky ve zlatých kontaktech a s naneseným Ti/SiO₂. V prvním kroku se na 4-palcovém křemíkovém waferu vytvoří $\approx 3 \mu\text{m}$ tlustá vrstva termálního SiO₂. Poté byla na wafer nadeponována vrstva 20 nm Ti a 80 nm Au. Následuje aplikace fotorezistu pomocí spin coatingu, jeho expozice a vyvolání. Iontovým odprašováním ve čtvrtém kroku a odstraněním rezistu v pátém kroku je dosaženo vytvoření budoucích kontaktů. V následujícím mezikroku byla pomocí metody lift-off vytvořena tenká vrstva napařováním Ti/SiO₂ pro překrytí zlata na vybraných strukturách, což vedlo k vytvoření stejné velké kontaktní plochy pro PEDOT jako na vzorcích s leptaným Au. V šestém kroku je nejprve aplikována první vrstva Parylenu C, na kterou je nanášena antiadhezní vrstva. Tato vrstva umožňuje konečný peel-off (závěrečné sloupnutí) druhé vrstvy Parylenu, který je na tuto vrstvu aplikován. V sedmém kroku je do dvojvrstvy Parylenu vyleptáno okénko, ve kterém se bude zhotovovat kanál, tvořený materiálem PEDOT:PSS, který je v osmém kroku nanášen metodou spin coating. V našem případě byl použit materiál CleviosTM PH 1000 společnosti Heraeus Holding GmbH. Tento materiál kromě PEDOT:PSS obsahuje 5 % hmotnostních EG, 0,1 % hm. dodecyl benzen sulfidu a 1 % hm. trimetoxysilanu (GOPS), který zlepšuje přilnutí k substrátu a stabilitu materiálu ve vodném roztoku.

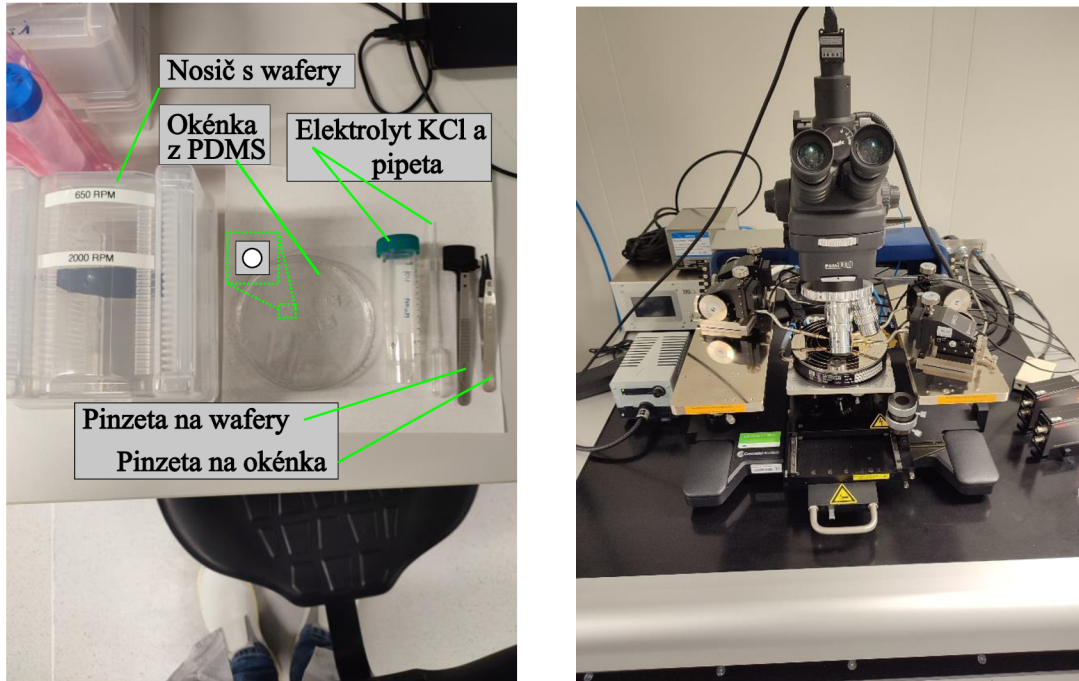
Pro první z waferů byla pro spin coating využita rychlost 650 otáček/min, což odpovídá tloušťce kanálu 350 nm, která byla ověřena pomocí kontaktního profilometru. Pro druhý wafer pak byla použita rychlost 2000 otáček/min s výslednou tloušťkou ≈ 40 nm. Po nanesení následovalo v obou případech vypečení 2 min při teplotě 90 °C, teprve po tomto kroku následoval konečný peel-off. Následně bylo prováděno žihání po dobu 45 min při teplotě 140 °C. Celý proces byl zakončen oplachem v deionizované vodě přes noc, kterým bylo docíleno odebrání nízkomolekulárních zbytků z organické vrstvy.



Obrázek 3.5: Postup výroby vzorků

3.2.4 Popis měření v čistých prostorách

Pro měření transkonduktance, výstupních, přenosových a pulzních charakteristik byla využita kontaktovací hrotová stanice Cascade MPS 150 a analyzátor parametrů Keithley 4200. K přípravě vzorků při každém měření bylo využíváno pomůcek na obrázku 3.6 (vlevo). Měřený wafer byl nejprve vyjmut z příslušného nosiče a umístěn na pracovní plochu kontaktovací stanice Cascade na stejném obrázku vpravo.



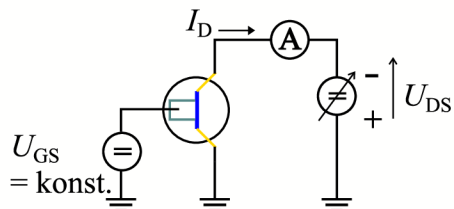
Obrázek 3.6: Pomůcky a vybavení používané v laboratoři CEITEC

Po umístění vzorku na stolek kontaktovací stanice byl vzorek vhodně natočen a uchycen vakuovou vývěvou. Poté bylo do středu vybraného čipu umístěno pomocí pinzety okénko z PDMS, jehož děravý střed zde slouží jako rezervoár pro elektrolyt. Po umístění okénka byl pipetou nabrán elektrolyt, který byl následně aplikován do příslušného okénka tak, aby došlo k vytvoření kapky pro pozdější ponoření elektrody G. Pro měření byl jako elektrolyt vybrán solný roztok KCl o koncentraci 0.1 mol. Tento elektrolyt byl během všech měření konstantně doplňován, aby se zajistilo optimální ponoření elektrody G. Po aplikování elektrolytu byla ponořena elektroda G do roztoku a následně bylo realizováno kontaktování prvního tranzistoru pomocí dvou zbývajících elektrod. Proces je zdokumentován na obrázku 3.8 a) – c). Na obrázku d) je pak detailní pohled na kanály tranzistorů před aplikací elektrolytu, kde je patrný vizuální rozdíl mezi kontakty s leptaným zlatem a kontakty s SiO_2 .

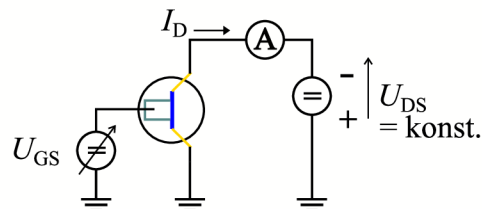
Po úspěšném kontaktování byly nastaveny parametry měření a kontaktním sondám byla přiřazena jednotlivá SMU přístroje Keithley. Pro každé měření byl takto připraven vlastní profil v rámci projektu. Mezi měřeními bylo později přepínáno. Na tomto pracovišti byly měřeny nejprve zároveň přenosové a výstupní charakteristiky, po změření

určeného množství dat bylo přikročeno k měření pulzních charakteristik. Měření byla později opakována pro druhý wafer. Schémata zapojení pro jednotlivá měření (včetně následujících frekvenčních) jsou zobrazena na obrázku 3.7 a nastavené parametry pro všechna měření jsou shrnuty v tabulce 3.2.

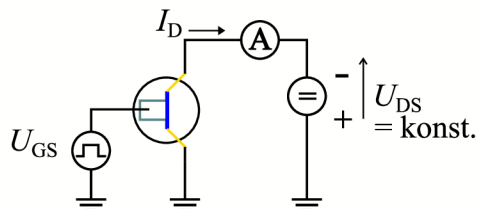
Měření výstupních charakteristik



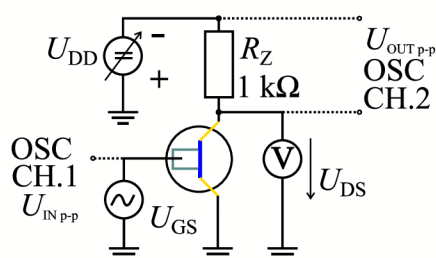
Měření přenosových charakteristik



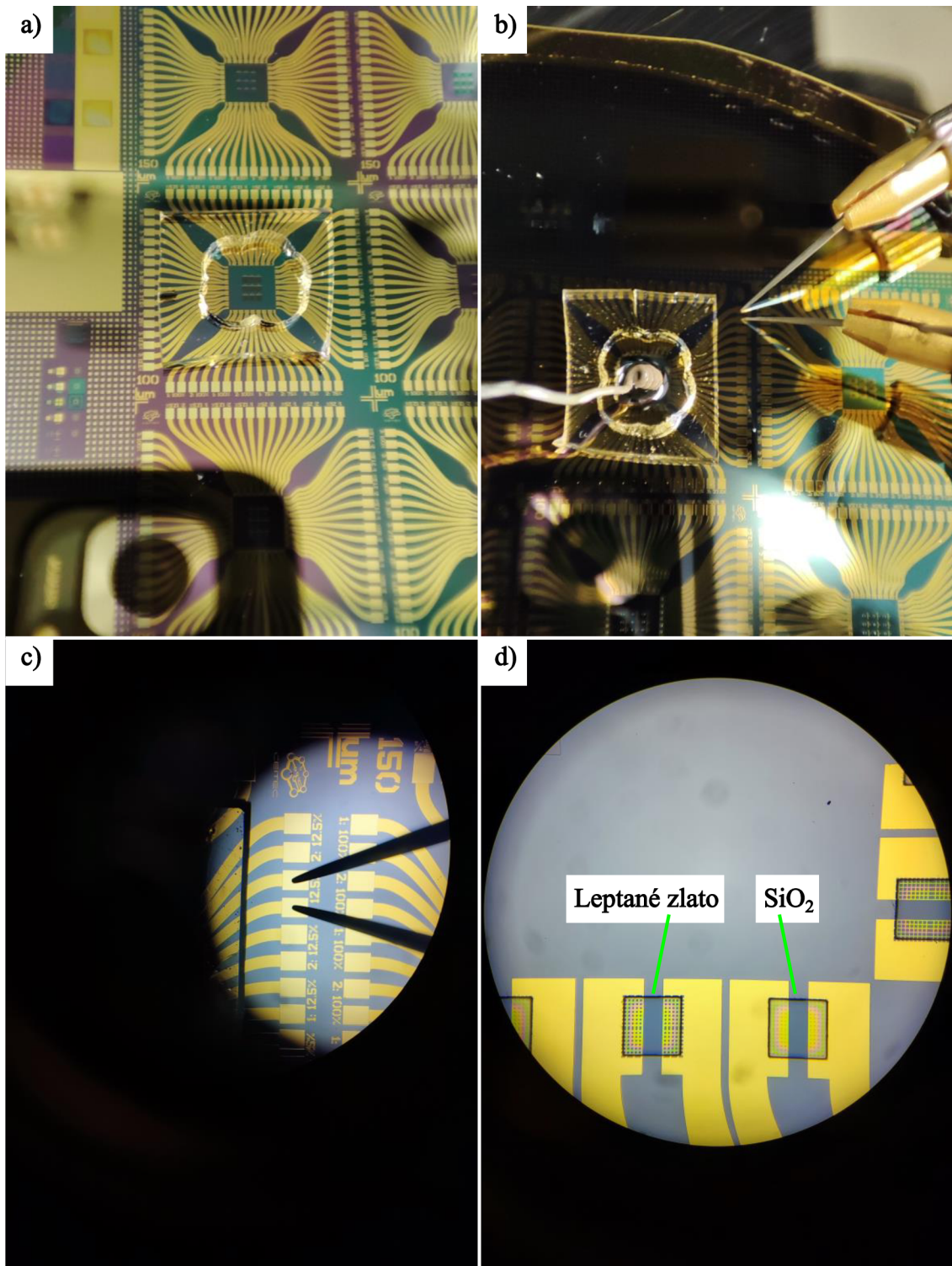
Měření pulzní odezvy



Měření frekvenčních charakteristik



Obrázek 3.7: Schématická zapojení jednotlivých měření



Obrázek 3.8: a) Nanesení okénka z PDMS. b) Aplikování elektrolytu a ponoření elektrody G. c) Detail kontaktování. d) Ukázka struktur pod mikroskopem.

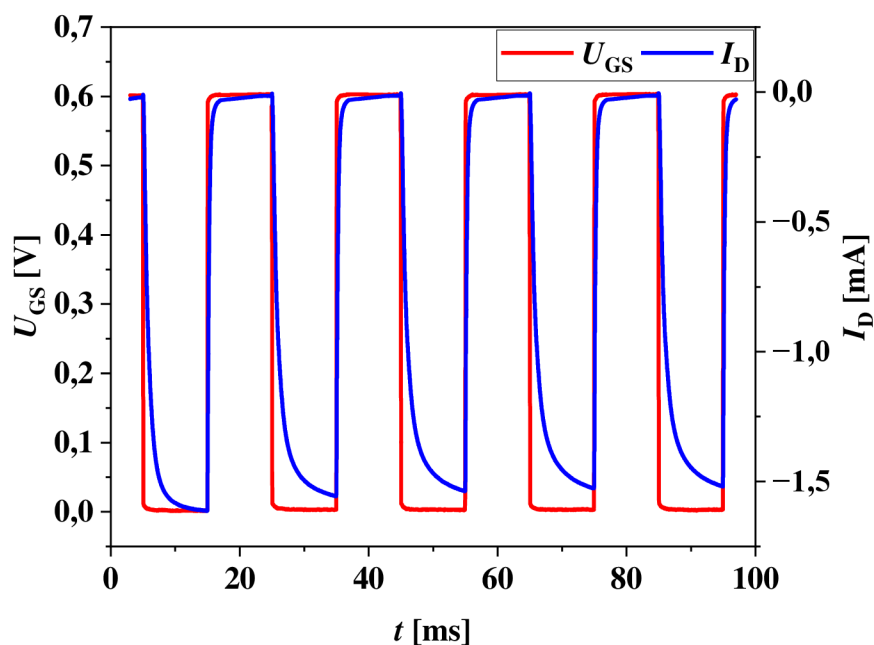
Tabulka 3.2 Nastavené parametry měření

Přenosové charakteristiky					
Parametr	Počátek	Konec	Krok		
U_{DS} [V]	-0,6	-0,6	-		
U_{GS} [V]	-0,6	+0,8	+0,013 V		
Výstupní charakteristiky					
Parametr	Počátek	Konec	Krok		
U_{DS} [V]	0	-0,8	-0,013 V		
U_{GS} [V]	-0,2	+0,8	0,2 V		
Odezva na pulz					
Parametr	Počátek	Konec	Krok		
U_{DS} [V]	-0,6	-0,6	-		
Parametry vstupních pulzů U_{GS}					
T [s]	w_{pulse} [s]	$t_{ses/náb}$ [μs]	U_{GSvyp} [V]	U_{GSzap} [V]	Počet pulzů
0,02	0,01	50	0,6	0	5
Frekvenční charakteristiky					
Parametr	min		max		
U_{INp-p} [mV]			20		
$U_{IN ss}$ složka [mV]			-60		
f_{in} [Hz]	1		5000		
R_Z [Ω]			1000		

V průběhu měření výstupních a přenosových charakteristik byla jednotlivá měření ukládána a pojmenována způsobem popsáním v kapitole 3.2.1. Tento způsob pojmenování zajistil možnost identifikace jednotlivých tranzistorů z naměřených dat.

Při měření pulzní odezvy bylo postupováno obdobným způsobem. Pro kontrolu zde bylo používáno 5 po sobě jdoucích pulzů s parametry definovanými v tabulce 3.2. Po vykreslení průběhu na přístroji Keithley 4200 bylo tedy možné ověřit, že se odezva tranzistoru ustálí a periodicky se opakuje bez výskytu chyb či zkreslení. Pro následné vyhodnocování tedy mohl být vybírán pouze detail pulzu s jistotou správnosti dat. Příklad získaných průběhů je na obrázku 3.9.

Po ukončení měření byly vzorky, elektroda G i okénka z PDMS důkladně opláchnuta deionizovanou vodou a následně důkladně usušeny.



Obrázek 3.9: Příklad pulzů – A2 T1.1 100%

3.2.5 Popis měření frekvenčních charakteristik v laboratoři

Závěrečná měření frekvenčních charakteristik probíhala již mimo čisté prostory v laboratoři za pomoci osciloskopu. Zde byl sestaven obvod dle zapojení na obrázku 3.7 pro měření frekvenčních charakteristik.

Tranzistoru zde byl jako zátěž předřazen rezistor velikosti $1\text{ k}\Omega$. Jako zdroj vstupního sinusového signálu byl využit generátor osciloskopu. Vstupní signál $20\text{ mV}_{\text{p-p}}$ byl doplněn o stejnosměrné předpětí -60 mV , jelikož během vyhodnocování transkonduktance bylo zjištěno, že přibližně v této hodnotě U_{GS} se nacházelo její maximum. Při následném měření bylo nastavováno napětí U_{DD} napájecího zdroje Keithley tak, aby na tranzistoru bylo drženo napětí kolem $-0,6\text{V}$. Toto napětí a napětí zdroje bylo během měření také zaznamenáváno společně s výstupním a vstupním napětím pro jednotlivé frekvence vstupního signálu.

Po dokončení měření bylo realizováno čištění vzorků obdobně jako v předchozím případě. Zde však bylo nutné okénka z PDMS navíc čistit od částic prachu pomocí lepení na kaptonovou pásku, aby se zajistila správná adheze k povrchu waferu a nedocházelo k podtékání elektrolytu.

4 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

Úvodem k naměřeným a vynesným grafickým závislostem je třeba zmínit, že v případě výstupních a přenosových charakteristik (a transkonduktance) byla pro přehlednost v grafech zobrazena pouze čtvrtina hodnot. Kvůli celkovému množství grafů byly tyto grafy vynášeny po trojicích. Tyto grafy jsou pro první wafer v přílohách A.1 – A.15 a pro druhý C.1 – C.3. V případě statistiky proudů I_D v přenosových charakteristikách každý bod představuje průměr z 16 hodnot (body nejsou zvýrazněny kvůli přehlednosti). Každý čip obsahuje 2 teoreticky identické tranzistory, měřeny byly vždy 4 čipy a každý proud je průměrem ze dvou měření. V případě statistiky výstupních charakteristik je pak každý bod průměrem z 8 hodnot. V úvodu měření muselo navíc být opakováno měření pro 3 již změřené čipy, jelikož se místy objevily výrazné rozdíly v měřených proudech mezi jednotlivými běhy měření. Tyto výsledky pak nevykazovaly prokazatelně závěry rozebrané v následujících kapitolách. Tato změřená data byla zahozena a měření bylo opakováno. Příčinou problému byla zřejmě chyba v programu analyzátoru parametrů, který vykazoval nahodilé problémy s kalibrací při prvním běhu měření.

Zmíněná chyba byla při měření přenosových charakteristik eliminována zahazením prvního běhu měření. Zbývající 2 běhy již vykazovaly téměř identické průběhy, proto lze tato data považovat za správná.

Vzhledem k množství výstupních charakteristik (6 pro každý tranzistor) a délce jednotlivých měření toto nebylo při měření výstupních charakteristik možné. Proto tyto charakteristiky nemusí vykazovat výsledky korespondující s charakteristikami přenosovými.

Vzhledem k velkému množství naměřených dat byly pro přípravu vstupních dat využity skripty. Tyto skripty byly psány v jazyce Python za použití knihovnic funkcí Openpyxl. Účelem těchto skriptů byla příprava dat v dokumentu .xlsx, která byla následně importována do programu Origin Lab, ve kterém byly vynášeny veškeré charakteristiky. Přípravou dat se rozumí zejména kombinování dvou měření přenosových charakteristik, které byly analyzátozem parametrů ukládány na samostatné listy dokumentu Excel. Dále pak slučování změřených proudů od všech vzorků pro danou velikost překryvu (na jednom waferu ze stejné řady čipů) pro snadnější zpracování v programu Origin při statistickém vyhodnocování. U pulzních charakteristik se pak jednalo čistě o odstranění přebytečných dat, aby bylo pracováno s jedním pulzem. V opačném případě přílišné množství dat v grafech způsobovalo problémy s výkonem a stabilitou.

4.1 Vyhodnocení výstupních a přenosových charakteristik

4.1.1 Čipy A, struktury tloušťky 350 nm

Příloha A.1 obsahuje stejnosměrné charakteristiky čipu A2 prvního vzorku. Jde tedy o vzorek s tloušťkou kanálu $d = 350$ nm a šířkou $w = 150$ μ m.

Na obrázcích 5.1 – 5.3 jsou zobrazeny příslušné charakteristiky pro kontakty s leptaným zlatem, SiO₂ a tranzistory T3 v tomto pořadí. Pro výstupní charakteristiku tohoto vzorku lze říct, že pro jedno napětí U_{GS} lze pozorovat změnu velikosti výstupního proudu v oblasti saturace v závislosti na překryvu. Pro $U_{GS} = -0,2$ V je tato závislost nejlépe patrná. Při tomto napětí se proud I_D měnil v rozmezí od $-2,75$ mA do $-3,5$ mA (pro struktury s leptaným zlatem i s SiO₂), kdy při nejnižším překryvu 12,5 % byl tento proud nejmenší. Z detailu proudu při napětí $U_{GS} = 0,6$ V a $0,8$ V je vidět minimální proudy ve stavu, kdy by měl být tranzistor vypnutý. Tyto proudy dosahovaly velikosti kolem -12 μ A pro $0,6$ a $-0,6$ μ A pro $0,8$ V řídicího napětí. Při těchto napětích lze tedy považovat tranzistor za vypnutý. Přenosové charakteristiky, měřené při $U_{DS} = -0,6$ V vykazují pak obdobný trend, kdy výstupní proudu v maximální hodnotě dosahuje hodnot od -3 mA do -4 mA opět v závislosti na překryvu. Třetím grafem je zde transkonduktance, která nabývá maximálních hodnot v rozmezí od $3,75$ mS do 6 mS. Vzhledem k tomu, že jde o derivaci přenosové charakteristiky, je tato závislost obdobná. Dále lze pozorovat mírný posun maxima transkonduktance, které neleží přesně v 0 V řídicího napětí, ale je mírně posunuto přibližně o -60 mV. Této skutečnosti bylo později využíváno při měření frekvenční charakteristiky, kde bylo vstupní střídavé napětí doplněno touto stejnosměrnou složkou.

Pro tento vzorek lze dále konstatovat, že není patrný rozdíl mezi kontakty s leptaným zlatem a kontakty s SiO₂. Konkrétně není pozorován rozdíl ve strmosti výstupních charakteristik v oblasti saturace (rozdíl ve výstupním odporu), ani v hodnotách proudů a transkonduktance.

V případě struktur T3 je situace rozdílná. Výstupní proudy zde ve výstupní charakteristice nabývají téměř shodných hodnot, nicméně závislost na překryvu je zde přesně opačná. S rostoucím překryvem klesá velikost proudů i transkonduktance, která zde však má znatelně menší rozptyl od $5,5$ do $6,25$ mS. Závěry již z prvního čipu tedy naznačují chybnost závěrů referenčního článku, jelikož se tyto výsledky podařilo reprodukovat a srovnat s vlastními vzorky s konstantním objemem materiálu PEDOT:PSS. Z hlediska statistiky však nelze takovýto závěr odvodit z jednoho vzorku.

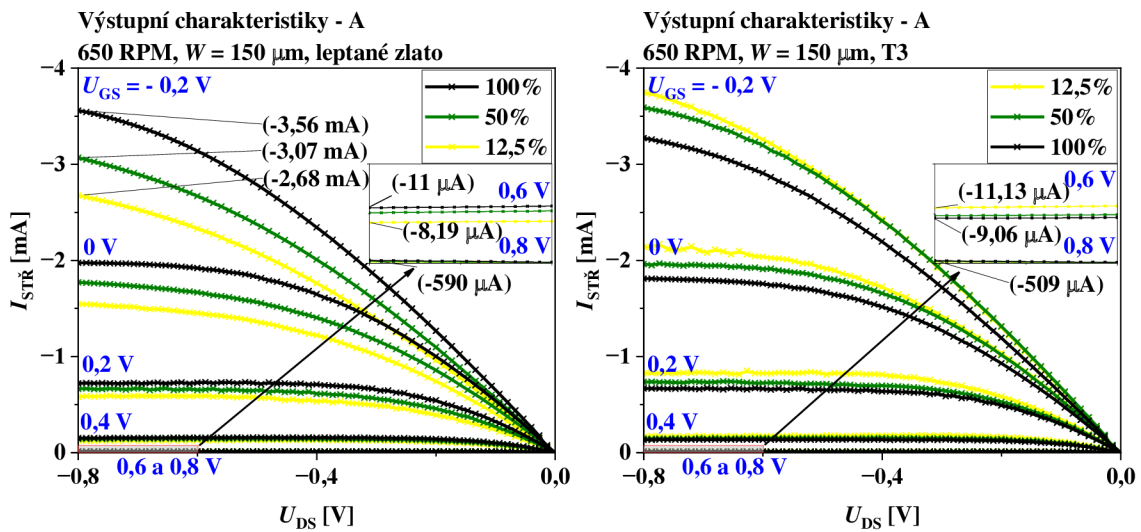
Čip A3 (obrázky 5.4 – 5.6) v příloze A.2 pak v případě kontaktů s leptaným zlatem ve výstupních charakteristikách vykazuje podobnou závislost. Charakteristiky nejsou v příliš dobrém souběhu se vzorkem A2, což může být dáno skutečnostmi popsány v úvodu kapitoly 4. Rozdílem v přenosových charakteristikách zde je větší separace charakteristik pro jednotlivé překryvy. První pásmo je tvořeno překryvy 100 % a 75 %, druhé 50 – 25 % a poslední pak překryvy 12,5%. U vzorků s SiO₂ je pak situace obdobná,

nejnižší transkonduktance zde však byla u překryvů 25 %. Kromě této skutečnosti se průběhy opět zásadně neliší. Struktury T3 zde vykazují velice podobné průběhy, jako u předchozího vzorku.

Vzorek A4 (obrázky 5.7 – 5.9) se vyznačuje větší separací křivek pro jednotlivé překryvy ve výstupní charakteristice. Přenosové charakteristiky opět vykazují závislosti obdobné, jako v předchozím případě. Výjimkou zde je tranzistor T1.1 100 %, který vykazuje deformaci charakteristiky v počátku měřeného rozsahu. Struktury T3 opět vykazují stejné závislosti, ve výstupních charakteristikách se však vyskytuje patrné zvlnění v případě překryvů 12,5 % (žlutá a tmavě žlutá křivka).

Čip A5 (obrázky 5.10 – 5.12) pak nadále nevykazuje oproti předcházejícím zásadní odlišnosti. Celkově tato měření vykazují jen ojedinělé odlišnosti od závislosti proudu I_D na překryvu. Proto lze tato data považovat za platná pro získání středních hodnot (průběhů) v příloze A.5. Z vynesných středních hodnot proudů a transkonduktance lze pozorovat první rozdíl mezi kontakty s leptaným zlatem a s SiO_2 . V případě SiO_2 charakteristiky výrazně lépe škálují s překryvem. U vzorků s leptaným zlatem výsledky vykazují větší rozestupy mezi překryvy 100 a 75 %, 50, 37,5 a 25 % a 12,5 %. Tato skutečnost je nejspíše způsobena vzorkem A3, který vykazoval podobné rozestupy. Reálná závislost tak bude mnohem podobnější a mezi SiO_2 a leptáním zlata tedy nebudou zásadní rozdíly co se týče výstupních a přenosových charakteristik. Struktury T3 pak vykazují menší závislost na překryvu a opačný trend, tedy rostoucí transkonduktanci s klesajícím překryvem, což ukazuje spíše na vliv geometrie (objemu PEDOT:PSS), než na vliv překryvu.

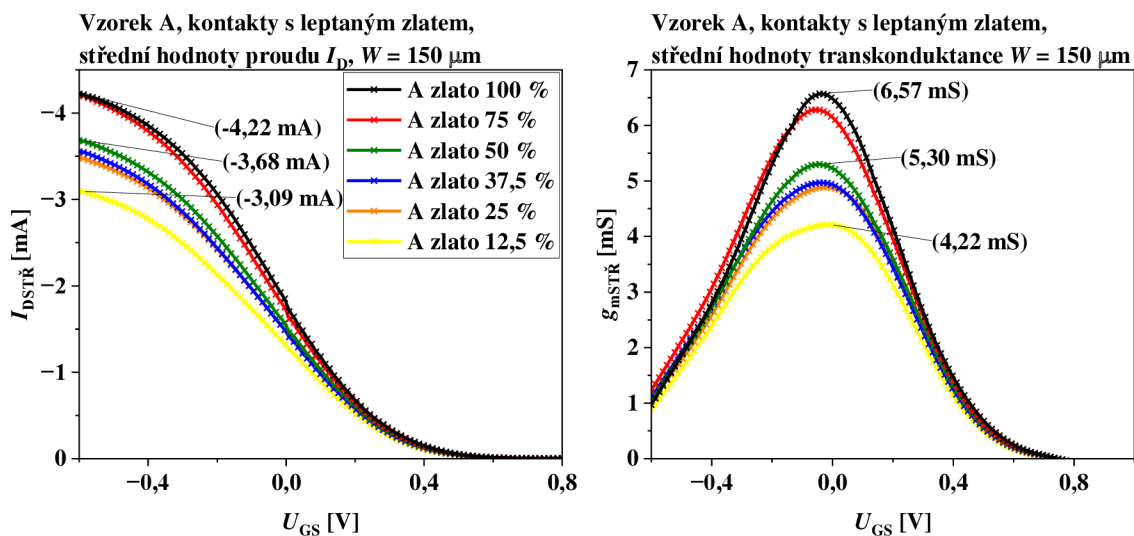
Obrázky 5.13 – 5.15 ukazují výsledné střední hodnoty průběhů. Jsou tedy reprezentací chování čipů A na prvním waferu. Pro lepší demonstraci vlivu překryvu je zde na obrázku 4.1 uveden zvětšený příklad výstupních charakteristik pro čipy A, tranzistory s leptaným zlatem a struktury T3. Zde jsou pro přehled zobrazeny charakteristiky jen pro 3 překryvy včetně konkrétních hodnot proudů. Jde o detaily charakteristik v přílohách. Příklad pro struktury s SiO_2 nebyl uváděn kvůli podobnosti průběhů co do tvaru i hodnot s průběhy vzorků s leptaným zlatem.

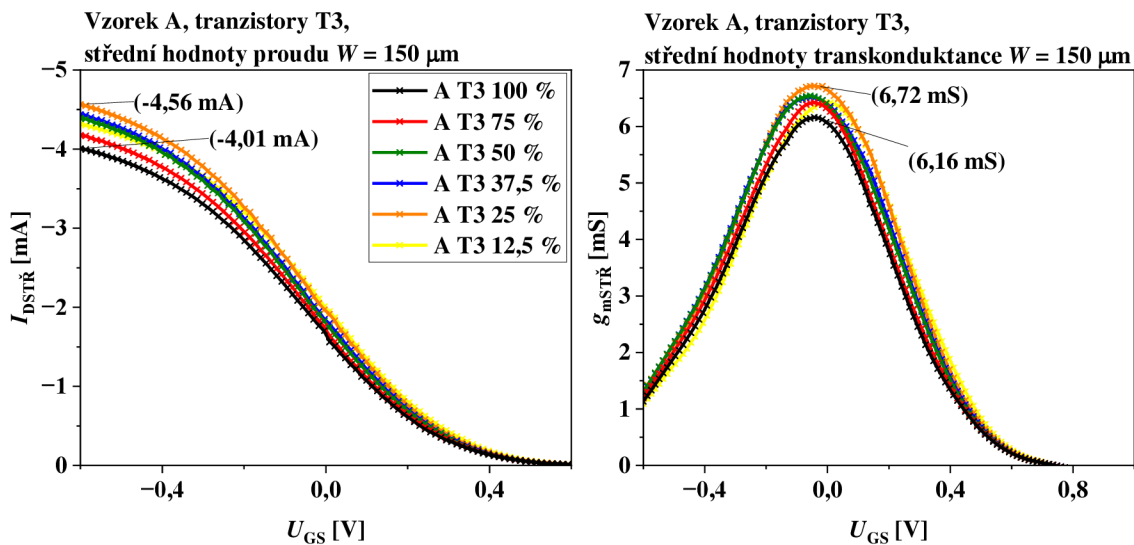


Obrázek 4.1: Srovnání výstupních charakteristik vzorků A pro 3 různé překryvy

Obrázky 5.16 – 5.18 ukazují střední hodnoty proudu I_D pro jednotlivé překryvy, jejich směrodatnou odchylku a jednotlivé měřené proudy vzorků. Z těchto charakteristik lze vidět, jaké tranzistory (respektive jejich proudy) se výrazně lišily od střední hodnoty a od proudů ostatních. V nejhorším případě vykazují chybu větší, než je směrodatná odchylka pouze 3 proudy pro daný překryv. Proto lze statistiku považovat za relevantní. Pro dodatečné ověření tohoto tvrzení tyto charakteristiky umožňují vytipování a přeměření konkrétních tranzistorů, což by však bylo nad časový rámec této práce. Střední hodnota proudů se zde v závislosti na překryvu mění od přibližně $-3,5 \text{ mA}$ do $-4,5 \text{ mA}$ pro SiO_2 i leptané zlato. Pro struktury T3 je pak tento proud $-4,5 \text{ mA}$ při překryvu 12,5 % a příliš se nemění až do překryvu 75 % a 100 %, kde tato střední hodnota činí -4 mA .

Obrázek 4.2 pak opět ukazuje detailnější srovnání průměrných přenosových charakteristik pro čipy A, tranzistory s leptaným zlatem a tranzistory T3.





Obrázek 4.2: Srovnání přenosových charakteristik vzorků A, leptané zlato

4.1.2 Čipy B, struktury tloušťky 350 nm

Charakteristiky čipů B jsou uvedeny v příloze A.6 – A.10. U čipu B2 (obrázky 5.19 – 5.21) lze pak na první pohled vidět pokles ve výstupních proudech i transkonduktanci oproti vzorkům A. Srovnáme-li maxima transkonduktance při 100 % překryvu, dostáváme se z hodnoty 6,5 mS pro čipy A na 4,5 pro čipy B, což téměř přesně koresponduje se vztahem (1.2). Zde by poměr w/l měl z hodnoty 3 poklesnout na hodnotu 2, tedy o třetinu, což přibližně odpovídá poklesu v transkonduktanci mezi těmito vzorky. Hodnoty výstupních proudů jsou taktéž nižší. Proudů při vypnutém tranzistoru jsou zde pod $-8 \mu\text{A}$ při $U_{GS} = 0,6 \text{ V}$, respektive $0,2 \mu\text{A}$ při $U_{GS} = 0,8 \text{ V}$. Menší rozsahy výstupních proudů zde již komplikují přesnější odečítání, nicméně pro vzorky s leptaným zlatem a SiO_2 je opět patrná stejná závislost parametrů na překryvu a opačná závislost u vzorků T3, opět s pouze malým rozptylem proudů a transkonduktance oproti druhým dvěma strukturám.

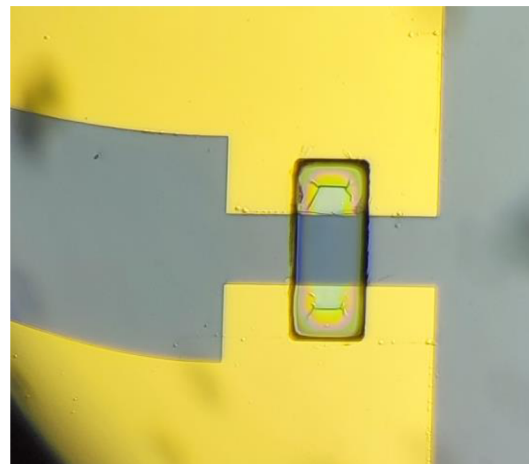
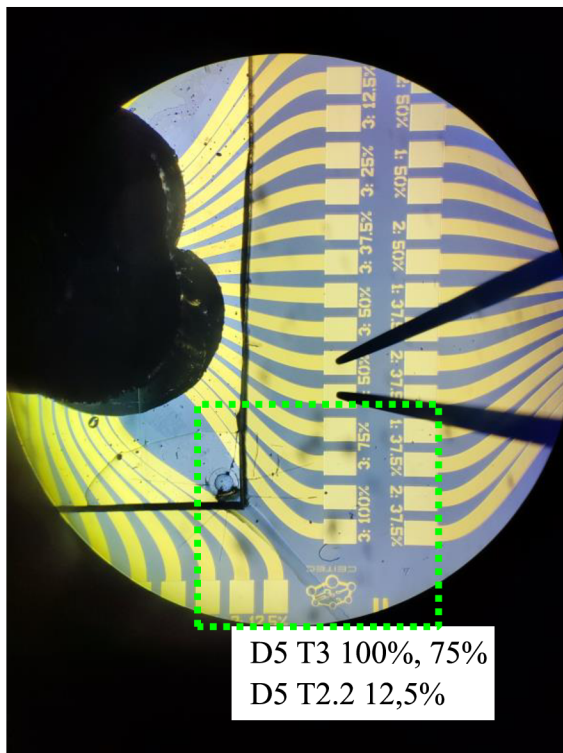
U vzorků B3 – B5 (obrázky 5.22 – 5.30) pak lze vidět občasný posun průběhů transkonduktance zejména pro překryvy 25 %. Vzhledem k tomu, že se posun vyskytl také u tranzistorů T3 jej lze považovat spíše za odchylku v měření či náhodný jev. Obrázky 5.31 – 5.33 pak opět zachycují chování čipů B ve výstupních a přenosových charakteristikách, jako celku. Zde jsou patrné stejné závislosti, jako v předchozím případě.

Statistické vyhodnocení na obrázcích 5.34 – 5.36 pak ukazuje opět střední hodnoty proudů jednotlivých vzorků pro jednotlivé překryvy. Zde se střední hodnota proudu mění od přibližně $-2,5 \text{ mA}$ do $-4,5 \text{ mA}$ pro kontakty s leptaným zlatem a od -2 do $-3,5 \text{ mA}$ pro kontakty s SiO_2 . U tranzistorů T3 je pak opět patrný zdánlivě lepší souběh proudů se střední hodnotou v rozmezí od $-3,25 \text{ mA}$ do $-3,5 \text{ mA}$.

4.1.3 Čipy D, struktury tloušťky 350 nm

Příslušné charakteristiky jsou uvedeny v přílohách A.11 – A.15. Výstupní a přenosové charakteristiky se pro příslušné čipy nacházejí na obrázcích 5.37 – 5.48. Zde je patrný opět pokles výstupních proudů. Ve výstupních charakteristikách nabývala proudová maxima hodnot do $-2,5$ mA, při rozepnutém tranzistoru pak hodnoty proudu činily typicky -5 μ A pro $U_{GS} = 0,6$ V a řádově desetiny μ A pro $U_{GS} = 0,8$ V. Transkonduktance dle výsledné statistiky na obrázcích 5.49 – 5.51 pak nabývá hodnot $1,5$ – $3,75$ mS pro kontakty s leptaným zlatem i SiO_2 , u struktur T3 je pak rozptýl opět méně výrazný, konkrétně 3 – $3,75$ mS. Zásadní odlišnosti vykazují struktury D5 T2.2 12,5 % a struktury T3 75 a 100 %. První zmíněná struktura vykazuje v přenosové charakteristice nenulový konstantní proud v přenosové charakteristice na obrázku 5.47. Obdobný případ platí pro zbylé dvě struktury na obrázku 5.48, kde je odchylka vidět i ve výstupní charakteristice. Příčina těchto chyb je zobrazena na obrázku 4.3 vlevo. Během manipulace se vzorky došlo vlivem chyby operátora k narušení vrstvy parylenu pinzetou. Tím došlo ke špatnému přilnutí okénka z PDMS a podtečení elektrolytu. Tyto vzorky byly vyřazeny z následné statistické analýzy. Během měření byl také zničen vzorek B4 T3 75 % opět chybou operátora. Při krátké přestávce mezi měřeními bylo opomenuto zvednutí kontaktních hrotů. Zároveň byl vypnut analyzátor parametrů a při vypínání nebo opětovném zapnutí přístroje nejspíš došlo k vybití zbytkového náboje, který tranzistor zničil. Tento vzorek je zachycen na obrázku 4.3 vpravo. Výstupní a přenosová charakteristika tohoto tranzistoru však byla změřena před jeho zničením. Výstupní charakteristika však vykazovala neobvyklou anomálii, proto byl tento vzorek ze statistiky také vyřazen.

Obrázky 5.52 – 5.54 pak opět ukazují střední hodnoty proudů, tentokrát v rozmezí od $-1,5$ do $-2,5$ mA pro kontakty s leptaným zlatem a SiO_2 a $-2,5$ – $-2,25$ mA u struktur T3.



Zničený tranzistor
D4 T3 75%

Obrázek 4.3: Poškozené vzorky

4.2 Vyhodnocení frekvenčních charakteristik

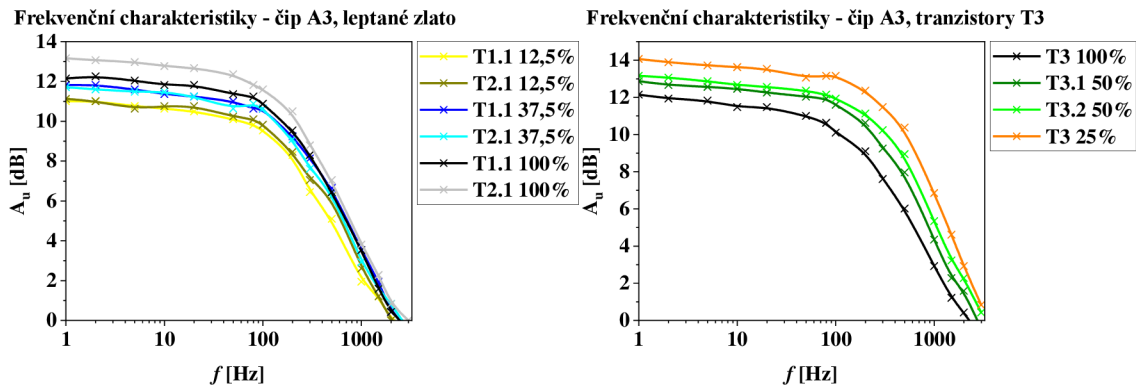
Příloha B.1 obsahuje změřené frekvenční charakteristiky čipů A3, B2 a D2. Obrázek 5.55 Srovnává charakteristiky čipů A3 a B2, obrázek 5.56 pak zobrazuje charakteristiky čipu D2. Každý z obrázků opět obsahuje trojici grafů pro struktury s leptaným zlatem, SiO₂ a struktury T3.

Pro měření bylo využito příslušné zapojení dle obrázku 3.7. Stejnsměrný napěťový zisk tohoto zapojení je dán součinem transkonduktance a odporu zátěže. Pro čip A s transkonduktancí přibližně 6 mS (při překryvu 100 %) a odporem zátěži 1 kΩ by pak toto zesílení mělo vycházet přibližně 6 (respektive -6, z povahy zapojení). Tomu odpovídá zesílení přibližně 15 dB. Reálně změřená hodnota je však o něco nižší. U čipů B a D je pak maximální hodnota zisku 9 a 5,5 dB.

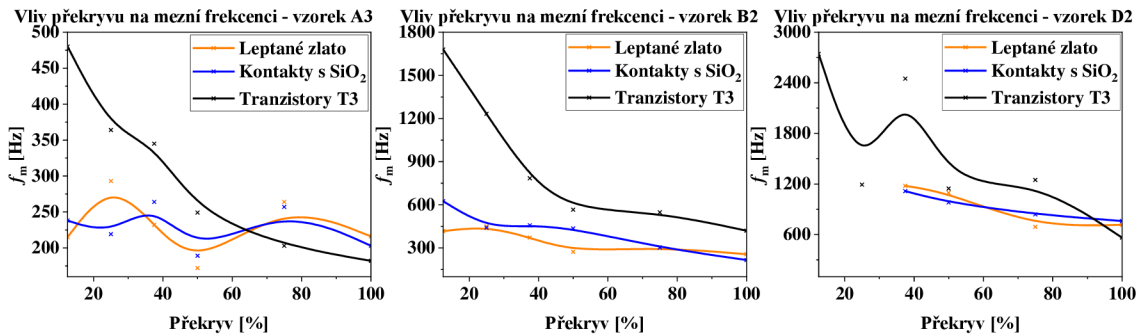
Důležitějšími poznatky zde však opět je vliv překryvu a naměřené hodnoty mezních frekvencí. Z průběhů je opět vidět, že pro struktury s leptaným zlatem a SiO₂ platí podobná závislost na překryvu, jako pro transkonduktanci. Tedy že s klesajícím překryvem klesá i zisk. Mezi těmito strukturami nebyly pozorovány výrazné rozdíly v chování. Struktury T3 pak opět vykazují menší rozestup charakteristik a spíše opačný vliv překryvu. U čipů B a D jsou však patrné větší deformace a odstupy charakteristik. Toto je z části dáno komplikovanějším měřením charakteristik těchto menších struktur, kdy zesílení pro zátěž 1 kΩ nebylo příliš veliké. Odečítání parametrů mírně komplikoval

šum výstupního průběhu těchto struktur. V případě vzorku D2 T2.2 25 % navíc došlo k jeho zničení. U čipu D a kontaktů s leptaným zlatem a SiO₂ se také objevoval jistý vzrůst zesílení v určitém rozmezí kmitočtů, což bylo s největší pravděpodobností způsobeno změnou napětí U_{DS} během měření, která nebyla zpozorována. Tento jev se však výrazně projevil jen u čipů D, kde bylo měření navíc komplikováno šumem. Je se vyskytl pouze u 2 struktur.

Pro demonstraci výsledků je níže na obrázku 4.4 opět ukázán vliv překryvu u struktur s leptaným zlatem v porovnání se strukturami T3 pro vybrané překryvy. Jako příklad byl vybrán čip A3 (strukтуры tloušťky 350 nm).



Obrázek 4.4: Srovnání frekvenčních charakteristik pro čip A3



Obrázek 4.5: Srovnání mezních frekvencí v závislosti na překryvu

Nejdůležitější parametry jsou pak uvedeny v tabulkách 5.1 – 5.3, grafickou reprezentací těchto dat jsou grafy na obrázku 4.5. Zde byl pro výslednou závislost u dvojic stejných tranzistorů vybrán vždy ten s vyšší mezní frekvencí. Chybějící body v závislosti D2 jsou dány nízkým zesílením (< 3 dB) pro nízké hodnoty překryvu, proto zde nebyla mezní frekvence odečtena. Ze závislosti je vidět výrazně vyšší vliv změny objemu oproti překryvu.

Pro čip A3, a struktury s leptaným zlatem zesílení s překryvem klesalo v rozmezí 13,16 dB – 10,1 dB, pro struktury s SiO₂ pak 13,26 dB – 9,25 dB. Mezní frekvence v obou případech nabývaly hodnot v rozsahu od 140 Hz do 300 Hz bez viditelné zásadní

závislosti na překryvu. Struktury T3 pak závislost na překryvu vykazují, mezní frekvence s klesajícím překryvem roste od 182 Hz do 480 Hz. Tato skutečnost poukazuje na vliv objemu, což dále potvrzuje původní předpoklady ohledně referenčního článku. V případě čipu B2 a D2 již nejsou výstupní data dostatečně vypovídající. Vyskytují se zde velké rozdíly mezní frekvence mezi shodnými vzorky. Například pro tranzistory T1.2 a 2.2 12,5 % nabývají tyto hodnoty velikosti 624 Hz a 904 Hz při přibližně stejném zesílení, což činí rozdíl 280 Hz. U vzorků D2 některé struktury ani nedosáhly zesílení 3 dB, jak bylo popsáno výše.

Frekvenční charakteristiky byly bohužel měřeny nejprve u waferu s tenčími strukturami, kde se takto nízké zesílení neprojevovalo, což je v rozporu s teoretickými předpoklady, kdy by tenčí struktury měly vykazovat nižší zesílení. V opačném případě by tento nedostatek byl na počátku měření eliminován zvětšením odporu zátěže, čímž by došlo k růstu zesílení a relevantnějšímu měření. Za této situace by však musela být opakována všechna měření pro tuto novou hodnotu, proto k tomuto kroku nebylo přikročeno.

4.3 Vyhodnocení pulzní odezvy

Pro vyhodnocování pulzních charakteristik byl použit opět program Origin Lab. Zde byla sledována rychlost odezvy při spínání tranzistoru. Rozpínací rychlost sledována nebyla, jelikož je zde výrazně vyšší. Princip vyhodnocování se dále zaměřoval na sledování vlivu parazitních kapacit, ať již způsobených paralenem či přítomností SiO_2 na zlatých kontaktech. Výstupní proud zde odpovídá exponenciální závislosti proudu kondenzátorem. Tato skutečnost odpovídá teoretickým předpokladům, nastíněným v úvodu této práce. Hlavní vliv zde by mělo mít nabíjení kapacity C_G , druhotný je pak parazitní vliv dalších kapacit. Za účelem vyhodnocení byl průběh pulzu nejprve proložen jednoduchou exponenciálou funkce ExpDecay1 programu Origin, proložení bylo následně porovnáno s druhým, realizovaným pomocí funkce ExpDecay2, která se skládá ze dvou exponenciálních funkcí, tudíž nabíjení dvou kondenzátorů. Druhá zmíněná vystihovala přesněji měřené průběhy, proto byla dále využívána k získávání dvou časových konstant pro obě kapacity. Z nich byla následně počítána doba nabíjení jako pětinašobek (teoreticky 3 – 5) časové konstanty τ .

Odezvy na pulz pro čipy A5, B4 a D3 jsou uvedeny v přílohách B.3, B.4 a B.5 (obrázky 5.57 – 5.65). Mimo jiné jsou zde pozorovány poklesy maximální hodnoty výstupního proudu s klesajícím překryvem u struktur s leptaným zlatem a SiO_2 , u struktur T3 je tato závislost opět opačná. Důležitější však zde jsou tabulky 5.4, 5.5 a 5.6, kde jsou shrnuty změřené časové konstanty.

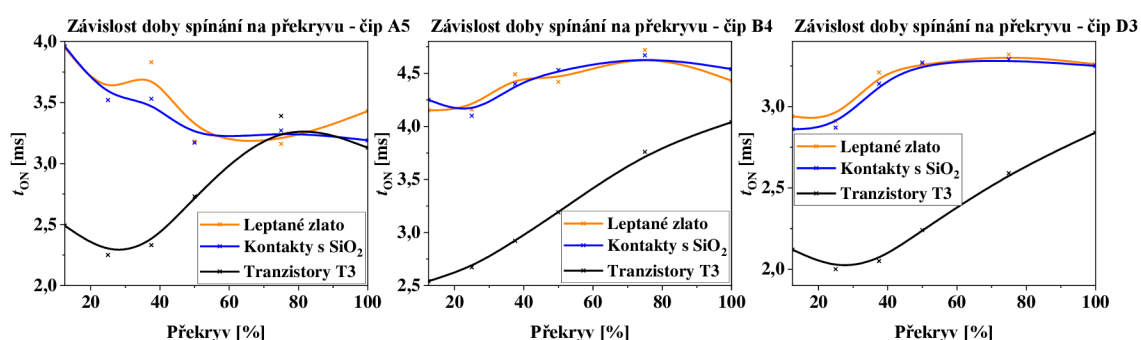
Získaná data ukazují u všech čipů minimálně o řád menší časové konstanty, které odpovídají dominantnímu nabíjení kapacity (zde označeno jako C_1). Jejich výsledné doby nabíjení odpovídají příslušným průběhům pulzní odezvy, jde tedy skutečně o dominantní kapacitu. Data příslušící čipu A5 vykazují růst doby odezvy s klesajícím překryvem, pro

struktury T3 naopak, což poukazuje opět na vliv objemu materiálu kanálu. V případě čipů B4 a D3 pak je tato závislost spíše opačná, nicméně rozdíl v nabíjecích časech zde již není tak výrazný a překryv má celkově menší vliv. U žádného čipu není pozorován přímý rozdíl mezi kontakty s leptaným zlatem a s SiO₂. Kapacitám C₂ pak odpovídají velmi dlouhé časové konstanty, které jsou dány součinem kapacity C a příslušného nabíjecího odporu R. Srovnání výsledných časových konstant může naznačovat vliv mnohem vyšší parazitní kapacity, kterou lze přisoudit s nejvyšší pravděpodobností přítomnosti parylenu. Reálně však tato kapacita bude spíše zanedbatelně malá a velikost časové konstanty je dána vysokým odporem. Tato malá kapacita se tak nejspíše nabíjí zanedbatelným proudem. Z elektronického hlediska lze tuto kapacitu zanedbat, avšak tento materiál může vykazovat pronikání kladných iontů, proto je jeho vliv nutno v některých bioelektronických aplikacích brát v úvahu. Tento vliv však není předmětem sledování této práce.

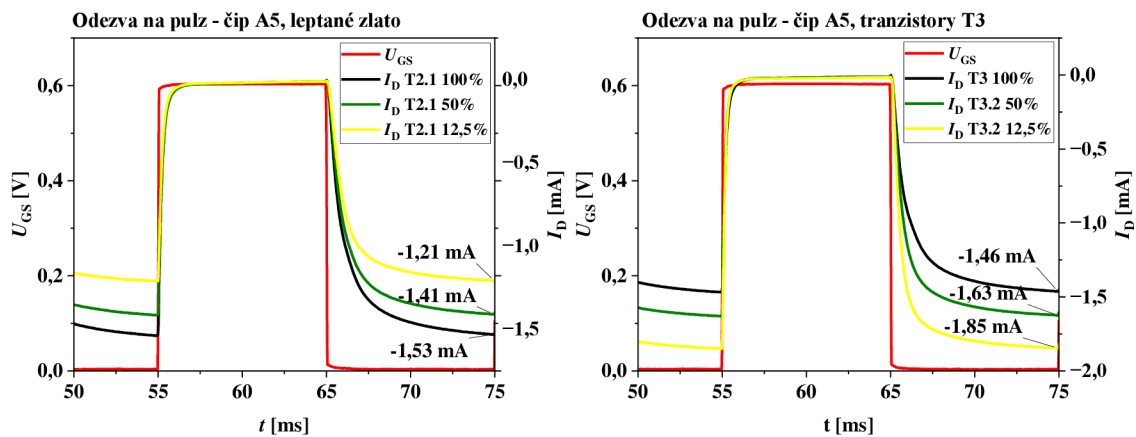
Dle výsledků prvních měření bylo očekáváno, že čip A5 bude mít odezvu nejrychlejší, D3 naopak nejpomalejší. Z hlediska rychlosti však dle naměřených dat platí vztah A5 je rychlejší než B4, avšak D3 je rychlejší než A5. Obecně lze však dle výsledků říci, že menší struktury vykazují nejvyšší rychlost odezvy.

Pro čip A5 byla rychlost odezvy pro leptané zlato a SiO₂ v rozsahu 3 ms až 4 ms, pro struktury T3 pak 2 ms – 3,4 ms. V případě čipu B4 vzrostla odezva u struktur s leptaným zlatem a SiO₂ přibližně o 1 ms. U čipu D3 se pak odezva ustálila blíže hodnotě 3 ms, v případě struktur T3 se měnila s překryvem od 2 do 2,84 ms.

Výsledné spínací časy t_{ON} z příslušných tabulek jsou pro struktury tloušťky 350 nm vyneseny na obrázku 4.6. Zde je patrný výrazně větší vliv změny objemu u struktur T3, než je tomu u samotného překryvu u zbylých dvou struktur. Obrázek 4.7 pak ukazuje vliv překryvu na hodnoty výstupních proudů pro 3 vybrané překryvy a tranzistory s leptaným zlatem a struktury T3.



Obrázek 4.6: Srovnání spínacích časů v závislosti na překryvu pro jednotlivé čipy



Obrázek 4.7: Vliv překryvu na průběh pulzní odezvy – čip A5

4.4 Srovnání předchozích závěrů se druhým vzorkem

Výsledky měření druhého waferu jsou uvedeny v přílohách C.1 – C.3. V případě tohoto waferu byly pro měření vybrány čipy A2, B2 a D2. Vzhledem k malému množství změřených dat nebylo realizováno statistické vyhodnocení. Tato data slouží pouze ke srovnání výsledků s předchozími měřeními.

4.4.1 Čip A2, struktury tloušťky 40 nm

V případě čipu A2 jsou výsledné charakteristiky na obrázcích 5.66, 5.67 a 5.68. Pořadí opět odpovídá posloupnosti leptané zlato, SiO_2 a T3.

Hodnoty proudu ve výstupní charakteristice pro $U_{GS} = -0,2$ V škálují s překryvem opět dle předešlého trendu, tentokrát v rozmezí od $-1,75$ mA do -2 mA. Proudů ve vypnutém stavu zde pak škálují kolem hodnoty -5 μA , respektive desetin μA pro $U_{GS} = 0,8$ V. Jedinou abnormalitu zde vykazuje vzorek T1.1 100 %, u kterého byl naměřen výrazně vyšší proud i transkonduktance. Transkonduktance zde při pomnutí zmíněného vzorku dosahuje maximální hodnoty 3,75 mS pro kontakty s leptaným zlatem i SiO_2 . Tranzistory T1.2 a T2.2 12,5 % zde pak vykazují abnormálně malé transkonduktance. Příčinou odchytek zde je s největší pravděpodobností geometrie. U celého waferu totiž dle informací z výroby docházelo k častému nedodržení tloušťky materiálu kanálu v důsledku větší náchylnosti struktur na optimální výrobní proces.

Obecně lze ale předchozí závěry prohlásit za potvrzené. Rozdíl mezi kontakty s leptaným zlatem a SiO_2 opět není pozorovatelný.

4.4.2 Čip B2, struktury tloušťky 40 nm

Grafické závislosti pro čip B2 jsou na obrázcích 5.69, 5.70 a 5.71 v příloze C.2. Oproti vzorku A2 zde dominují nižší překryvy kontaktů, což je ale nejspíše opět způsobeno chybnou tloušťkou těchto struktur. Oproti předcházejícímu čipu se jen minimálně zmenšily proudy I_D a transkonduktance.

Získané závislosti nejsou příliš vypovídající pro jednoznačné zhodnocení vlivu překryvu. U struktur T3 lze však již říci, že u takto jemných struktur začíná být rozdíl v objemu materiálu kanálu tak malý, že rozdíl ve výsledných průběhách přestává být jednoznačně pozorovatelný.

4.4.3 Čip D2, struktury tloušťky 40 nm

Poslední ze struktur se nacházejí na čipu D2. Příslušné charakteristiky jsou v příloze C.3 na obrázcích 5.72 – 5.74. Zde je již patrný pokles transkonduktance a výstupních proudů, které ve výstupních charakteristikách dosahují hranice $-1,5$ mA. Maximum transkonduktance se pak nachází na $2,5$ mS. Je zde však opět patrný vliv překryv, který má pro všechny struktury očekávaný trend. U struktur T3 je pak tento vliv prakticky zanedbatelný.

4.4.4 Frekvenční charakteristiky struktur s tloušťkou 40 nm

Dle charakteristik v příloze C.4 (obrázky 5.75 a 5.76) lze konstatovat, že tyto struktury vykazují podobné chování jako v případě předcházejícího waferu. Opět se zde projevuje mírný nárůst zesílení v určitém frekvenčním rozsahu. Tento jev je opět častější u struktur s menší šířkou.

Během měření zde opět došlo ke zničení jednoho ze vzorků, konkrétně T2.1 50%. U dalších se objevilo chování odpovídající pásmové propusti. Tento jev může být pravděpodobně způsoben převládnutím některé z parazitních kapacit v důsledku malých rozměrů struktur, zkreslení vlivem nesprávné tloušťky nebo změny napětí U_{DS} během měření.

Tabulky mezních frekvencí 5.7 – 5.9 v příloze C.5 je zde třeba brát jako orientační. Při pomnutí častých rozdílů mezní frekvence sousedních vzorků lze však říct, že u všech 3 čipů docházelo k růstu mezní frekvence s klesajícím překryvem za současného poklesu maximálního zesílení (které v případě deformovaných průběhů bylo bráno jako přibližná střední hodnota v měřeném rozsahu). Vzorky, které vykazovaly chování podobné pásmové propusti jsou vyznačeny v tabulce komentářem PP.

4.4.5 Vyhodnocení pulzní odezvy struktur tloušťky 40 nm

Jednotlivé charakteristiky jsou uvedeny v přílohách C.6, C.7 a C.8. Z výsledných proložení a odečtení rychlostí odezvy (které jsou uvedeny v tabulkách 5.10, 5.11 a 5.12) bylo zjištěno, že u všech struktur na testovaných čípech dochází s klesajícím překryvem k mírně rychlejší odezvě. Tato odezva nabývá pro čip A2 hodnot blízko 2 ms, bez výrazného rozdílu mezi kontakty s SiO₂ a leptaným zlatem. Pro struktury T3 pak tato odezva škálovala s překryvem (objemem) od 3,13 do 1,41 ms.

Pro čip B2, s kontakty s SiO₂ a leptaným zlatem pak doba odezvy opět nabývala hodnot blízko 2 ms (1,98 – 2,33 ms). Pro struktury T3 2,31 – 1,31 ms. Opět dle stejné závislosti na překryvu (objemu).

Poslední struktury D2 pak vykazují nejrychlejší odezvu ze všech testovaných, která se blíží v průměru 1,5 ms. Zároveň jde však o struktury s nejnižší transkonduktancí.

5 ZÁVĚR

Úvodní část této diplomové práce se zabývá teoretickým rozбором tranzistorů, používaných pro bioelektroniku. Konkrétně pak tranzistory MOSFET a OECT. Na tranzistory OECT jsou dále zaměřeny navazující kapitoly této práce. Rozebírány jsou jednotlivé způsoby využití jak na poli bioelektroniky, tak i klasické elektroniky.

Cílem praktické části této práce jsou elektrická měření význačných elektrických parametrů tranzistorů OECT. Pro tyto účely jsou v kapitole 1 této práce rozebrány fyzikální principy tranzistorů OECT a teoretické definice elektrických parametrů. Mezi tyto parametry patří například transkonduktance, přenosové charakteristiky či frekvenční charakteristiky.

Teoretická část této práce dále vyzdvihuje použití OECT při EEG měření. Rozebírá dále cíle této práce včetně představení referenčního článku, který byl z části inspirací pro tuto práci. Nedílnou součástí je také popis výroby vzorků, způsobů jejich úprav s cílem dosažení vyšší stability a samotné představení vzorků, které jsou v této práci měřeny v rámci praktické části.

Z hlediska vyhodnocení je nejdůležitější součástí práce vyhodnocení měřených dat v kapitole 4, kde jsou tato data pečlivěji rozebrána. Zde v závěru následuje jejich stručné shrnutí. Následující odstavce shrnují výsledky, kterých se podařilo dosáhnout.

Tvrzení článku, že klesající překryv kontaktů je výhodnější z hlediska transkonduktance bylo vyvráceno. Veškerá naměřená data indikují, že se u těchto struktur skutečně uplatňuje vliv změny objemu materiálu kanálu, nikoliv pouze překryvu. Dále nedošlo k prokázání rozdílu mezi realizací překryvu kontaktů pomocí leptání zlata či nanášení vrstev SiO_2 , a to napříč všemi měřeními. Obecně byl u těchto dvou struktur pozorován trend klesajících proudů a transkonduktance s klesající šířkou kanálu tranzistoru i překryvem u obou waferů. Celkově byly také proudy a transkonduktance nižší u waferu s tenčími strukturami, což je v souladu s teoretickými poznatky a vztahem (1.2). U struktur T3 byla situace obdobná, pouze závislost na překryvu byla v důsledku změn objemu opačná.

Za úspěch práce se dá označit také statistické vyhodnocení, kdy díky vynesným středním hodnotám a směrodatným odchylkám v přenosových charakteristikách lze pozorovat jednotlivé tranzistory, jejichž proud se výrazně liší od střední hodnoty. Díky tomu by teoreticky bylo možné jakýkoliv z podezřelých tranzistorů přeměřit znovu, provést korekci dat a očistit měřená data od chyb, které jsou popsány v úvodu vyhodnocení v kapitole 4.

Z hlediska frekvenčních charakteristik byl pozorován pokles zesílení jak v závislosti na klesající šířce, tak tloušťce kanálu, což je opět očekávaná skutečnost. Dále byl úspěšně pozorován stejný trend v závislosti zesílení na překryvu, tedy klesající s klesajícím překryvem pro první dvě struktury a rostoucí s klesajícím překryvem u struktur T3. Ačkoliv zde nebyl tento jev tak jednoznačný, jako u stejnosměrných charakteristik.

Z hlediska mezní frekvence byl při zanedbání rozdílů mezi identickými tranzistory pozorován zanedbatelný vliv překryvu, naopak vliv změny v objemu u struktur T3 byl výraznější a byl tedy prokázán. Obecně lze od těchto struktur při rozumném zesílení očekávat mezní frekvence řádově ve stovkách Hz.

Pulzní charakteristiky pak prokázaly přítomnost druhé kapacity, kterou lze přisuzovat parazitním kapacitám rozhraní ve struktuře. Tyto kapacity jsou spojeny s rozhraními elektrod a rozhraními mezi použitými materiály a elektrolytem. Z hlediska rychlosti odezvy pak bylo zjištěno, že čím menší struktury, tím rychlejší je odezva. Kromě vzorku A5 vykazovaly všechny čipy na obou waferech vyšší rychlost odezvy s klesajícím překryvem. Z hlediska rychlosti odezvy jsou tedy nižší velikosti překryvu výhodnější.

Kromě úspěchů se během vypracovávání práce vyskytly také některé problémy, ze kterých lze vyvodit následující náměty na zlepšení některých použitých postupů. Za zmínku stojí zejména frekvenční charakteristiky. Zde byly hodnoty zesílení odečítány ručně za pomoci osciloskopu a následně byly ručně přepisovány do připraveného dokumentu Excel. Výsledkem je tedy hrubější krokování frekvence, tudíž menší množství dat pro optimální proložení a následný odečet mezních frekvencí. Pro získání relevantnějších dat měla být také zvolena větší zátěž, než použitý $1\text{ k}\Omega$, čímž by se zvýšilo zesílení. Tato hodnota byla volena jako jedna z typicky využívaných při podobném druhu měření. První byl měřen wafer se strukturami tloušťky 40 nm, kde i čip D vykazoval dostatečné zesílení pro odečet mezní frekvence. Po přechodu na struktury tloušťky 350 nm u čipu D bylo zjištěno velmi malé zesílení. Odečet byl celkově velmi komplikován zašuměnými výstupními průběhy. V případě změny zátěže by však musela být opakována všechna předcházející frekvenční měření, proto k tomuto nebylo přikročeno. Získané závislosti zesílení a mezní frekvence na velikosti překryvu se však podařilo potvrdit.

Dále by bylo vhodné ověřit některé odchylky, které se vyskytly během měření. Vše nasvědčuje tomu, že šlo o chyby způsobené skutečnostmi popsány v úvodu kapitoly 4, avšak mohlo by jít o změny chování těchto organických struktur v důsledku problémů se stabilitou materiálu u některých vzorků.

V poslední řadě by doplněním této práce mohlo být zkoumání šumových vlastností těchto vzorků a případné vyhodnocení vhodnosti vzorků pro snímání biosignálů.

LITERATURA

- [1] RIVANY, J., S. INTAL, A. SALLEO, R. M. OWENS, M. BERRGREN a G. G. MALLIARAS. Organic electrochemical transistors. *Nature Reviews Materials* [online]. 2018, 3(17086) [cit. 2022-11-13]. ISSN 2058-8437.
- [2] RIVNAY, Jonathan, Pierre LELEUX, Michele SESSOLO, Dion KHODAGHOLY, Thierry HERVÉ, Michel FIOCCHI a George G. MALLIARAS. Organic Electrochemical Transistors with Maximum Transconductance at Zero Gate Bias. *Advanced Materials* [online]. 2013, 25(48), 7010-7014 [cit. 2022-11-13]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201303080
- [3] DIMOV, Ivan B., Maximilian MOSER, George G. MALLIARAS a Iain MCCULLOCH. Semiconducting Polymers for Neural Applications. *Chemical Reviews* [online]. 2022, 122(4), 4356-4396 [cit. 2022-11-13]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.1c00685
- [4] KHODAGHOLY, Dion, Thomas DOUBLET, Pascale QUILICHINI, et al. In vivo recordings of brain activity using organic transistors. *Nature Communications* [online]. 2013, 4(1) [cit. 2022-12-08]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms2573
- [5] RAZAVI, Behzad. Design of analog CMOS integrated circuits. 2. vydání. Los Angeles: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN ISBN 978-0-07-252493-2.
- [6] RIVNAY, Jonathan, Róisín M. OWENS a George G. MALLIARAS. The Rise of Organic Bioelectronics. *Chemistry of Materials* [online]. 2014, 26(1), 679-685 [cit. 2022-12-18]. ISSN 0897-4756. Dostupné z: doi:10.1021/cm4022003
- [7] RIVNAY, Jonathan, Marc RAMUZ, Pierre LELEUX, Adel HAMA, Miriam HUERTA a Roisin M. OWENS. Organic electrochemical transistors for cell-based impedance sensing. *Applied Physics Letters* [online]. 2015, 106(4) [cit. 2022-12-22]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.4906872
- [8] ZABIHIPOUR, Marzieh, Deyu TU, Jan STRANDBERG, Magnus BERGGREN, Isak ENGQUIST a Peter ANDERSSON ERSMAN. Designing Inverters Based on Screen Printed Organic Electrochemical Transistors Targeting Low-Voltage and High-Frequency Operation. *Advanced Materials Technologies* [online]. 2021, 6(12) [cit. 2022-12-26]. ISSN 2365-709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.202100555
- [9] 4200A-SCS Parameter Analyzer Datasheet [online]. [cit. 2022-12-31].
- [10] Cascade MPS 150 Probe Analyzer datasheet [online]. [cit. 2022-12-31].
- [11] NIELSEN, Christian B., Dan-Tiberiu SBIRCEA, Sahika INAL, et al. *Nature Communications* [online]. 2016, 7(1) [cit. 2023-01-01]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms13066
- [12] WANG, Naixiang, Liuping XIE, Haifeng LING, Venkatesh PIRADI, Li LI, Xingzhu WANG, Xunjin ZHU a Feng YAN. Ethylenedioxythiophene incorporated diketopyrrolopyrrole conjugated polymers for high-performance

- organic electrochemical transistors. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2021, 9(12), 4260-4266 [cit. 2023-01-02]. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/D1TC00338K
- [13] 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 [cit. 2023-03-09]. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-6779(02)00518-0
- [14] FAN, Zeng a Jianyong OUYANG. Thermoelectric Properties of PEDOT: PSS. *Advanced Electronic Materials* [online]. 2019, 5(11) [cit. 2023-03-09]. ISSN 2199-160X. Dostupné z: doi:10.1002/aelm.201800769
- [15] WEI, Qingshuo, Masakazu MUKAIDA, Yasuhisa NAITOH a Takao ISHIDA. Morphological Change and Mobility Enhancement in PEDOT: PSS by Adding Co-solvents. *Advanced Materials* [online]. 2013, 25(20), 2831-2836 [cit. 2023-03-15]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201205158
- [16] LIU, Xingyu, Xiao-Lei SHI, Li ZHANG, Wei-Di LIU, Yanling YANG a Zhi-Gang CHEN. One-step post-treatment boosts thermoelectric properties of PEDOT: PSS flexible thin films [online]. 2023, 132, 81-89 [cit. 2023-03-22]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2022.05.047
- [17] OUYANG, Jianyong. "Secondary doping" methods to significantly enhance the conductivity of PEDOT: PSS for its application as transparent electrode of optoelectronic devices. *Displays* [online]. 2013, 34(5), 423-436 [cit. 2023-04-10]. ISSN 01419382. Dostupné z: doi:10.1016/j.displa.2013.08.007
- [18] STRÍTESKÝ, Stanislav, Aneta MARKOVÁ, Jan VÍTEČEK, et al. Printing inks of electroactive polymer PEDOT: PSS. *Journal of Biomedical Materials Research Part A* [online]. 2018, 106(4), 1121-1128 [cit. 2023-04-12]. ISSN 15493296. Dostupné z: doi:10.1002/jbm.a.36314
- [19] POLYRAVAS, Anastasios G, Vincenzo F CURTO, Nathan SCHAEFER, Andrea Bonaccini CALIA, Anton GUIMERA-BRUNET, Jose A GARRIDO a George G MALLIARAS. Impact of contact overlap on transconductance and noise in organic electrochemical transistors. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2019, 4(4) [cit. 2023-04-12]. ISSN 2058-8585. Dostupné z: doi:10.1088/2058-8585/ab4dc4
- [20] Nano and More GmbH: The World of Scanning Probes [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.nanoandmore.com/what-is-atomic-force-microscopy>
- [21] WANG, G, X TAO a R WANG. Fabrication and characterization of OLEDs using PEDOT: PSS and MWCNT nanocomposites. *Composites Science and Technology* [online]. 2008, 68(14), 2837-2841 [cit. 2023-05-09]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2007.11.004
- [22] *Materials Today* [online]. 7. 2004 [cit. 2023-05-09]. ISSN 13697021. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702104004018>

- [23] Neurons Generate Voltage Changes to Code Information [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z:
[https://socialsci.libretexts.org/Bookshelves/Psychology/Biopsychology_\(OERI\)_DRAFT_for_Review/05%3A_Communication_within_the_Nervous_System/5.02%3A_Neurons_Generate_Voltage_Changes_to_Code_Information](https://socialsci.libretexts.org/Bookshelves/Psychology/Biopsychology_(OERI)_DRAFT_for_Review/05%3A_Communication_within_the_Nervous_System/5.02%3A_Neurons_Generate_Voltage_Changes_to_Code_Information)
- [24] RIVNAY, Jonathan, Pierre LELEUX, Marc FERRO, et al. High-performance transistors for bioelectronics through tuning of channel thickness. *Science Advances* [online]. 2015, 1(4) [cit. 2023-05-10]. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1400251

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FET	Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OFET	Organic Field Effect Transistor
OECT	Organic Electro-chemical Transistor
PEDOT	Polyetylen dioxytifen
PSS	Polystyren sulfonát
NMOS	MOSFET s kanálem typu N
PMOS	MOSFET s kanálem typu P
EEG	Elektroencefalografie
ECoG	Elektrokortikografie
SNR	Signal to Noise Ratio
EIS	Electrochemical Impedance Sensing
NDI	Naftalen tetrakarboxyl diimid
DMSO	Dimetyl sulfoxid
PEO	Oxid polyetylenu
EG	Etylen glykol
PDMS	Polydimetyl siloxan
ITO	Oxid india
Al	Hliník
PET	Polyetylentereftalát
Alq ₃	Tris(8-Hydroxyquinolinate)aluminum
Ti	Titan
Au	Zlato

Symboly:

G	Gate	
D	Drain	
S	Source	
I_D	Proud drainem tranzistoru	[A]
I_G	Proud elektrodou Gate tranzistoru	[A]
U_{GS}	Napětí mezi elektrodami Gate a Source	[V]
U_{TH}	Prahové napětí	[V]
U_{DS}	Napětí mezi elektrodami Drain a Source	
g_m	Transkonduktance	[S]
C_{CH}	Kapacita kanálu	[F]
C_G	Kapacita G elektrody	[F]
w	Šířka kanálu tranzistoru	[m]
l	Délka kanálu tranzistoru	[m]
d	Tloušťka kanálu tranzistoru	[m]
μ	Pohyblivost volných nosičů náboje	[m ² /Vs]
C^*	Objemová kapacita kanálu	[F/m ³]
Q	Elektrický náboj	[C]
ε_0	Permitivita vakua	[F/m]
ε_r	Permitivita dielektrika	[-]
S	Plocha kovové elektrody	[m ²]
$\sigma(I_D)$	Směrodatná odchylka proudu I_D	[A]
$\bar{\chi}(I_D)$	Střední hodnota proudu I_D	[A]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1: Konstrukce MOS tranzistoru s kanálem typu N	11
1.2: Přenosové a výstupní charakteristiky NMOS	11
1.3: Řez strukturou tranzistoru OECT	13
1.4: OECT typu P v depletičním režimu a jeho přenosová charakteristika.....	13
1.5: OECT typu P v akumulacním režimu a jeho přenosová charakteristika.....	14
1.6: Elektrické schéma OECT [1]	15
1.7: Ionový obvod a rozložení potenciálu ve struktuře OECT [1]	16
1.8: Srovnání účinnosti indukování náboje polem řízených tranzistorů [1].....	18
2.1: Chemická stavba materiálu PEDOT:PSS [6].....	20
2.2: Příklad provedení sekundární dotace metodou post – treatment.....	21
2.3: Model morfologického uspořádání při sekundární dotaci [15]	21
2.4: Počáteční uvolňování materiálu ve vodě u inkoustu B [18].....	23
2.5: Uvolňování materiálu ve vodě po 30 minutách [18].....	23
2.6: Stabilita a odpor v čase [18]	24
2.7: Neuron a ionty v tělní tekutině [24].....	27
2.8: Zapojení OECT při EEG měření a získané signály [24].....	28
2.9: Princip sledování činnosti neuronů [1]	29
2.10: Organické a anorganické materiály pro biologická rozhraní [6].....	30
2.11: Aktivita mozku krysy měřená pomocí OECT a běžných elektrod [6]	31
2.12: Vrstva buněčné tkáně při měření impedance [1].....	32
2.13: a) Schéma zapojení. b) Příklad vstupních signálů a reakce výstupního proudu pro 5 různých frekvencí. c), d) Porovnání EIS křivek a fázových posunů.	33
2.14: Typické paralelní uspořádání vláken tkaniny [1].....	34
2.15: Zapojení OECT ve struktuře invertoru a závislost U_{OUT} na odporu R_3 [8]	34
2.16: Napětí U_{OUT} pro různé hodnoty odporů děliče a různé frekvence U_{IN} [8]	35
2.17: Napětí U_{OUT} pro střední hodnoty odporů a frekvence 10 a 30 Hz [8].....	36
2.18: a) Princip OLED. b) Příklad konstrukce OLED s materiálem PEDOT:PSS. c) Tříbuněková struktura pixelu.....	37
2.19: Příklad struktury neurální sítě s možností globální kontroly [1].....	38
3.1: Analyzátor parametrů Keithley 4200 [9]	40
3.2: Zařízení Cascade MPS 150 [10]	41
3.3: Rozložení waferu v souřadnicovém systému a označení tranzistorů	42
3.4: Konstrukce struktur z článku s různými překryvy kontaktů [19].....	43
3.5: Postup výroby vzorků	44
3.6: Pomůcky a vybavení používané v laboratoři CEITEC	45
3.7: Schématická zapojení jednotlivých měření.....	46
3.8: a) Nanesení okénka z PDMS. b) Aplikování elektrolytu a ponoření elektrody G. c) Detail kontaktování. d) Ukázka struktur pod mikroskopem.	47
3.9: Příklad pulzů – A2 T1.1 100%	49
4.1: Srovnání výstupních charakteristik vzorků A pro 3 různé překryvy	54
4.2: Srovnání přenosových charakteristik vzorků A, leptané zlato	55
4.3: Poškozené vzorky	57
4.4: Srovnání frekvenčních charakteristik pro čip A3.....	58

4.5: Srovnání mezních frekvencí v závislosti na překryvu	58
4.6: Srovnání spínacích časů v závislosti na překryvu pro jednotlivé čipy	60
4.7: Vliv překryvu na průběh pulzní odezvy – čip A5	61
5.1: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – leptané zlato	75
5.2: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – SiO ₂	75
5.3: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – tranzistory T3	75
5.4: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – leptané zlato	76
5.5: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – SiO ₂	76
5.6: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – tranzistory T3	76
5.7: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – leptané zlato	77
5.8: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – SiO ₂	77
5.9: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – tranzistory T3	77
5.10: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A5 – leptané zlato	78
5.11: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A5 – SiO ₂	78
5.12: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A5 – tranzistory T3	78
5.13: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, leptané zlato	79
5.14: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, SiO ₂	79
5.15: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, tranzistory T3	79
5.16: Vzorok A, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem	80
5.17: Vzorok A, statistika proudu I_D , kontakty s SiO ₂	81
5.18: Vzorok A, statistika proudu I_D , tranzistory T3	82
5.19: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – leptané zlato	83
5.20: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – SiO ₂	83
5.21: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – tranzistory T3	83
5.22: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B3 – leptané zlato	84
5.23: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B3 – SiO ₂	84
5.24: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B3 – tranzistory T3	84
5.25: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – leptané zlato	85
5.26: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – SiO ₂	85
5.27: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – tranzistory T3	85
5.28: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – leptané zlato	86
5.29: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – SiO ₂	86
5.30: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – tranzistory T3	86
5.31: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, leptané zlato	87
5.32: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, SiO ₂	87
5.33: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, tranzistory T3	87
5.34: Vzorok B, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem	88
5.35: Vzorok B, statistika proudu I_D , kontakty s SiO ₂	89
5.36: Vzorok B, statistika proudu I_D , tranzistory T3	90
5.37: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – leptané zlato	91
5.38: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – SiO ₂	91
5.39: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – tranzistory T3	91
5.40: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – leptané zlato	92
5.41: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – SiO ₂	92
5.42: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – tranzistory T3	92
5.43: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – leptané zlato	93
5.44: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – SiO ₂	93
5.45: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – tranzistory T3	93

5.46: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – leptané zlato	94
5.47: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – SiO ₂	94
5.48: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – tranzistory T3	94
5.49: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, leptané zlato	95
5.50: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, SiO ₂	95
5.51: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, tranzistory T3	95
5.52: Vzorky D, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem	96
5.53: Vzorky D, statistika proudu I_D , kontakty s SiO ₂	97
5.54: Vzorky D, statistika proudu I_D , tranzistory T3	98
5.55: Porovnání frekvenčních charakteristik čipů A a B	99
5.56: Porovnání frekvenčních charakteristik čipu D2	100
5.57: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – leptané zlato	104
5.58: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – SiO ₂	105
5.59: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – tranzistory T3	106
5.60: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – leptané zlato	108
5.61: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – SiO ₂	109
5.62: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – tranzistory T3	110
5.63: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – leptané zlato	112
5.64: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – SiO ₂	113
5.65: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – tranzistory T3	114
5.66: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – leptané zlato	116
5.67: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – SiO ₂	116
5.68: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – tranzistory T3	116
5.69: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – leptané zlato	117
5.70: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – SiO ₂	117
5.71: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – tranzistory T3	117
5.72: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – leptané zlato	118
5.73: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – SiO ₂	118
5.74: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – tranzistory T3	118
5.75: Porovnání frekvenčních charakteristik čipů A a B	119
5.76: Porovnání frekvenčních charakteristik čip D	120
5.77: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – leptané zlato	124
5.78: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – SiO ₂	125
5.79: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – tranzistory T3	126
5.80: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – leptané zlato	128
5.81: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – SiO ₂	129
5.82: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – tranzistory T3	130
5.83: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – leptané zlato	132
5.84: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – SiO ₂	133
5.85: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – tranzistory T3	134

SEZNAM TABULEK

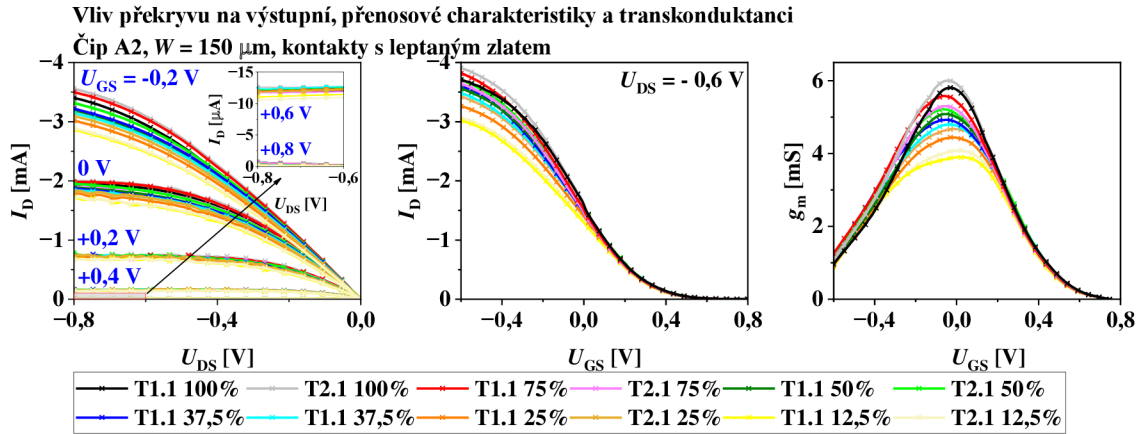
3.1 Nejdůležitější rozšiřující moduly pro přístroj Keithley 4200	39
3.2 Nastavené parametry měření.....	48
5.1 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip A3	101
5.2 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip B2	102
5.3 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip D2	103
5.4 Získané časové konstanty – čip A5.....	107
5.5 Získané časové konstanty – čip B4.....	111
5.6 Získané časové konstanty – čip D3.....	115
5.7 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip A2	121
5.8 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip B2	122
5.9 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip D2	123
5.10 Získané časové konstanty – čip A2.....	127
5.11 Získané časové konstanty – čip B2.....	131
5.12 Získané časové konstanty – čip D2.....	135

SEZNAM PŘÍLOH

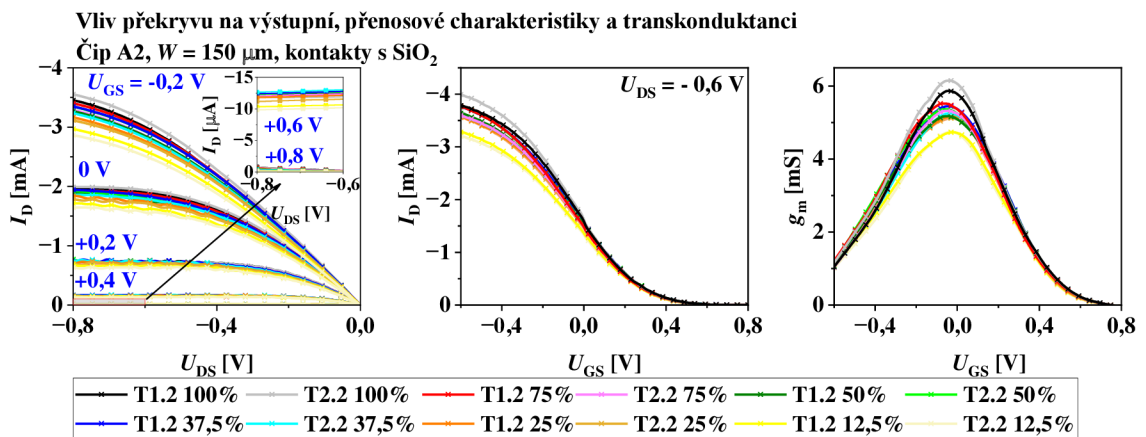
PŘÍLOHA A - ZÍSKANÁ DATA – WAFER 650 OT./MIN	75
PŘÍLOHA B - FREKVENČNÍ A PULZNÍ CHARAKTERISTIKY	99
PŘÍLOHA C - ZÍSKANÁ DATA – WAFER 2000 OT./MIN	116

Příloha A - Získaná data – wafer 650 ot./min

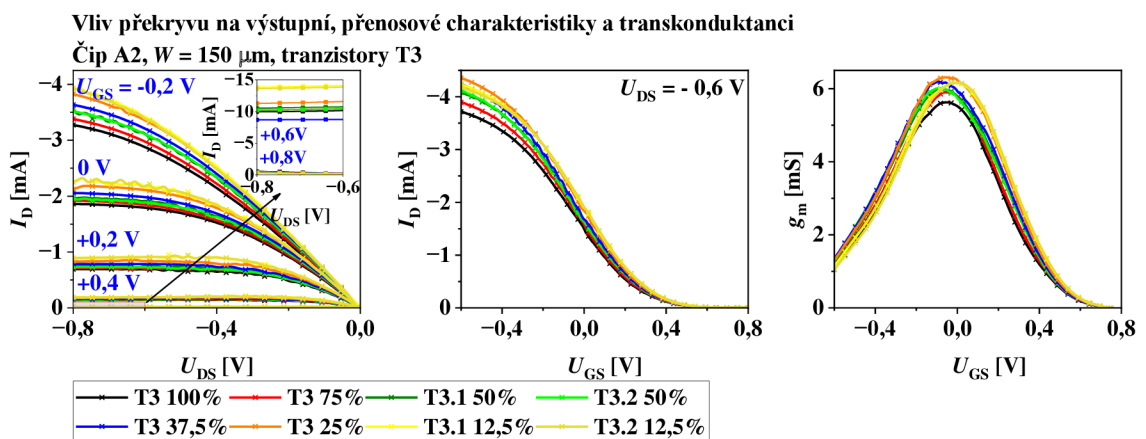
A.1 Stejnoseměrné charakteristiky – čip A2



Obrázek 5.1: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – leptané zlato



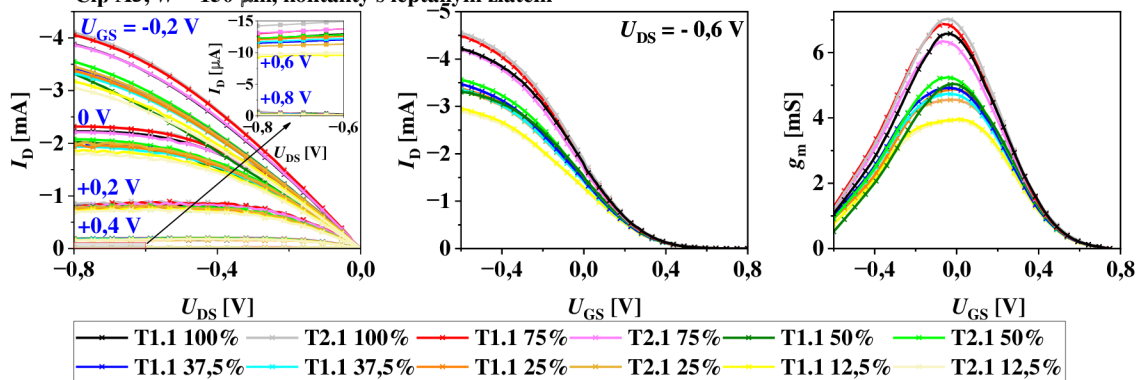
Obrázek 5.2: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – SiO_2



Obrázek 5.3: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – tranzistory T3

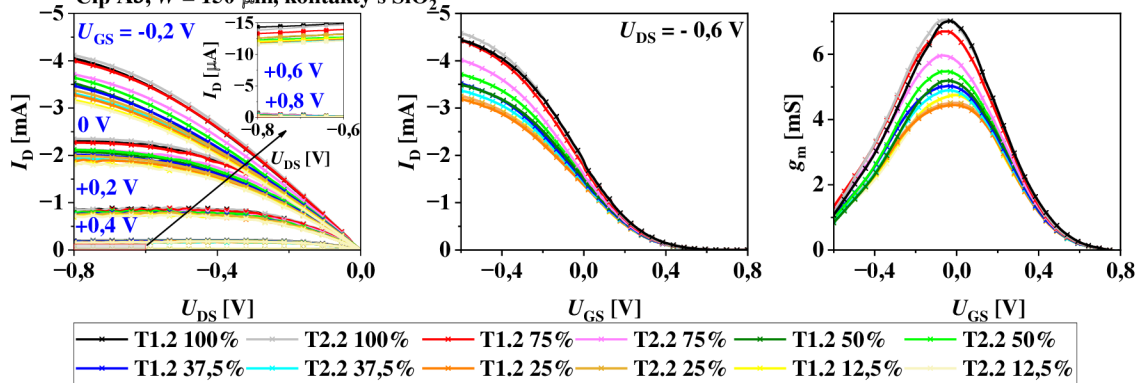
A.2 Stejnoseměrné charakteristiky – čip A3

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci
 Čip A3, $W = 150 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



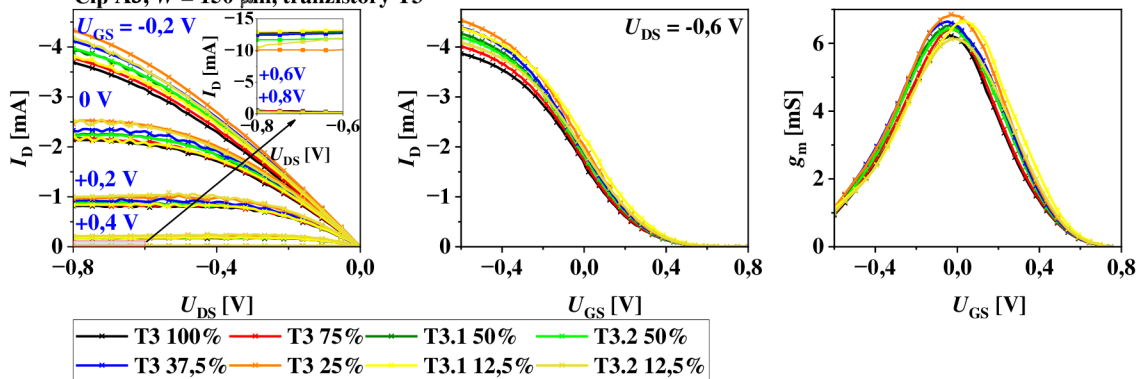
Obrázek 5.4: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci
 Čip A3, $W = 150 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



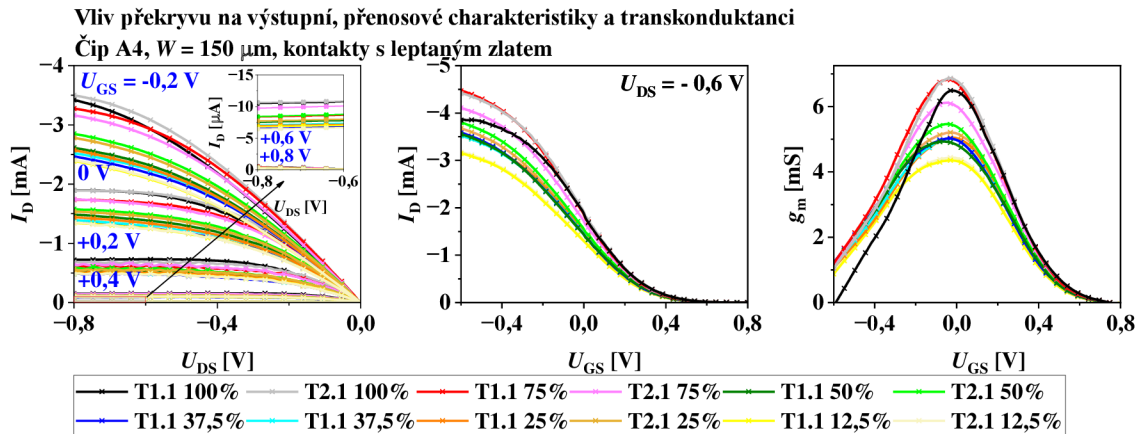
Obrázek 5.5: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci
 Čip A3, $W = 150 \mu\text{m}$, tranzistory T3

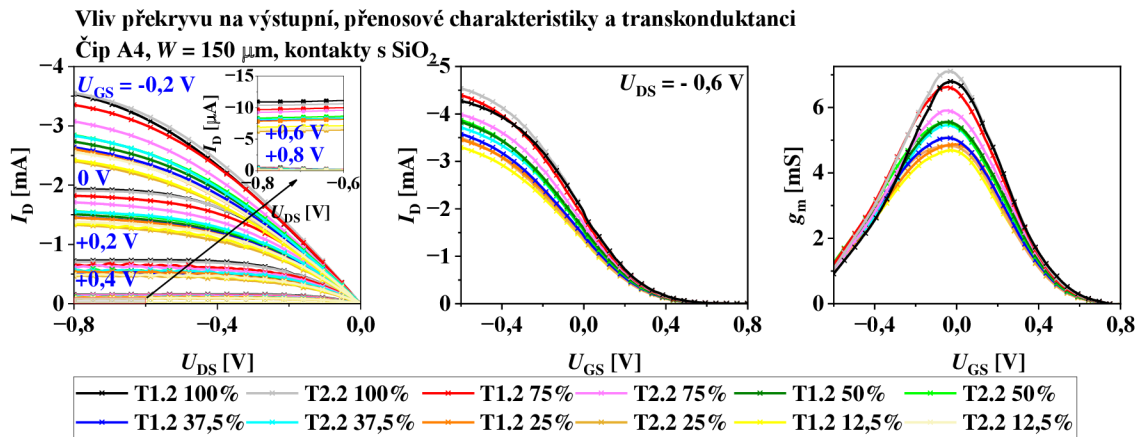


Obrázek 5.6: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A3 – tranzistory T3

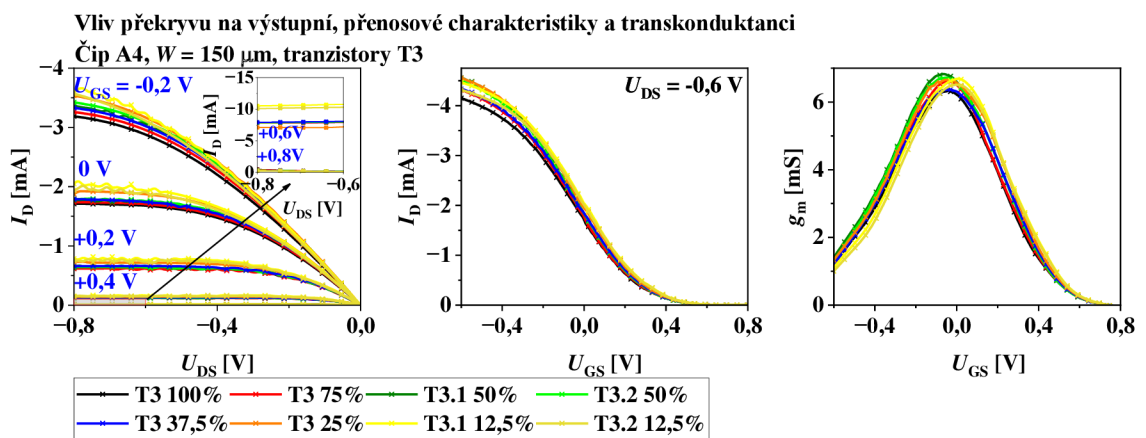
A.3 Stejnoseměrné charakteristiky – čip A4



Obrázek 5.7: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – leptané zlato

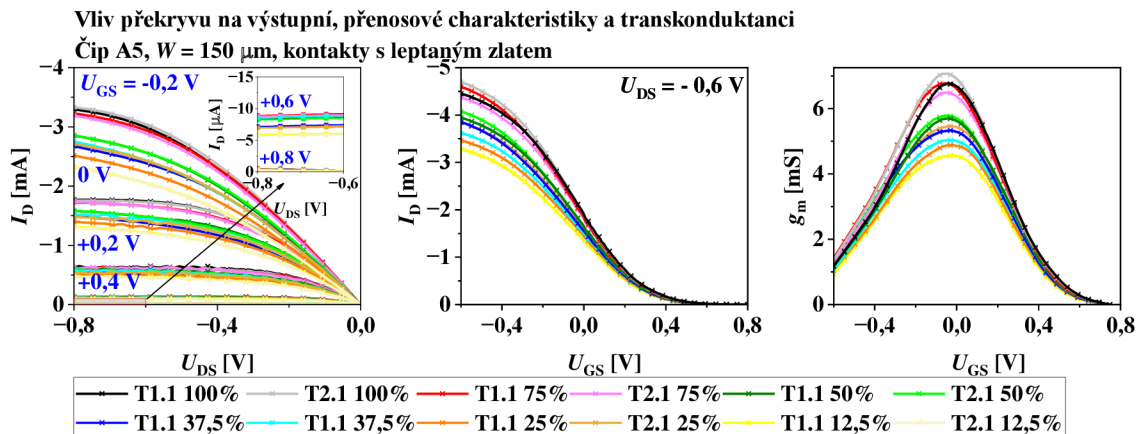


Obrázek 5.8: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – SiO_2

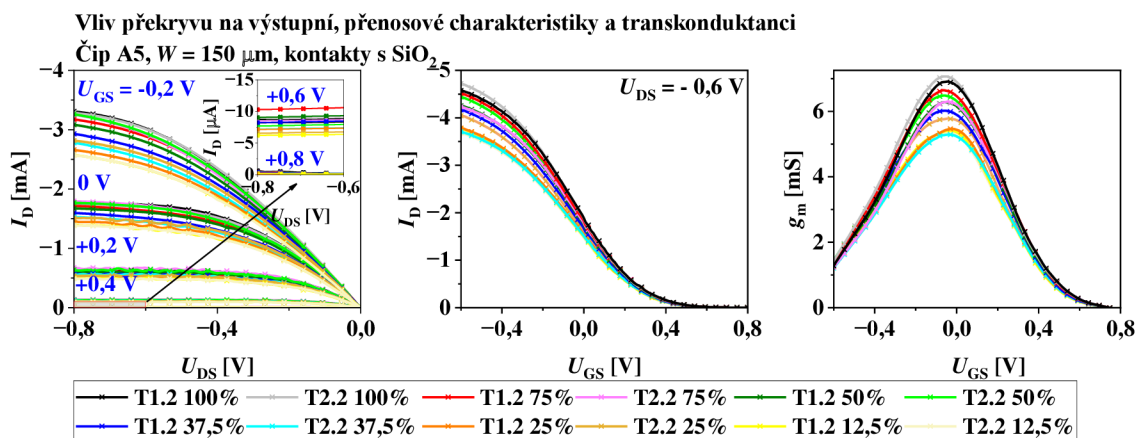


Obrázek 5.9: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A4 – tranzistory T3

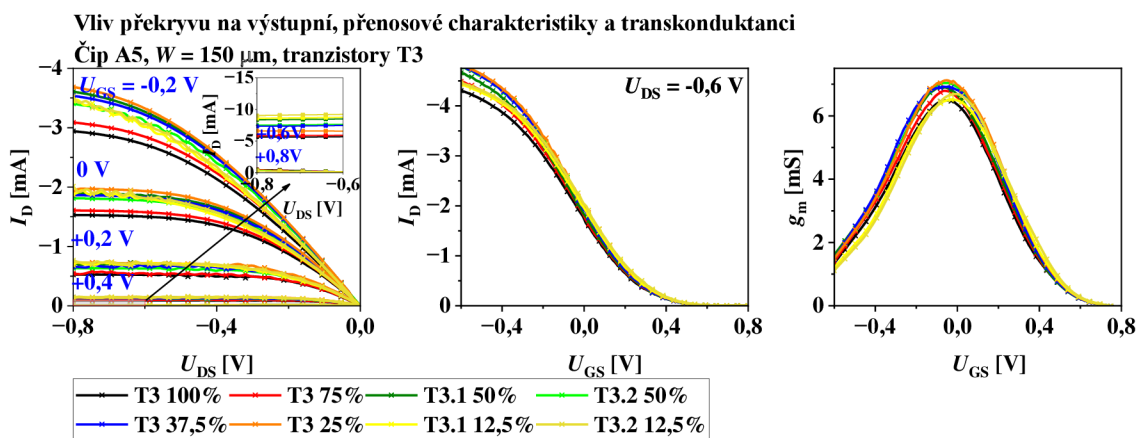
A.4 Stejnosemřné charakteristiky – řip A5



Obrázek 5.10: Stejnosemřné charakteristiky řipu A5 – leptané zlato



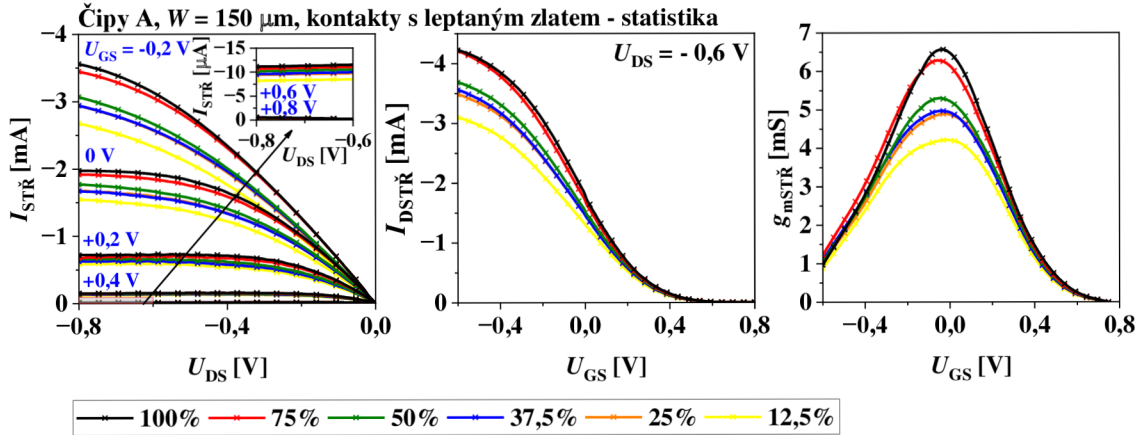
Obrázek 5.11: Stejnosemřné charakteristiky řipu A5 – SiO_2



Obrázek 5.12: Stejnosemřné charakteristiky řipu A5 – tranzistory T3

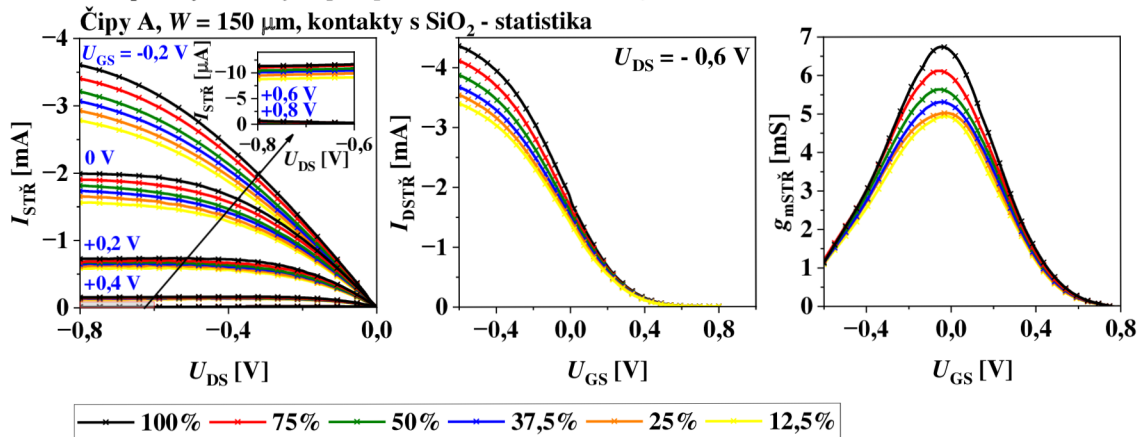
A.5 Statistika čipy A

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci



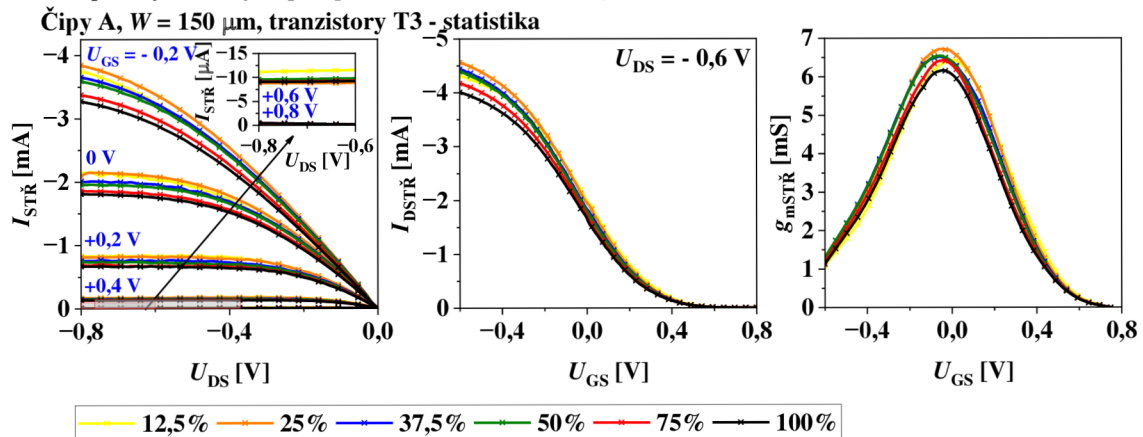
Obrázek 5.13: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

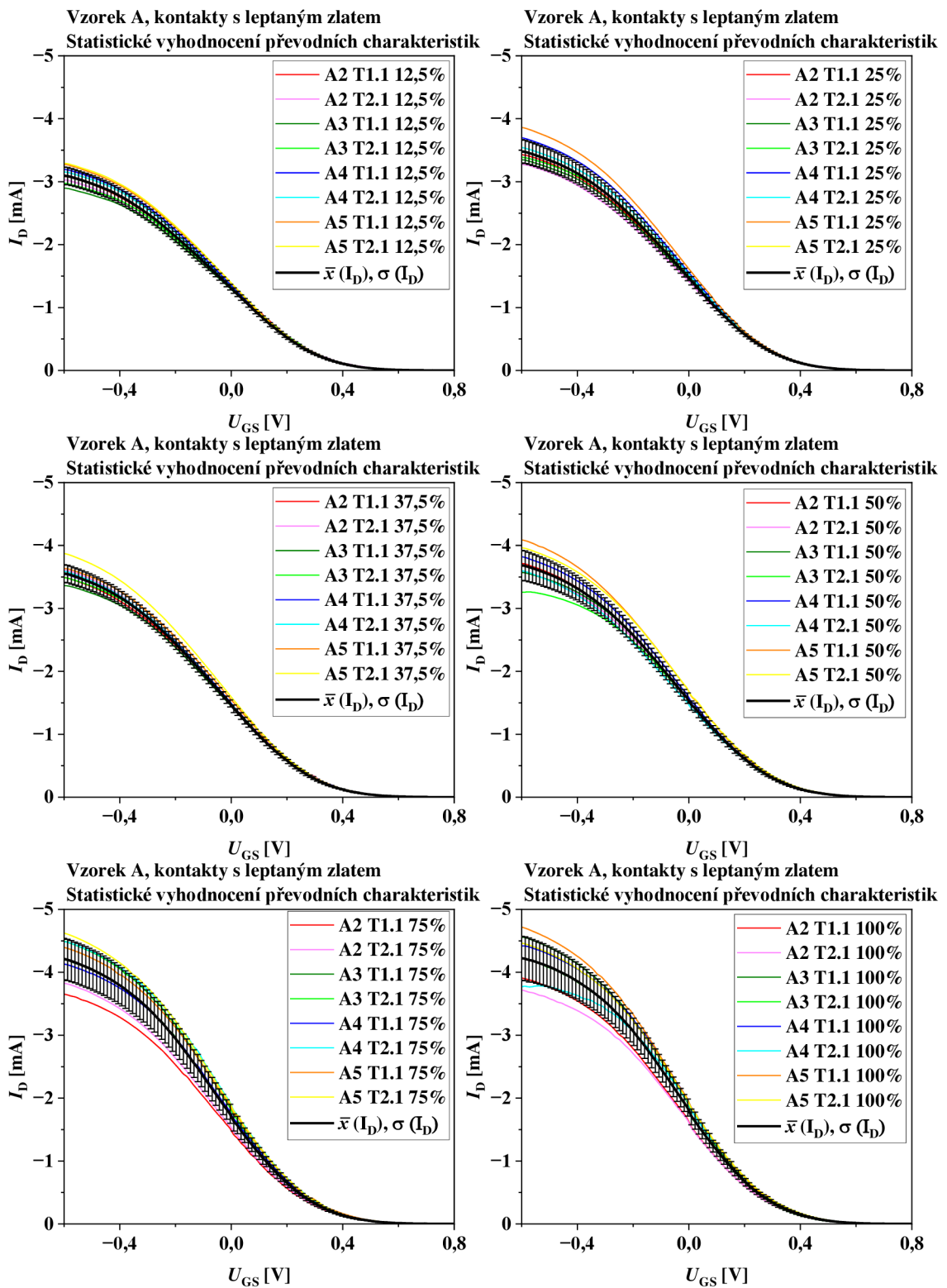


Obrázek 5.14: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, SiO_2

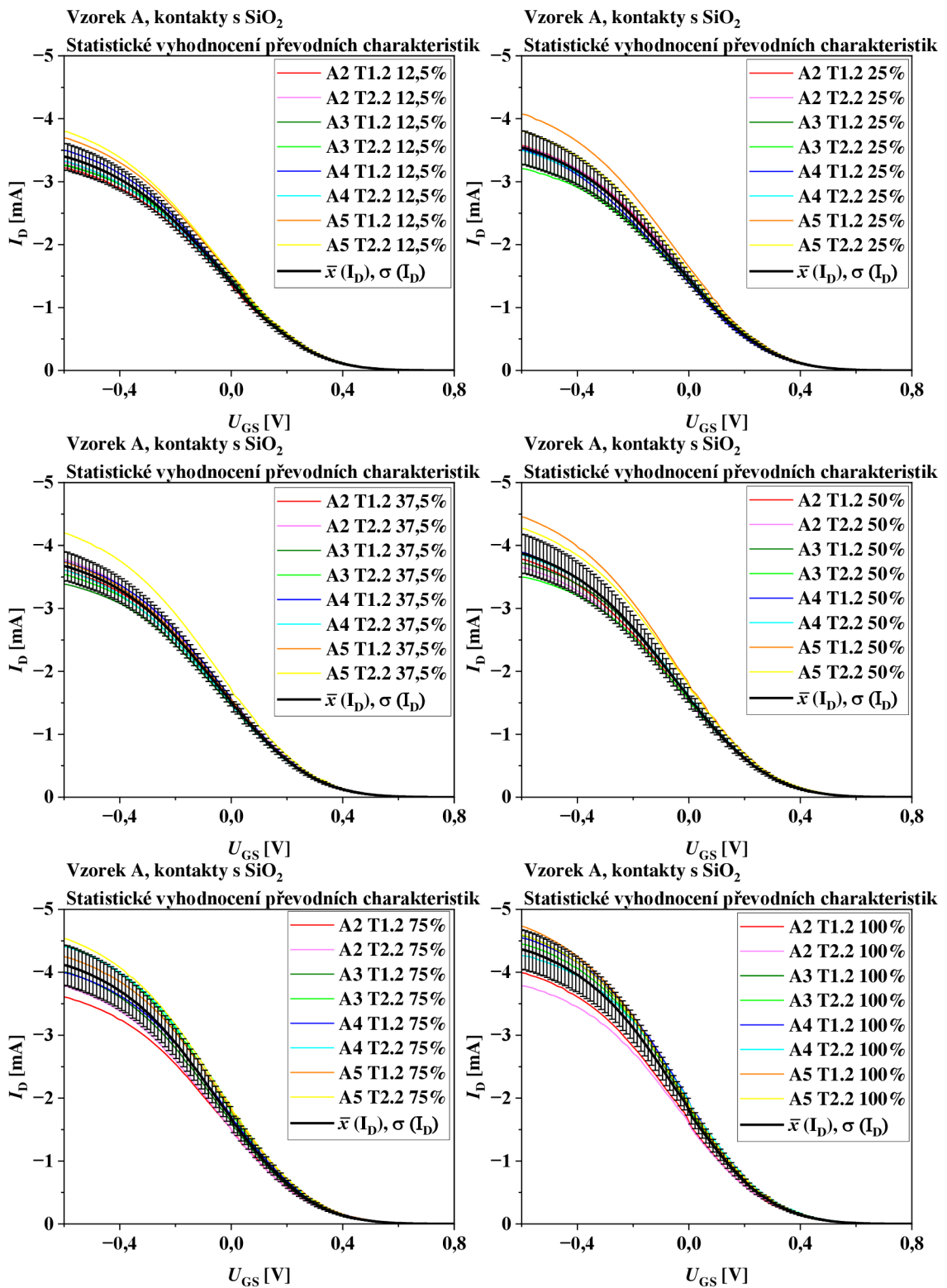
Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci



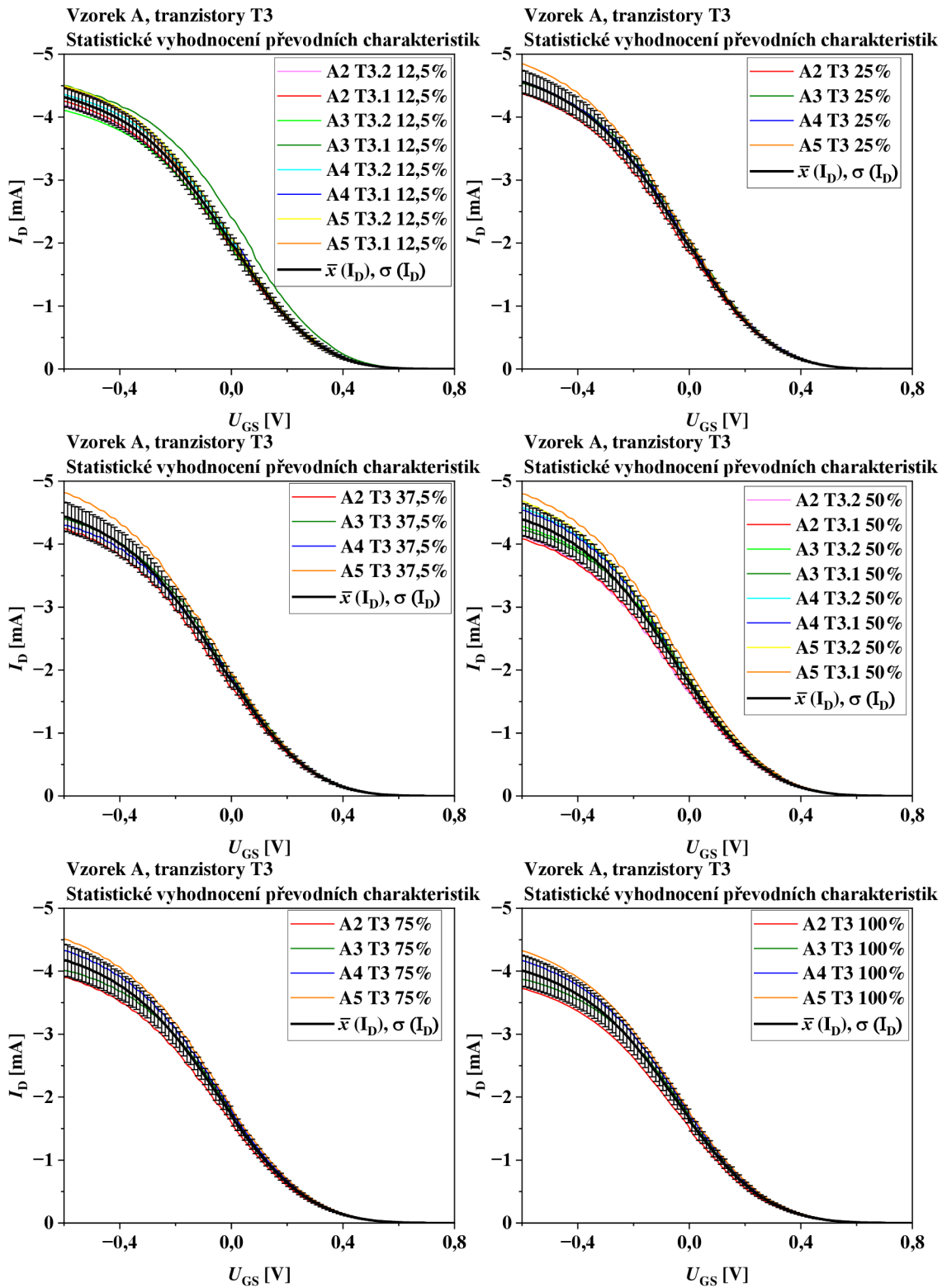
Obrázek 5.15: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů A, tranzistory T3



Obrázek 5.16: Vzorky A, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem

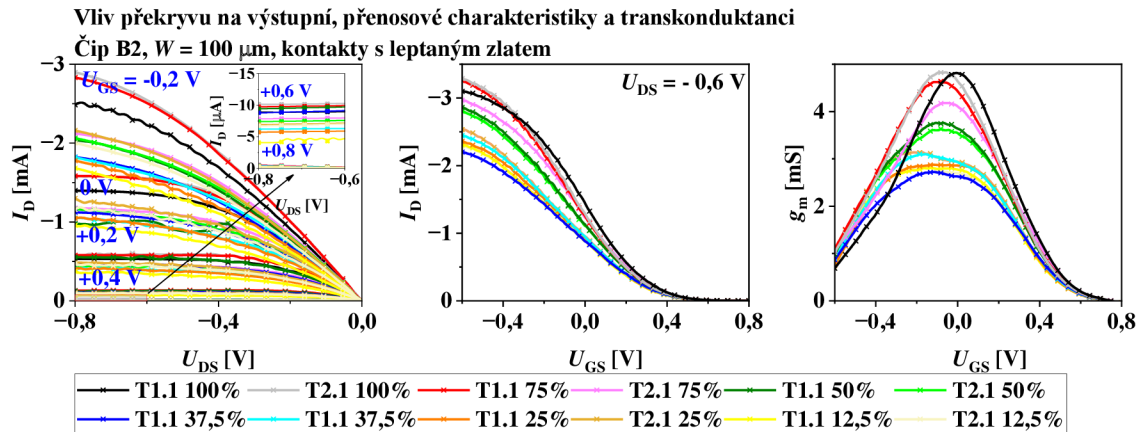


Obrázek 5.17: Vzorky A, statistika proudu I_D , kontakty s SiO₂

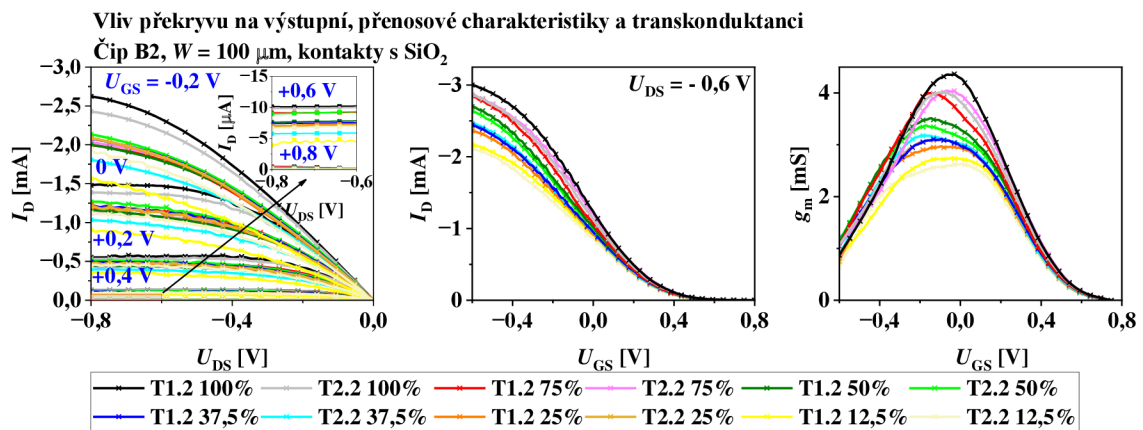


Obrázek 5.18: Vzorok A, statistika proudu I_D , tranzistory T3

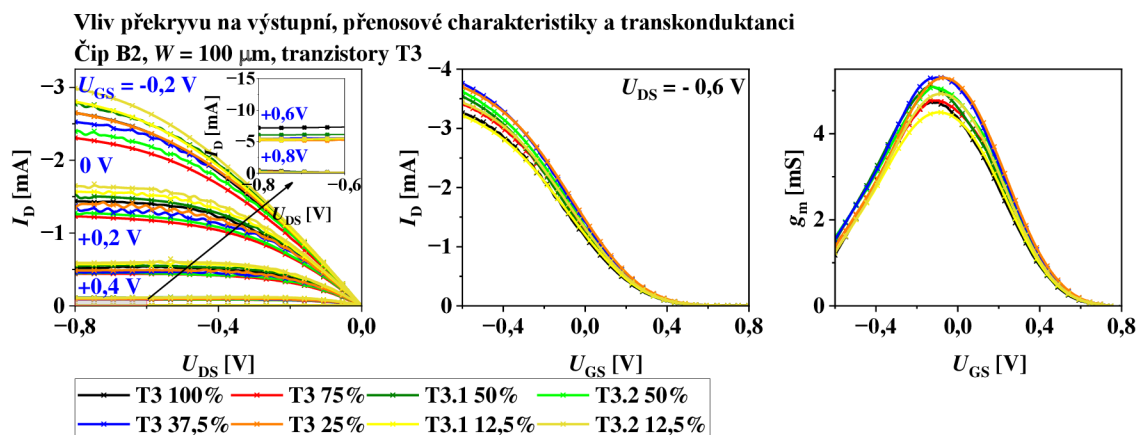
A.6 Stejnosemřné charakteristiky – řip B2



Obrázek 5.19: Stejnosemřné charakteristiky řipu B2 – leptané zlato

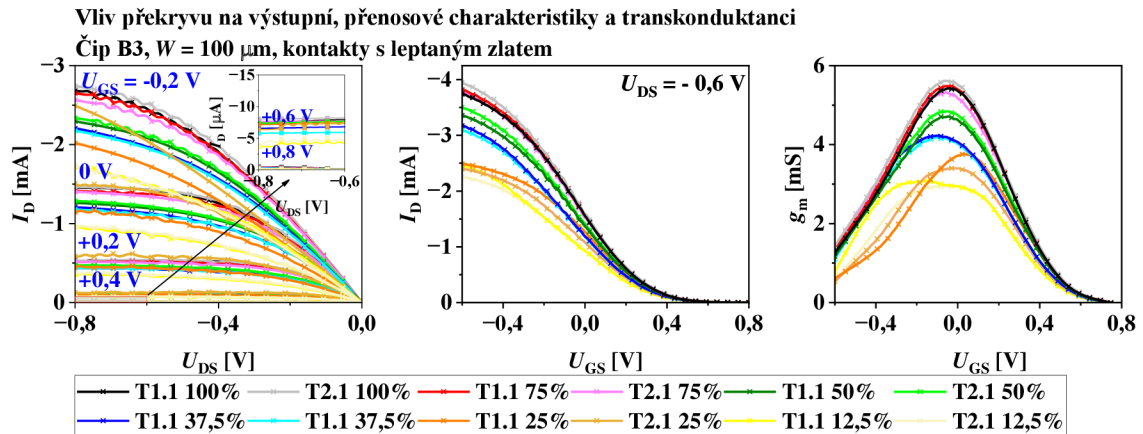


Obrázek 5.20: Stejnosemřné charakteristiky řipu B2 – SiO_2

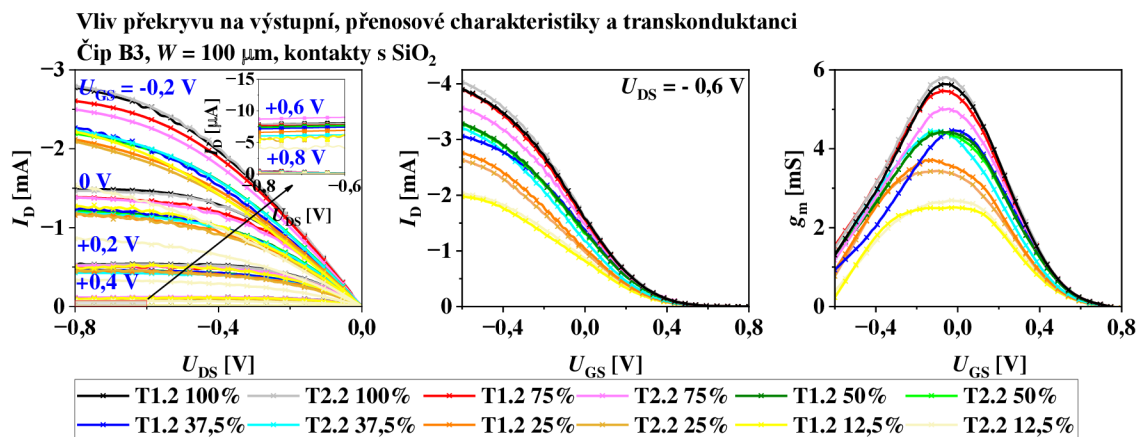


Obrázek 5.21: Stejnosemřné charakteristiky řipu B2 – tranzistory T3

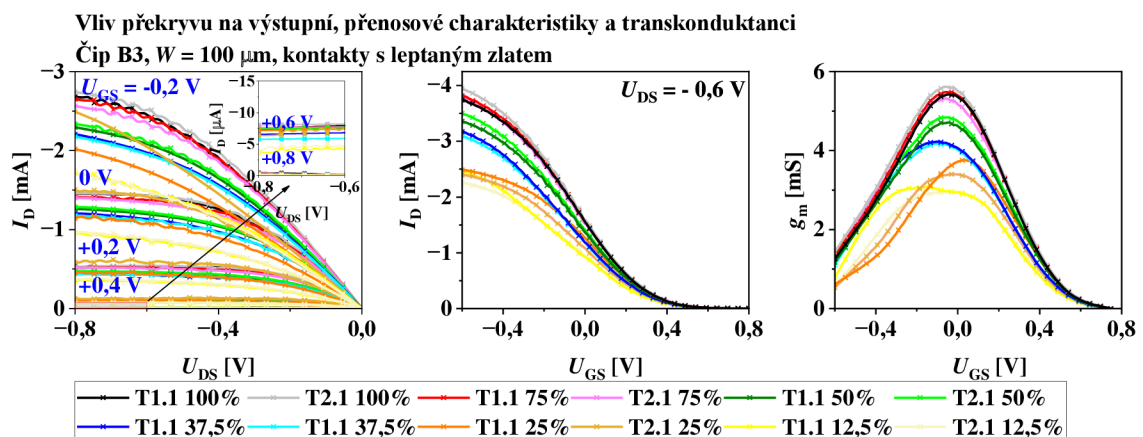
A.7 Stejnosemřné charakteristiky – řip B3



Obrázek 5.22: Stejnosemřné charakteristiky řipu B3 – leptanř zlatem

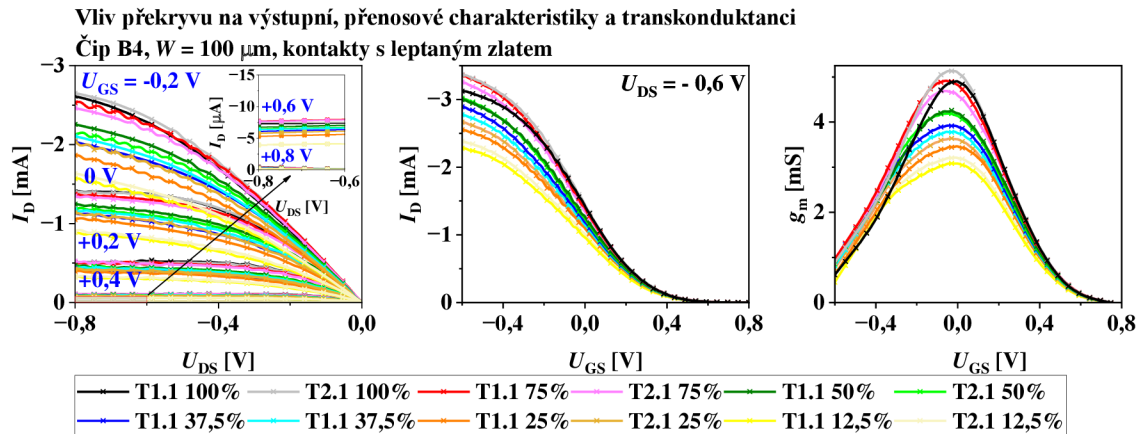


Obrázek 5.23: Stejnosemřné charakteristiky řipu B3 – SiO_2

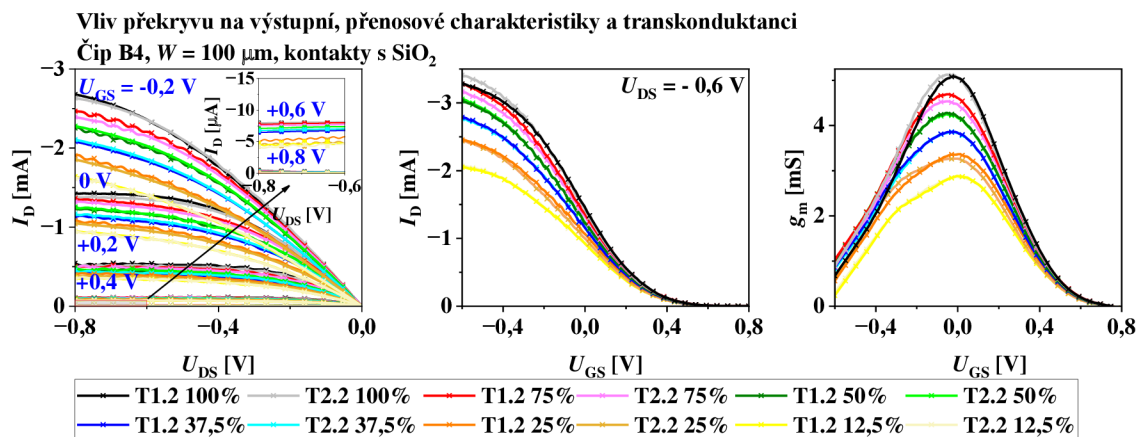


Obrázek 5.24: Stejnosemřné charakteristiky řipu B3 – tranzistory T3

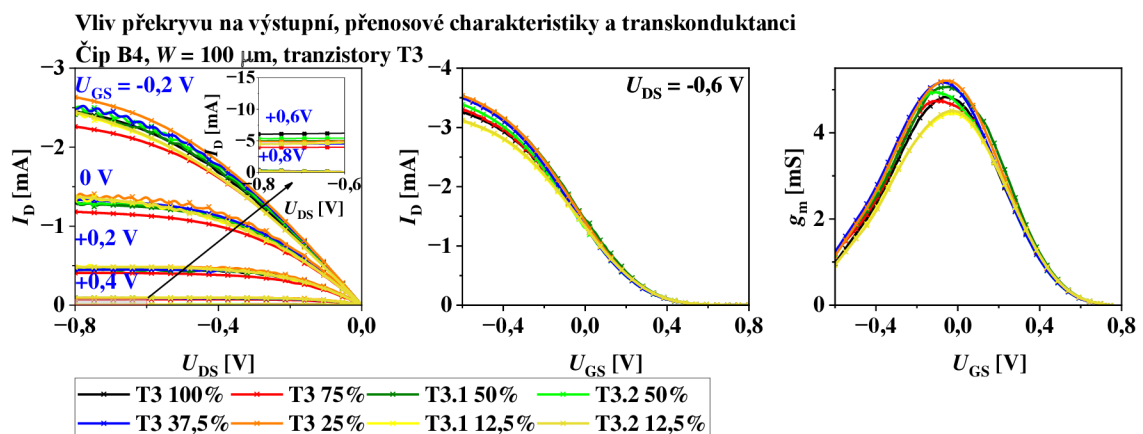
A.8 Stejnoseměrné charakteristiky – čip B4



Obrázek 5.25: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – leptané zlato

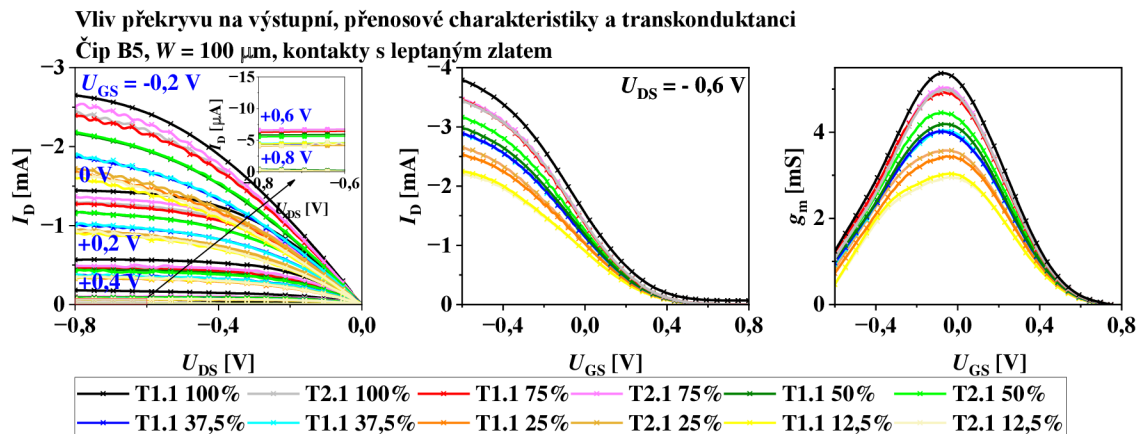


Obrázek 5.26: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – SiO_2

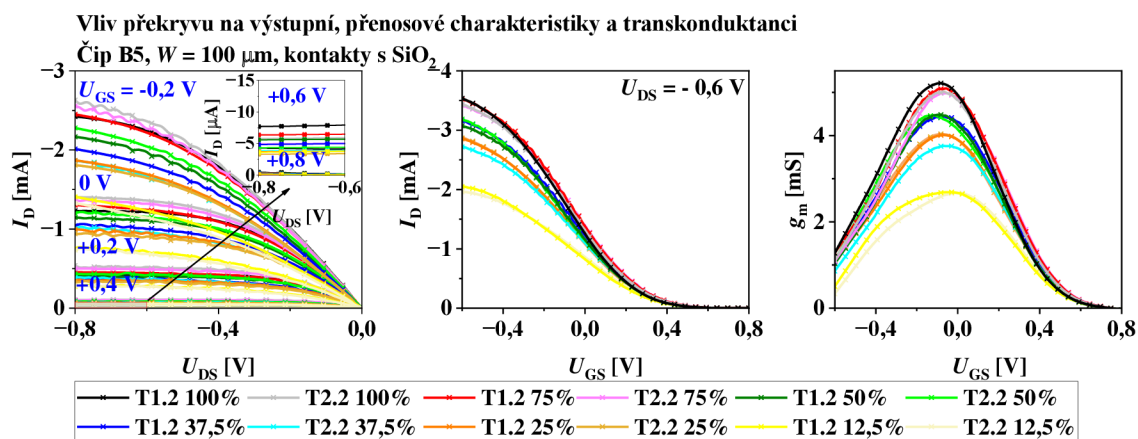


Obrázek 5.27: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B4 – tranzistory T3

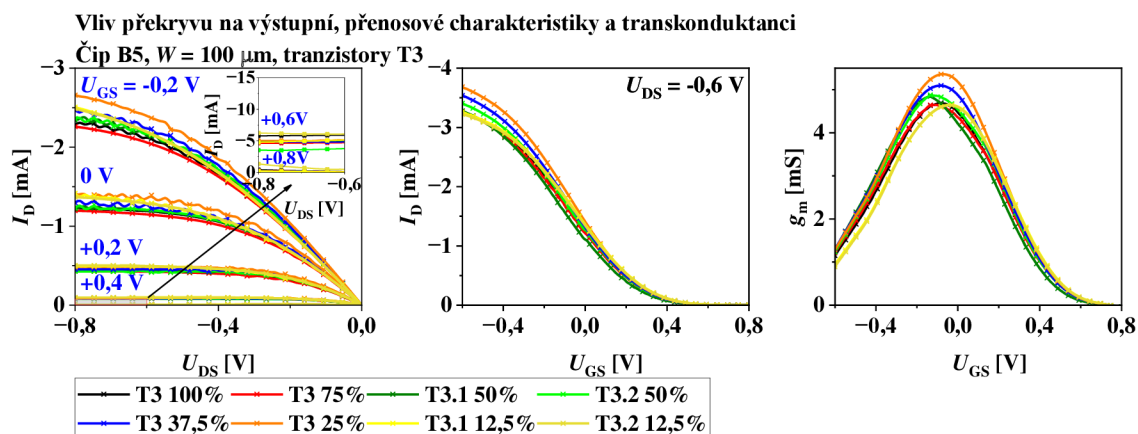
A.9 Stejnoseměrné charakteristiky – čip B5



Obrázek 5.28: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – leptané zlato



Obrázek 5.29: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – SiO_2

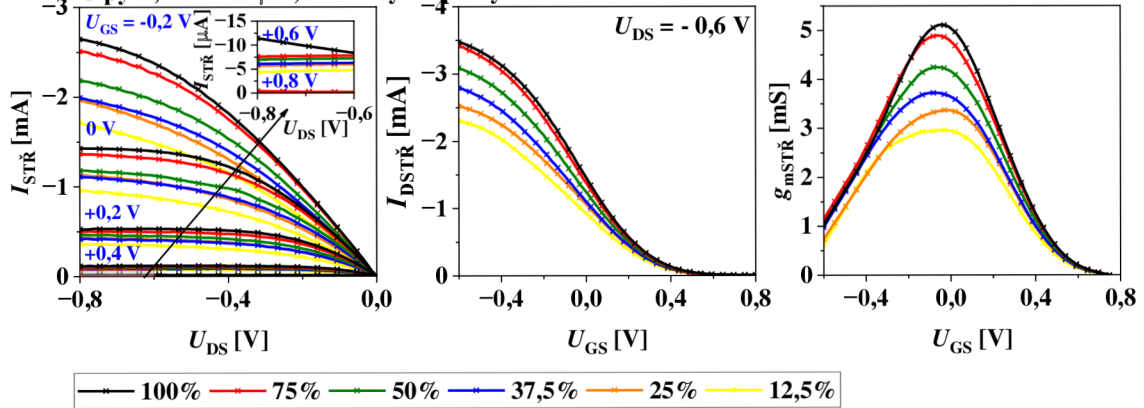


Obrázek 5.30: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B5 – tranzistory T3

A.10 Statistika čipy B

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

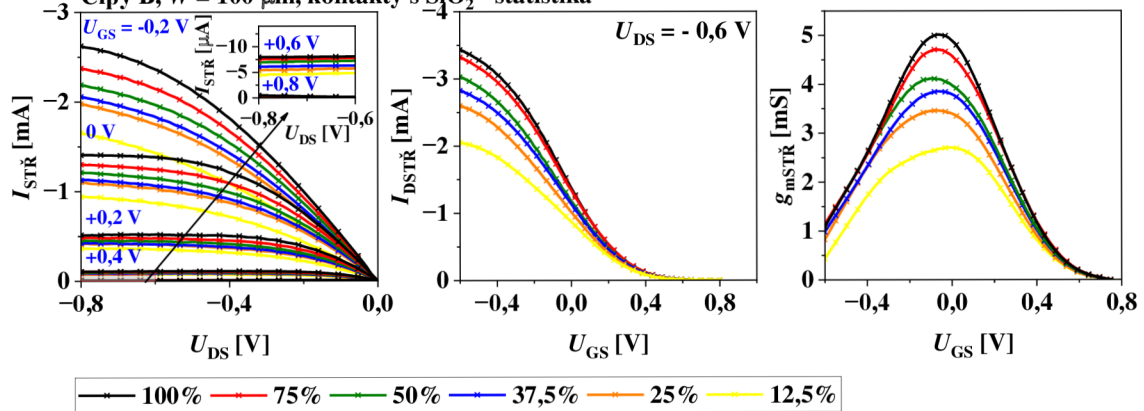
Čipy B, $W = 100 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem - statistika



Obrázek 5.31: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

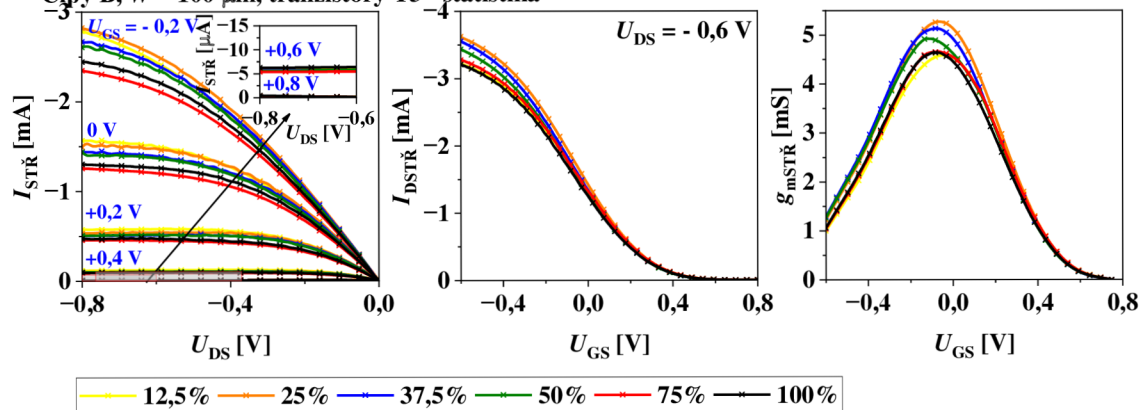
Čipy B, $W = 100 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2 - statistika



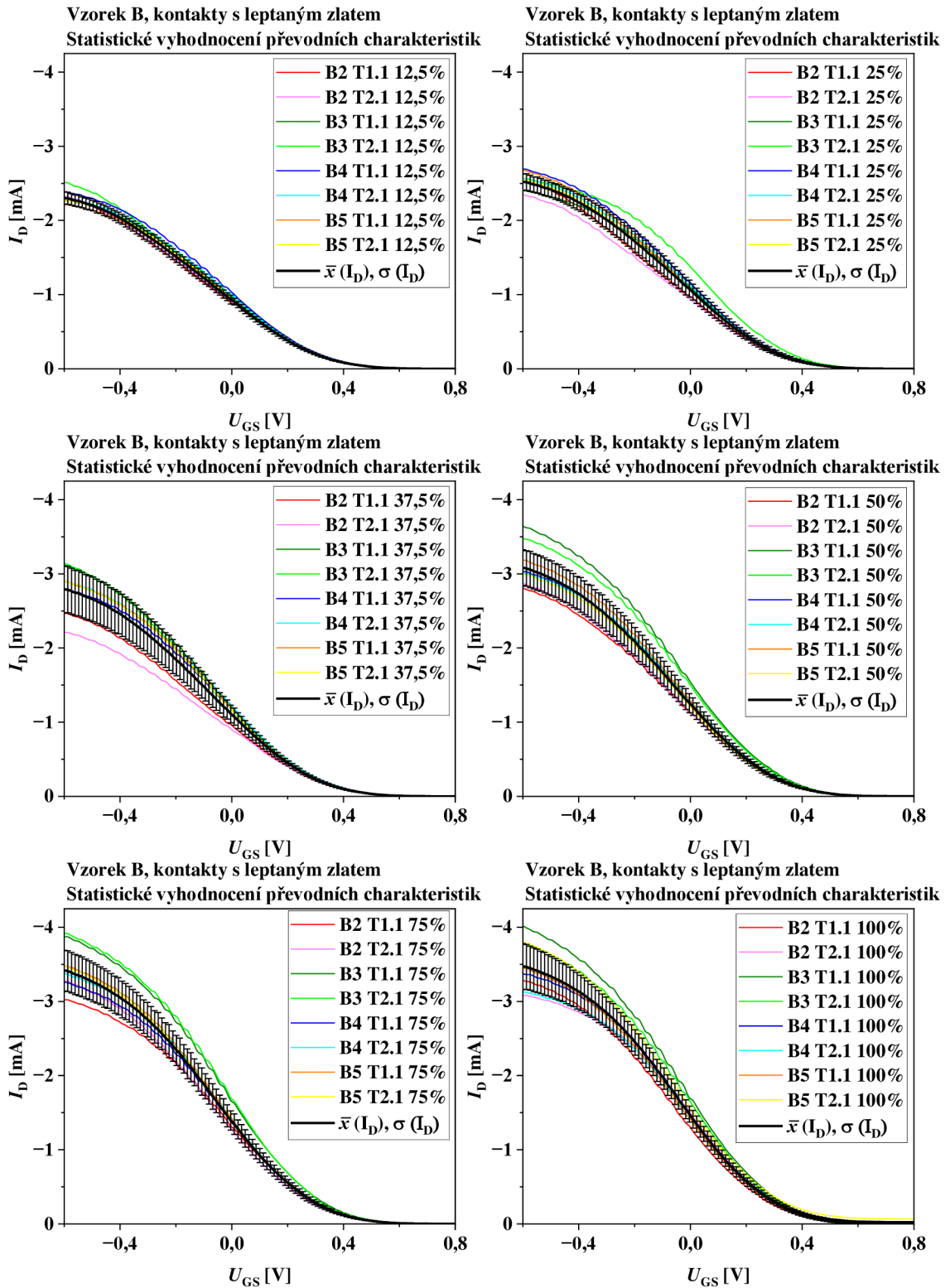
Obrázek 5.32: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

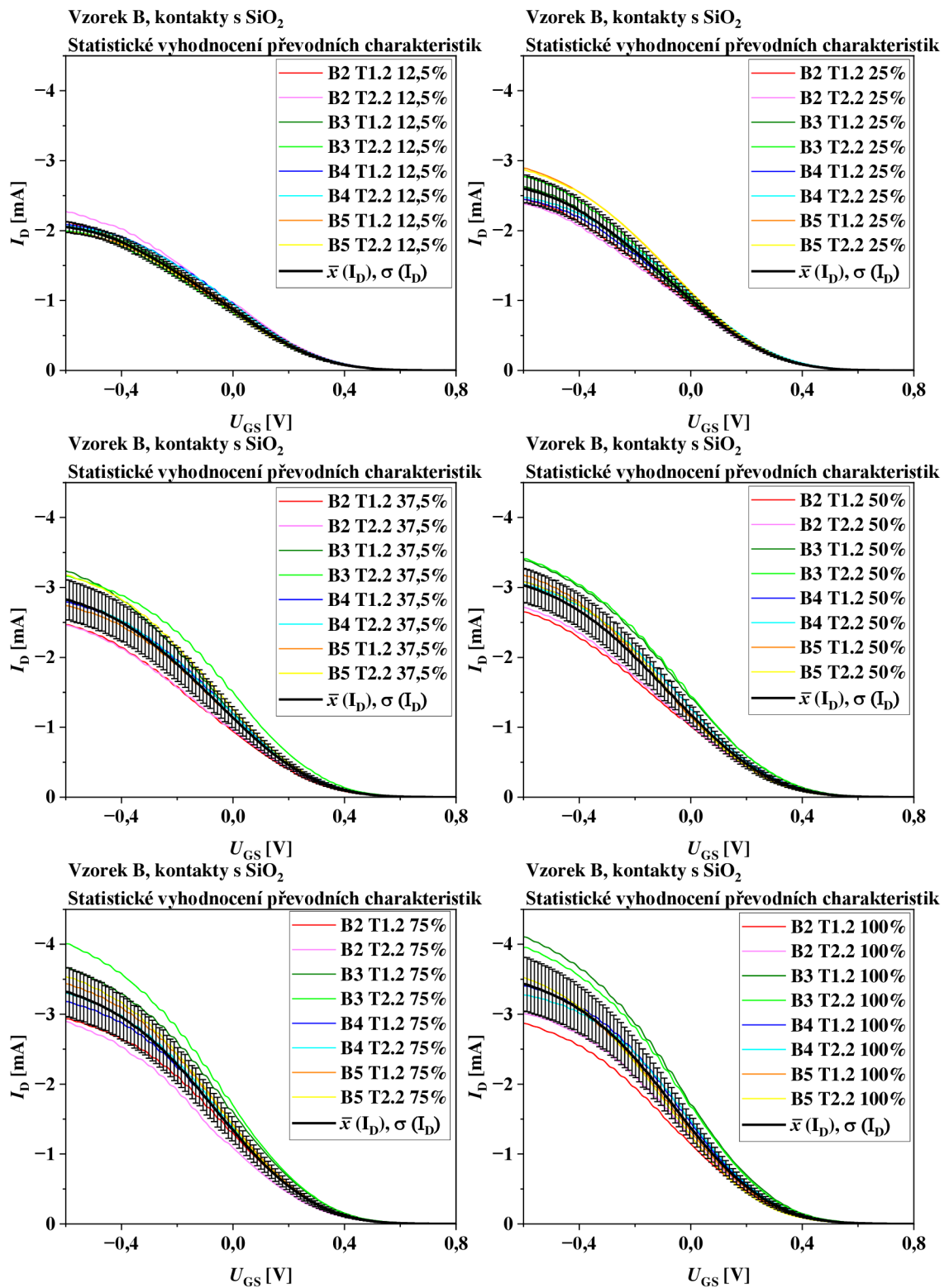
Čipy B, $W = 100 \mu\text{m}$, tranzistory T3 - statistika



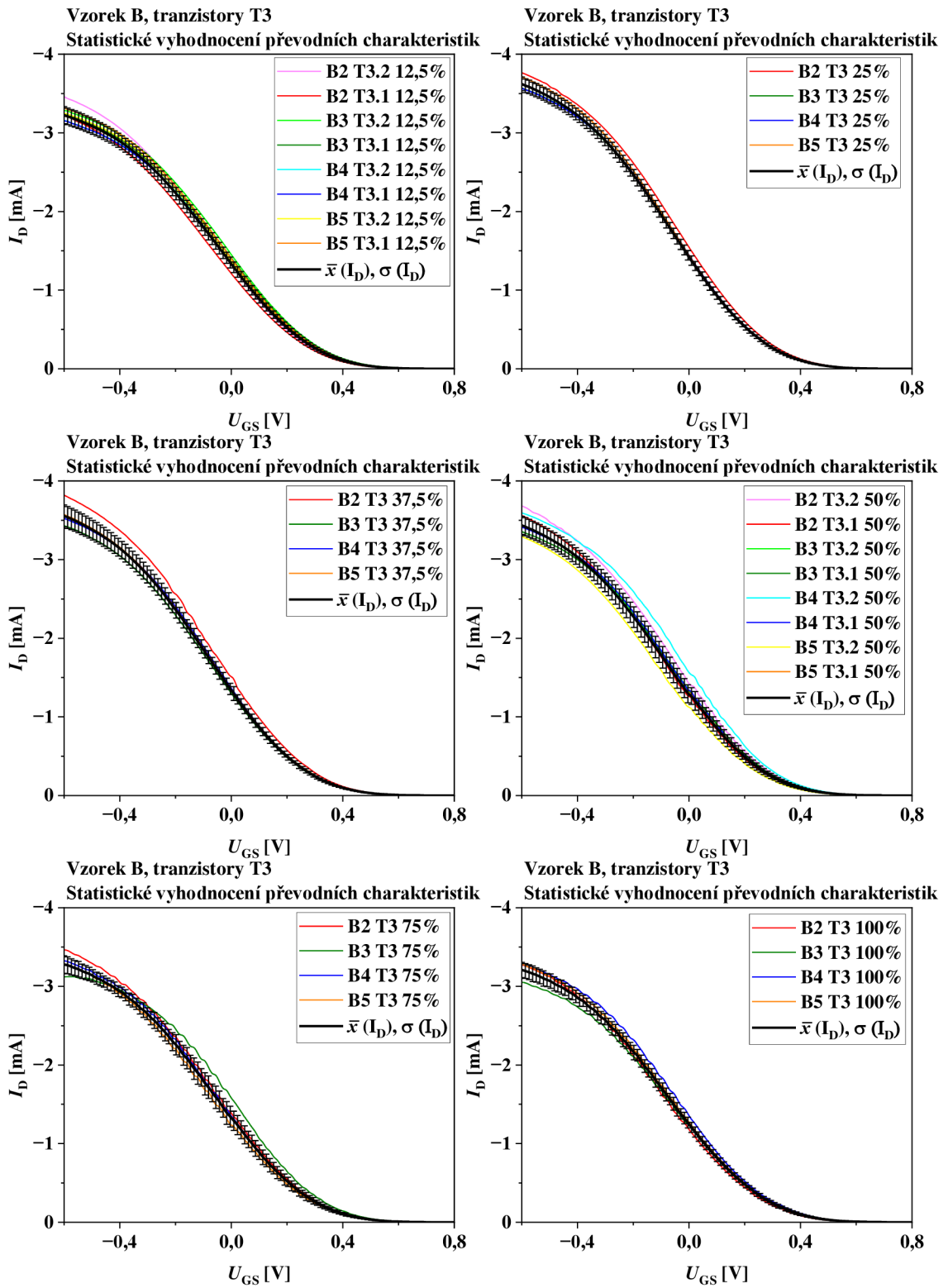
Obrázek 5.33: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů B, tranzistory T3



Obrázek 5.34: Vzorky B, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.35: Vzorky B, statistika proudu I_D , kontakty s SiO₂

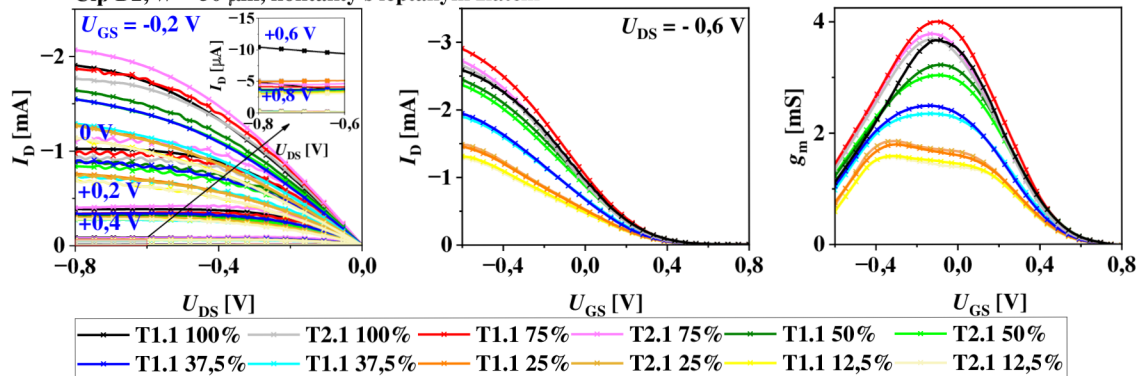


Obrázek 5.36: Vzorky B, statistika proudu I_D , tranzistory T3

A.11 Stejnoseměrné charakteristiky – čip D2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

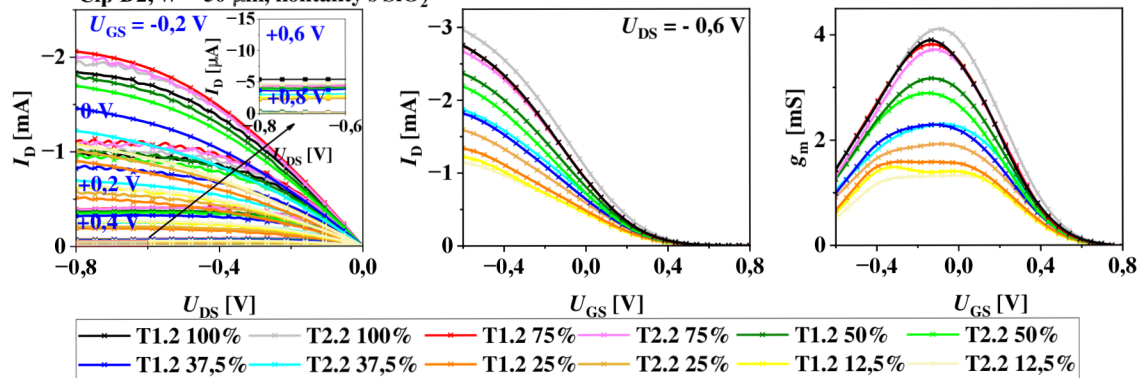
Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.37: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

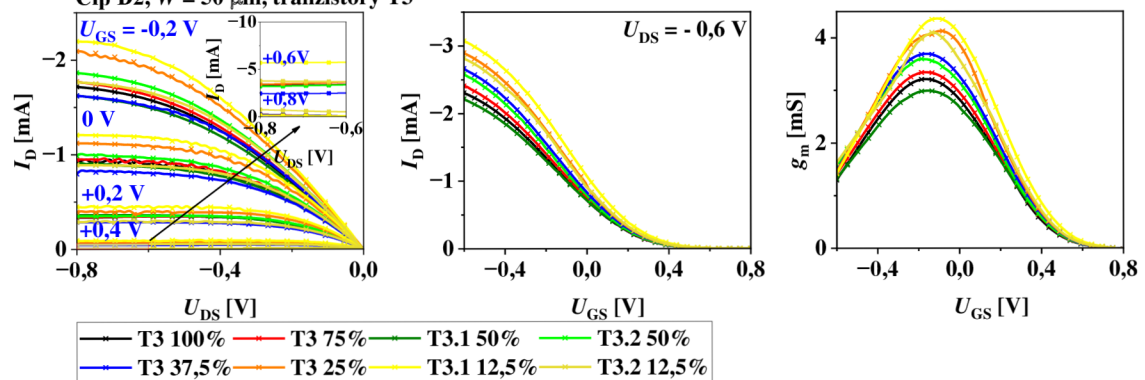
Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



Obrázek 5.38: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, tranzistory T3

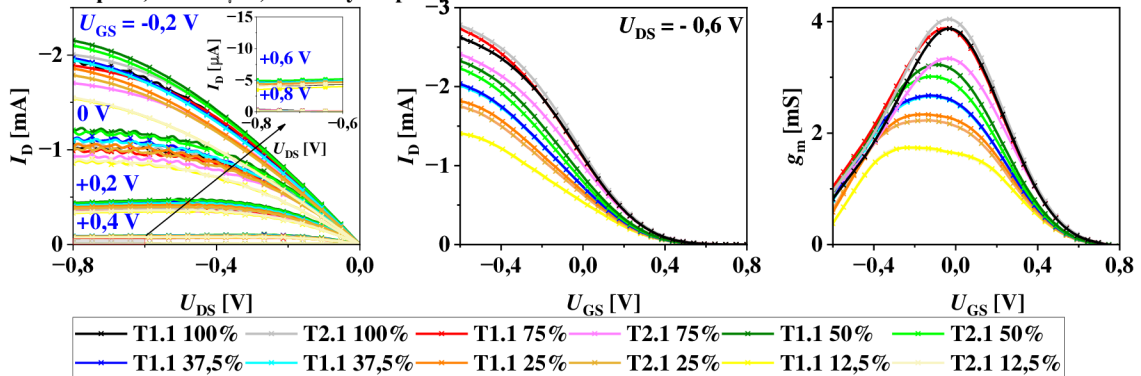


Obrázek 5.39: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – tranzistory T3

A.12 Stejnoseměrné charakteristiky – čip D3

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

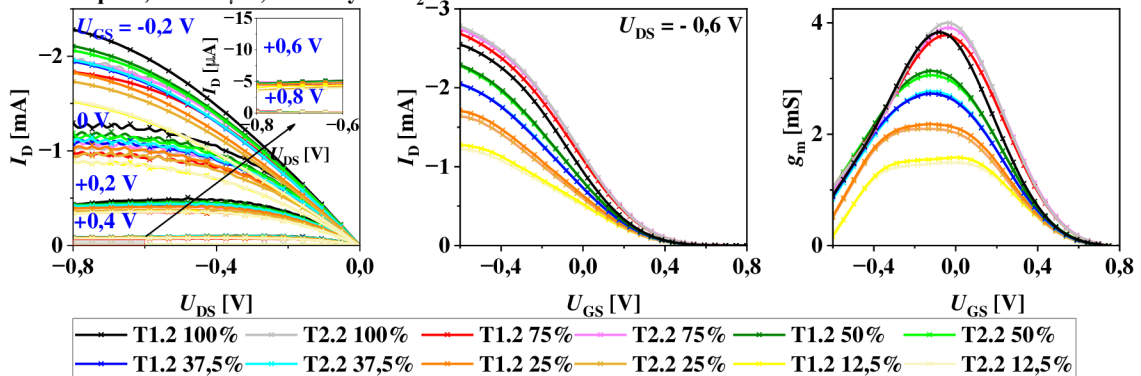
Čip D3, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.40: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

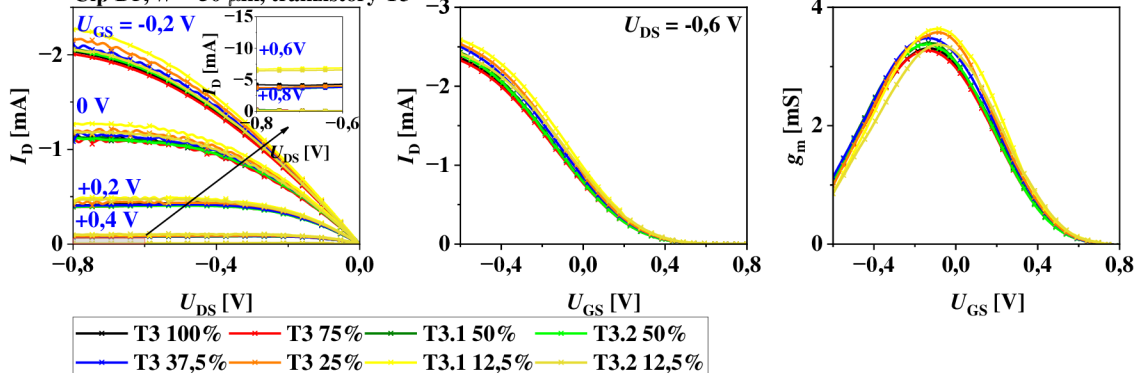
Čip D3, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



Obrázek 5.41: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

Čip D3, $W = 50 \mu\text{m}$, tranzistory T3

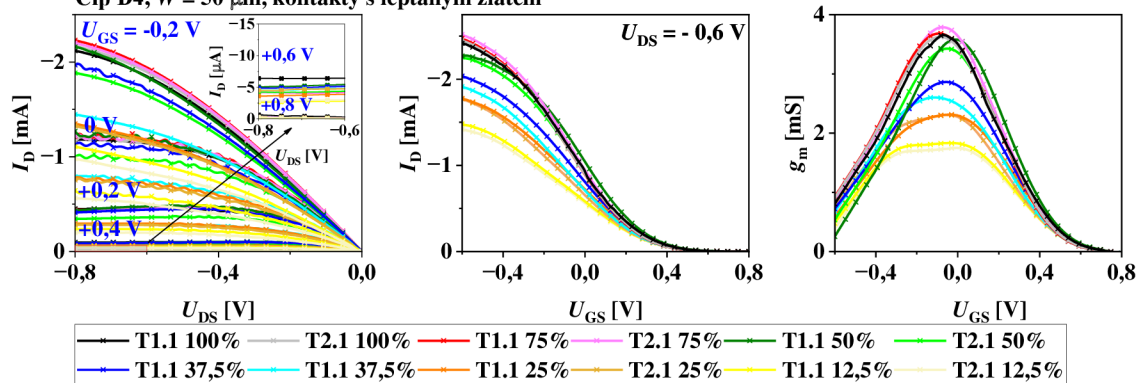


Obrázek 5.42: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D3 – tranzistory T3

A.13 Stejnoseměrné charakteristiky – čip D4

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

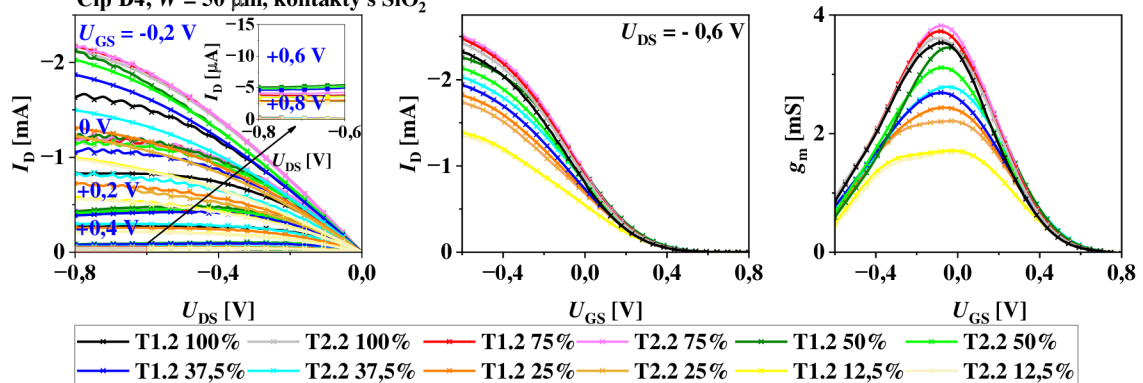
Čip D4, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.43: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

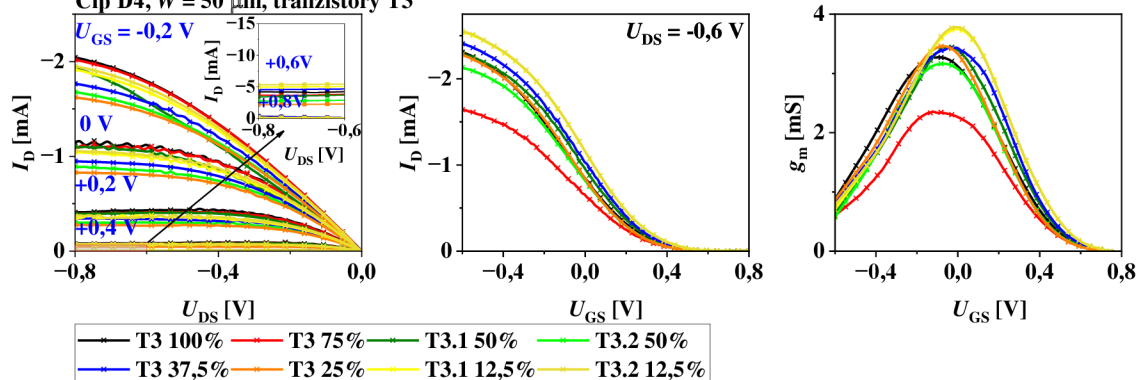
Čip D4, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



Obrázek 5.44: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – SiO_2

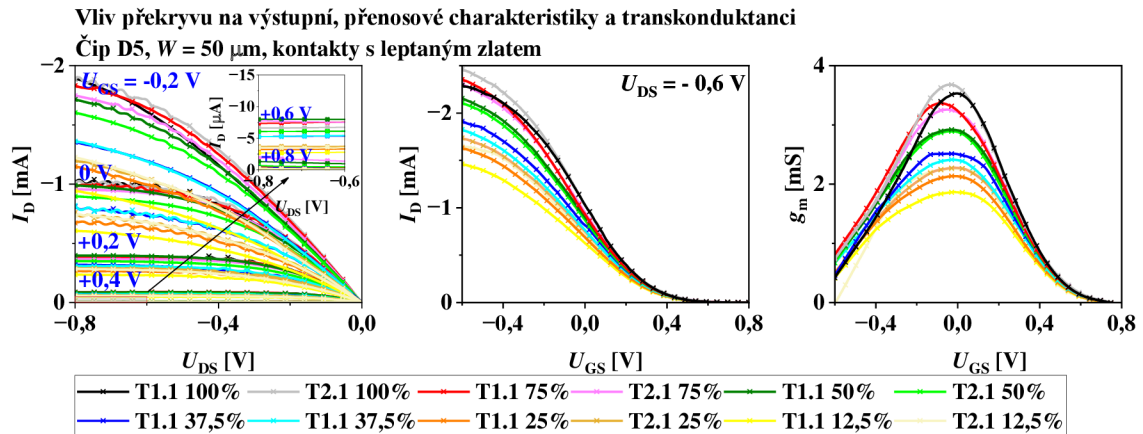
Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

Čip D4, $W = 50 \mu\text{m}$, tranzistory T3

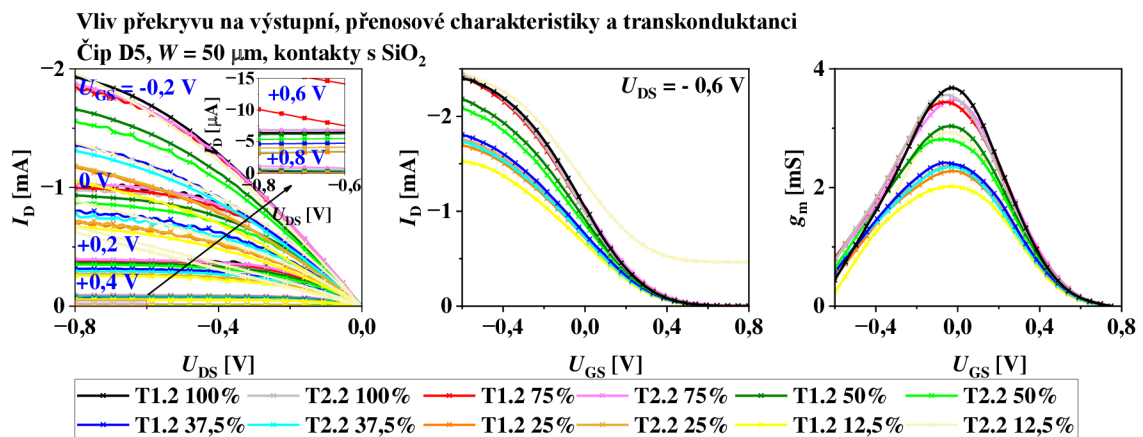


Obrázek 5.45: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D4 – tranzistory T3

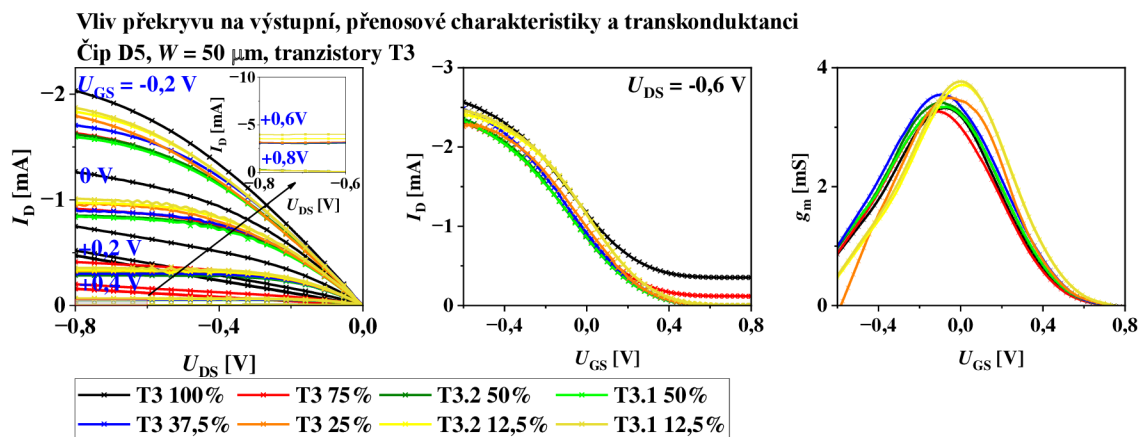
A.14 Stejnoseměrné charakteristiky – čip D5



Obrázek 5.46: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – leptané zlato



Obrázek 5.47: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – SiO_2

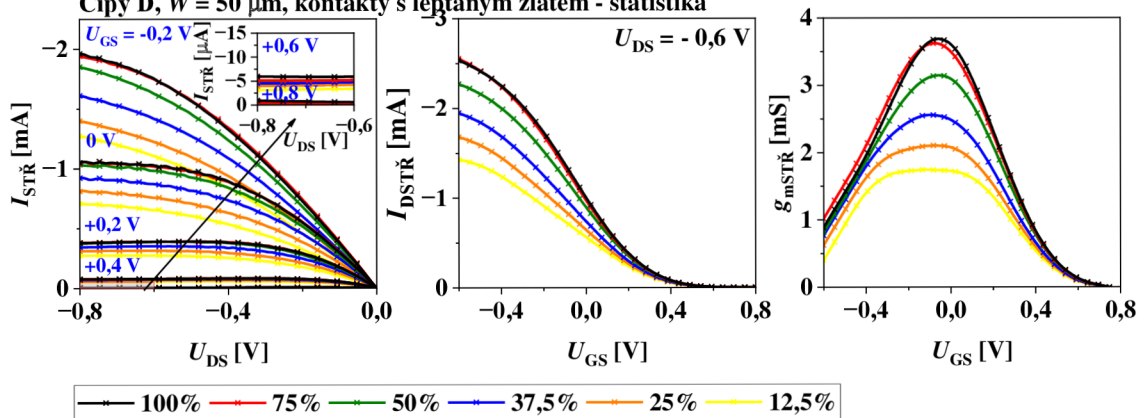


Obrázek 5.48: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D5 – tranzistory T3

A.15 Statistika čipy D

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

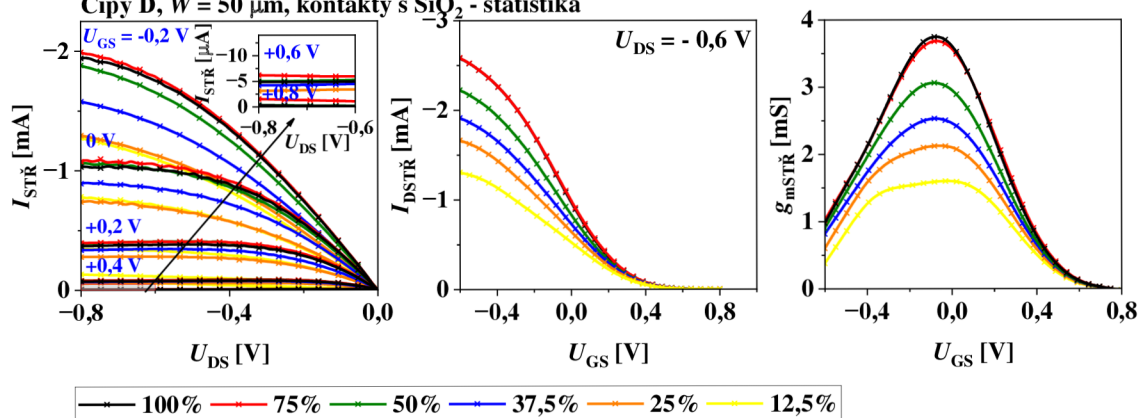
Čipy D, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem - statistika



Obrázek 5.49: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

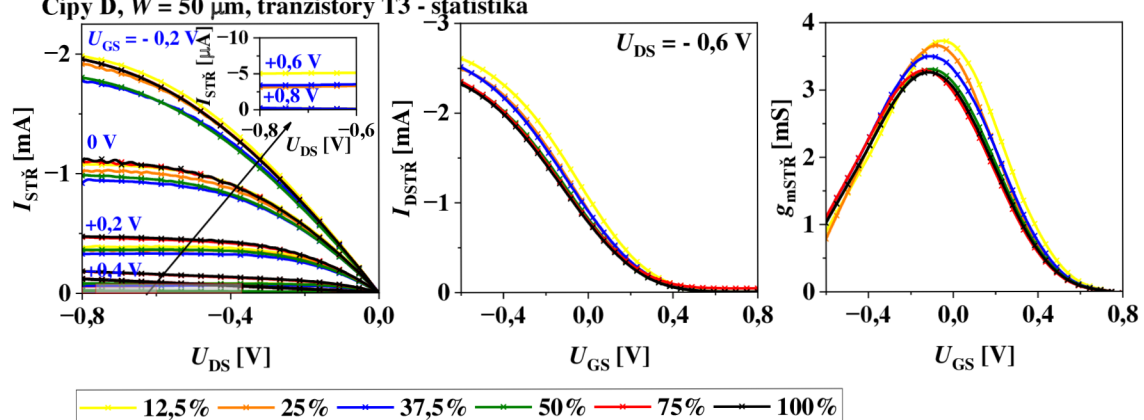
Čipy D, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2 - statistika



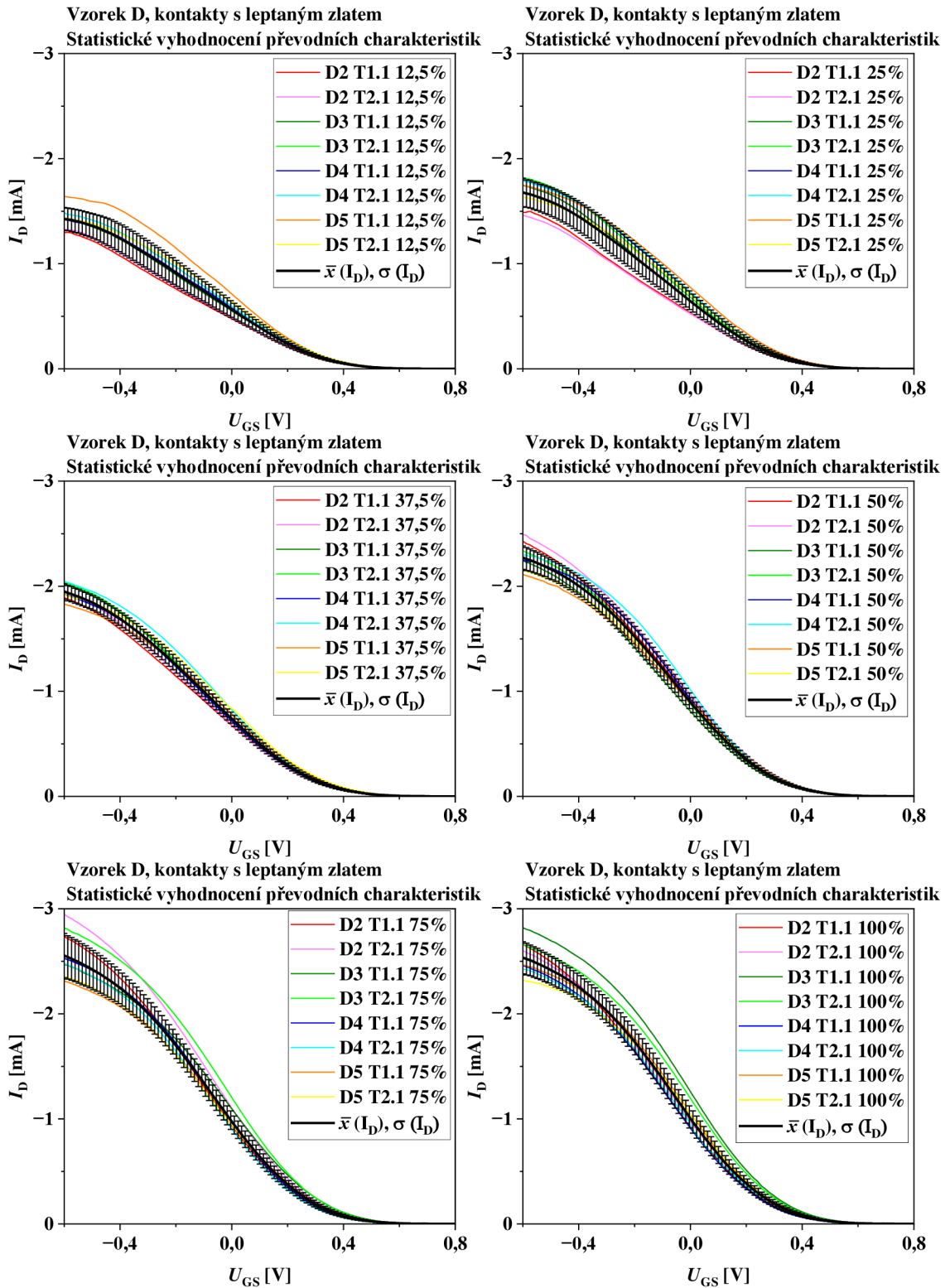
Obrázek 5.50: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

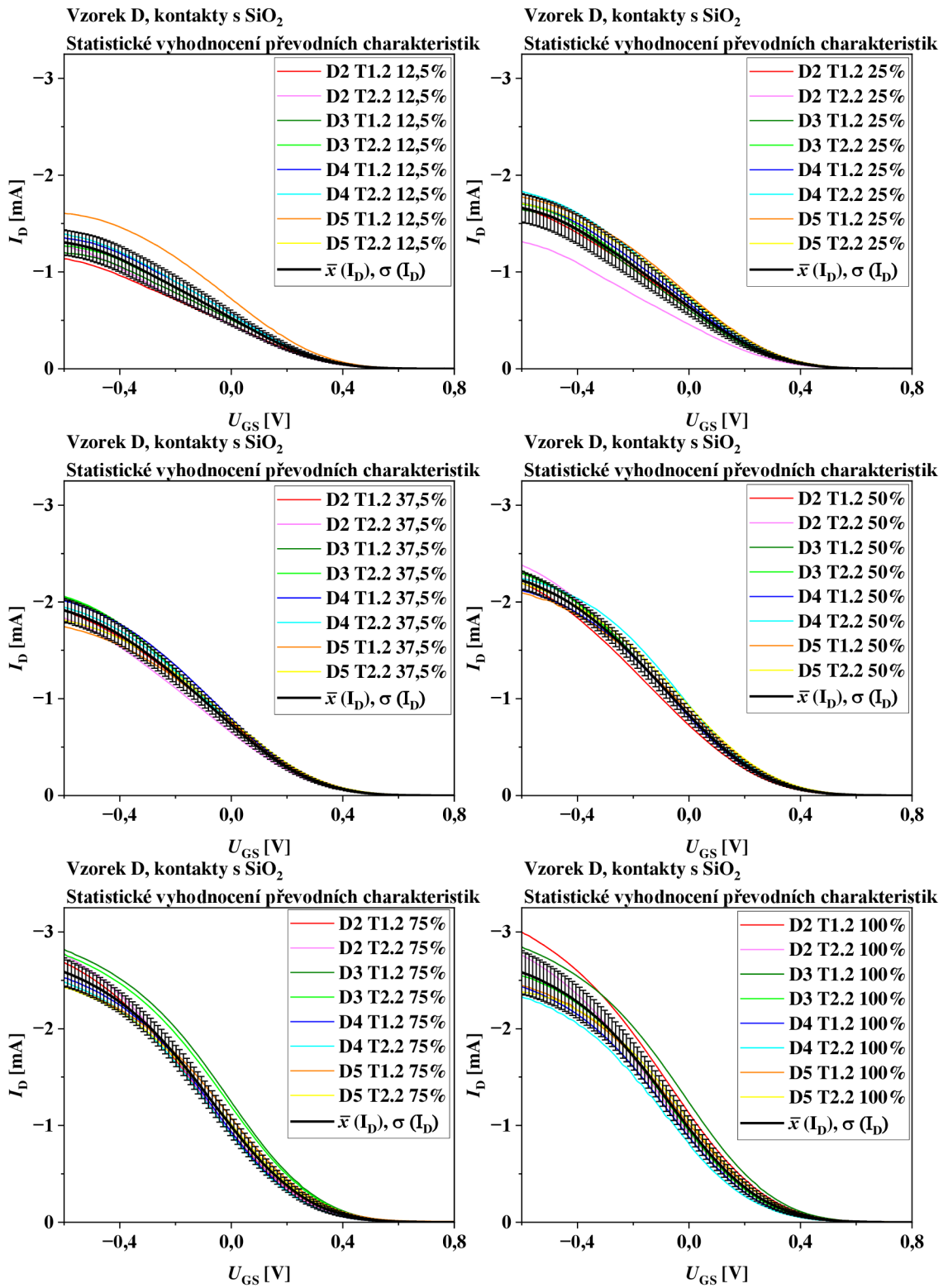
Čipy D, $W = 50 \mu\text{m}$, tranzistory T3 - statistika



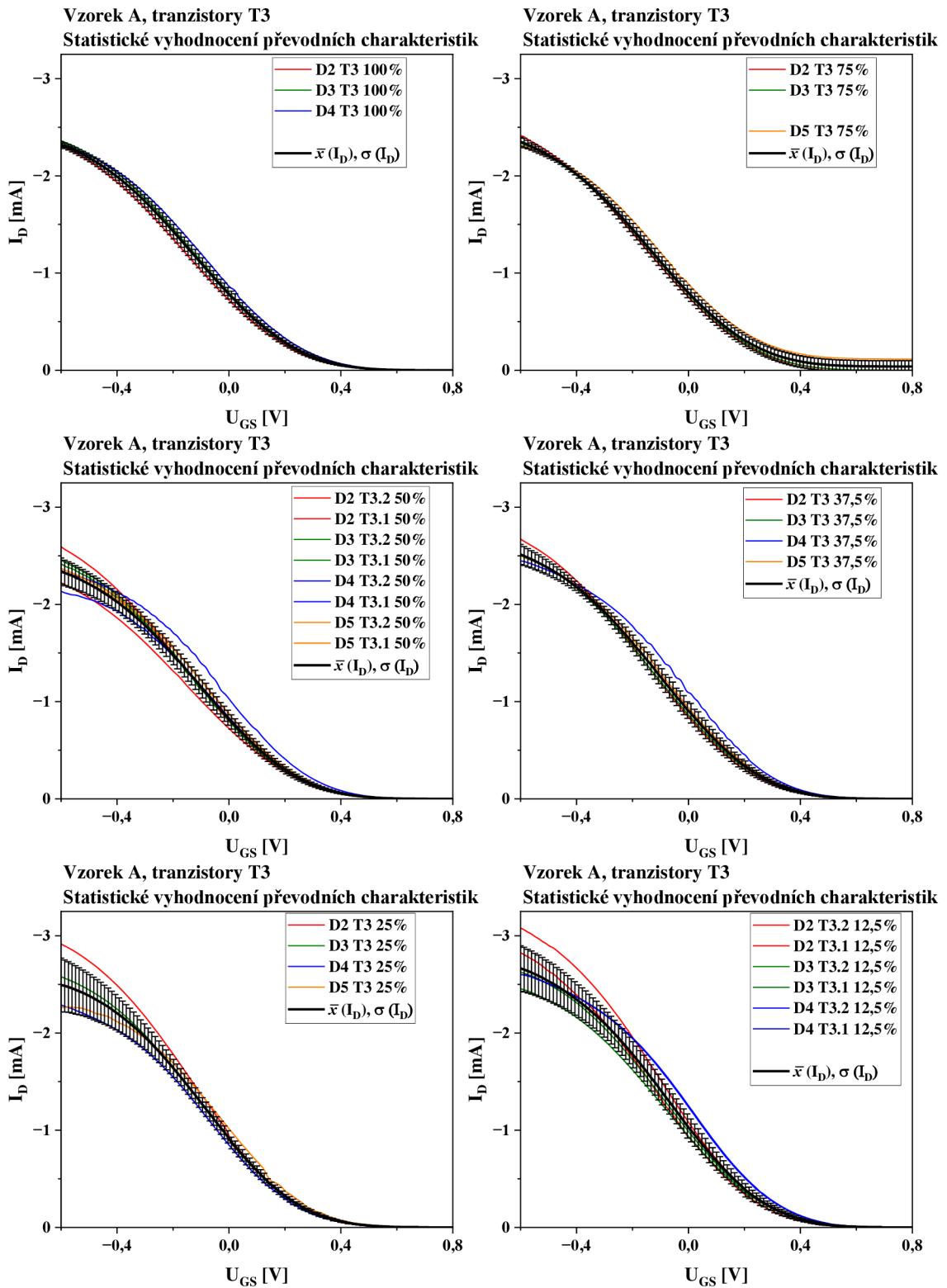
Obrázek 5.51: Stejnoseměrné charakteristiky – statistika čipů D, tranzistory T3



Obrázek 5.52: Vzorky D, statistika proudu I_D , kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.53: Vzorky D, statistika proudu I_D , kontakty s SiO₂

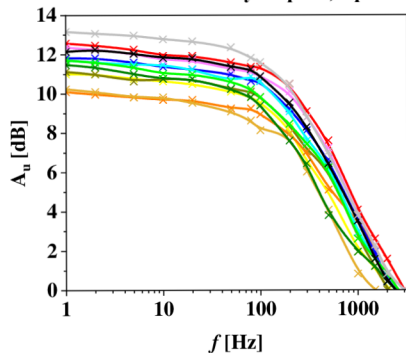


Obrázek 5.54: Vzorok D, statistika proudu I_D , tranzistory T3

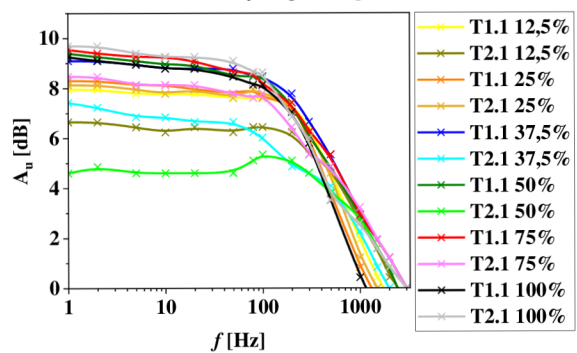
Příloha B - Frekvenční a pulzní charakteristiky

B.1 Frekvenční charakteristiky – čipy A, B, D

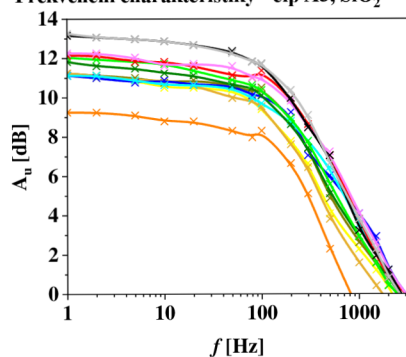
Frekvenční charakteristiky - čip A3, leptané zlato



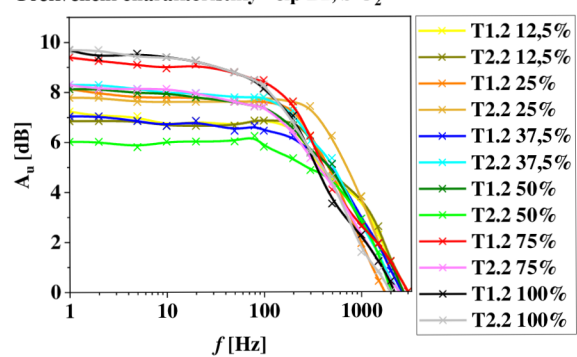
Frekvenční charakteristiky - čip B2, leptané zlato



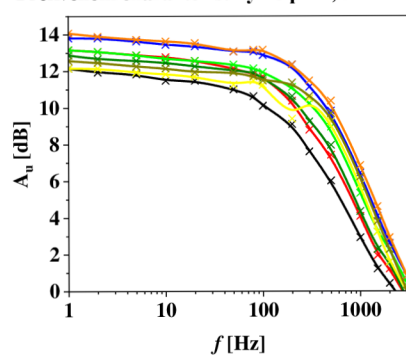
Frekvenční charakteristiky - čip A3, SiO₂



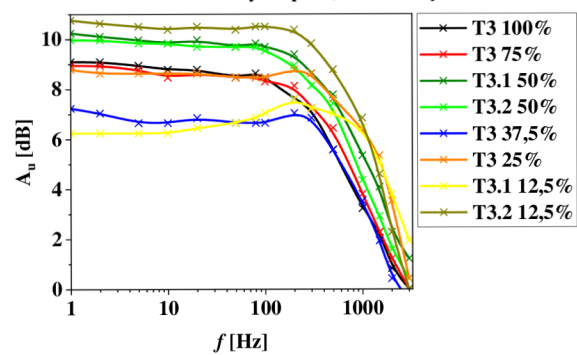
Frekvenční charakteristiky - čip B2, SiO₂



Frekvenční charakteristiky - čip A3, tranzistory T3

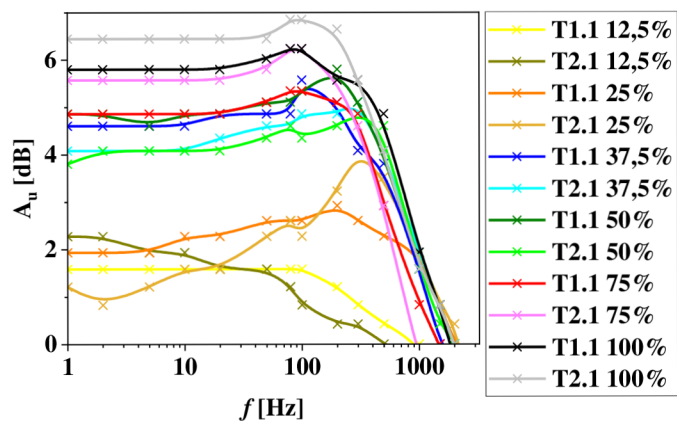


Frekvenční charakteristiky - čip B2, tranzistory T3

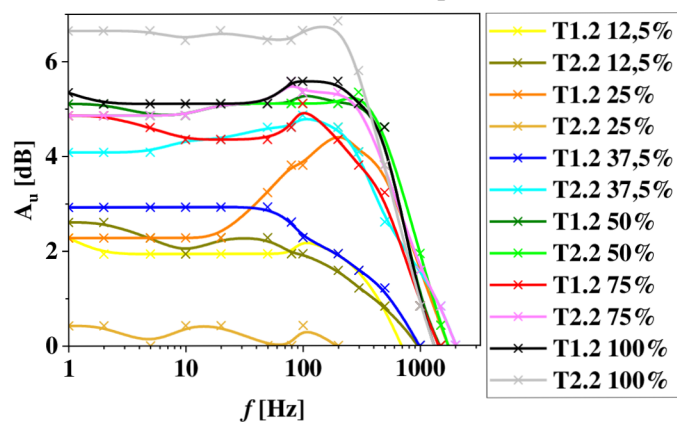


Obrázek 5.55: Porovnání frekvenčních charakteristik čipů A a B

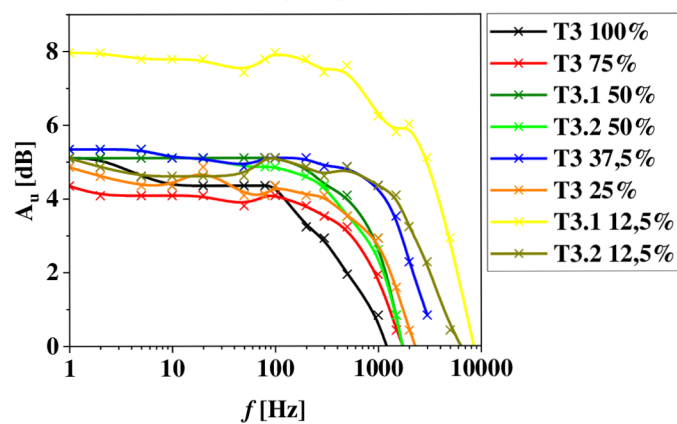
Frekvenční charakteristiky - čip D2, leptané zlato



Frekvenční charakteristiky - čip D2, SiO₂



Frekvenční charakteristiky - čip D2, tranzistory T3



Obrázek 5.56: Porovnání frekvenčních charakteristik čipu D2

B.2 Tabulky mezních frekvencí a zesílení

Tabulka 5.1 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip A3

Čip A3, 650 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%	200	11,01	T1.1 37,5%	232	11,82	T1.1 75%	264	12,57
T2.1 12,5%	215	11,13	T2.1 37,5%	220	11,71	T2.1 75%	249	12,36
T1.1 25%	293	10,10	T1.1 50%	142	11,48	T1.1 100%	216	12,26
T2.1 25%	226	10,24	T2.1 50%	172	11,71	T2.1 100%	206	13,16
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%	169	11,13	T1.2 37,5%	245	11,13	T1.2 75%	257	12,15
T2.2 12,5%	238	11,25	T2.2 37,5%	264	11,13	T2.2 75%	236	12,26
T1.2 25%	219	9,25	T1.2 50%	179	11,82	T1.2 100%	180	13,16
T2.2 25%	158	11,25	T2.2 50%	189	12,04	T2.2 100%	203	13,26
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	480	12,15	T3.1 50%	249	12,87			
T3.2 12,5%	474	12,57	T3.2 50%	304	13,16			
T3 25%	364	14,07	T3 75%	203	13,16			
T3 37,5%	345	13,80	T3 100%	182	12,15			

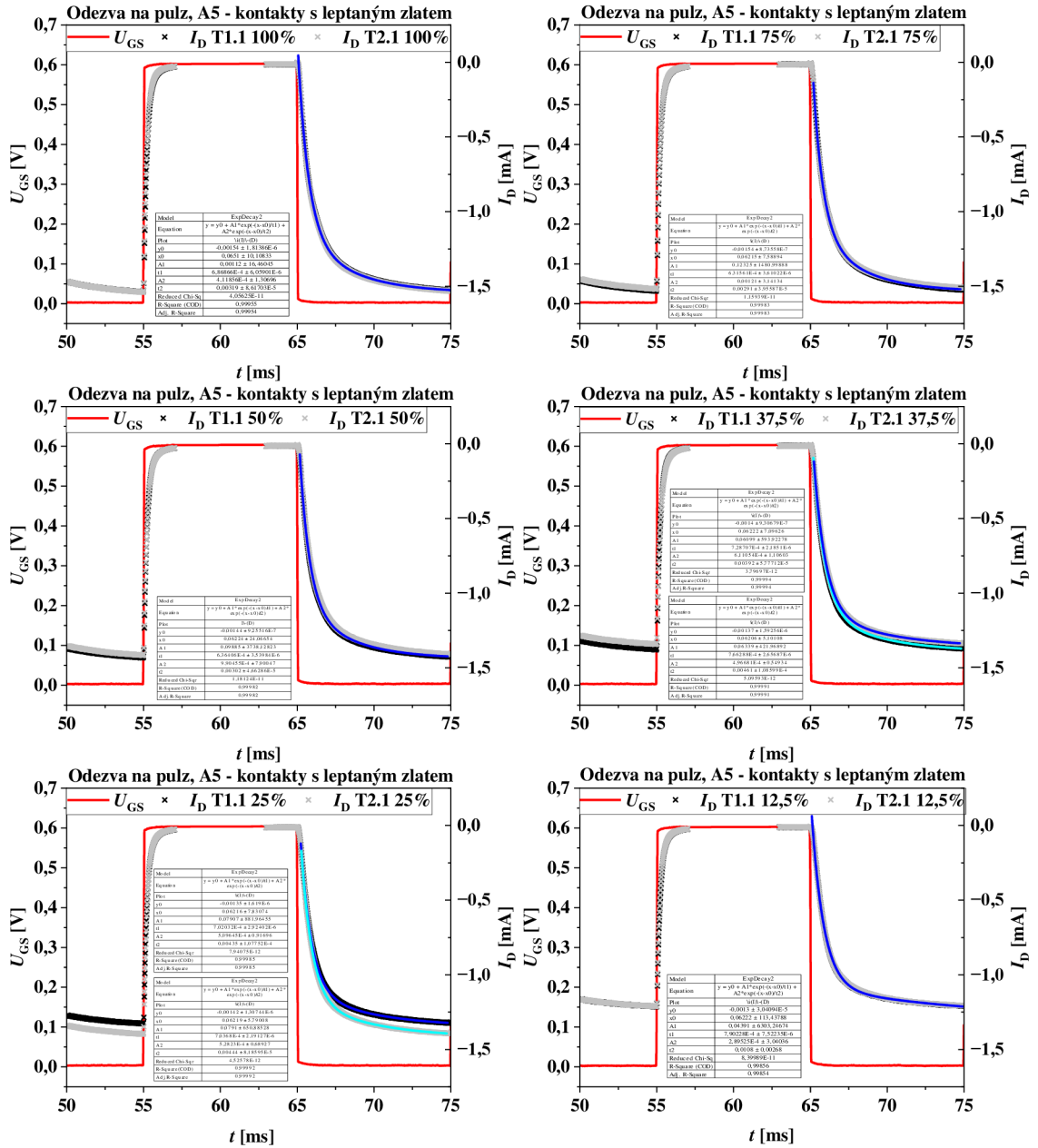
Tabulka 5.2 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip B2

Čip B2, 650 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%	352	7,96	T1.1 37,5%	372	9,10	T1.1 75%	274	9,54
T2.1 12,5%	417	6,65	T2.1 37,5%	359	7,42	T2.1 75%	305	8,46
T1.1 25%	450	8,30	T1.1 50%	273	9,40	T1.1 100%	256	9,25
T2.1 25%	718	8,13	T2.1 50%	1170	5,34	T2.1 100%	219	9,69
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%	624	7,23	T1.2 37,5%	696	7,04	T1.2 75%	283	9,40
T2.2 12,5%	904	6,85	T2.2 37,5%	457	8,30	T2.2 75%	302	8,30
T1.2 25%	441	8,13	T1.2 50%	435	8,13	T1.2 100%	215	9,69
T2.2 25%	748	7,78	T2.2 50%	863	6,24	T2.2 100%	206	9,69
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	1680	7,60	T3.1 50%	566	10,24			
T3.2 12,5%	706	10,76	T3.2 50%	518	9,97			
T3 25%	1232	8,79	T3 75%	547	8,94			
T3 37,5%	784	7,23	T3 100%	419	9,10			

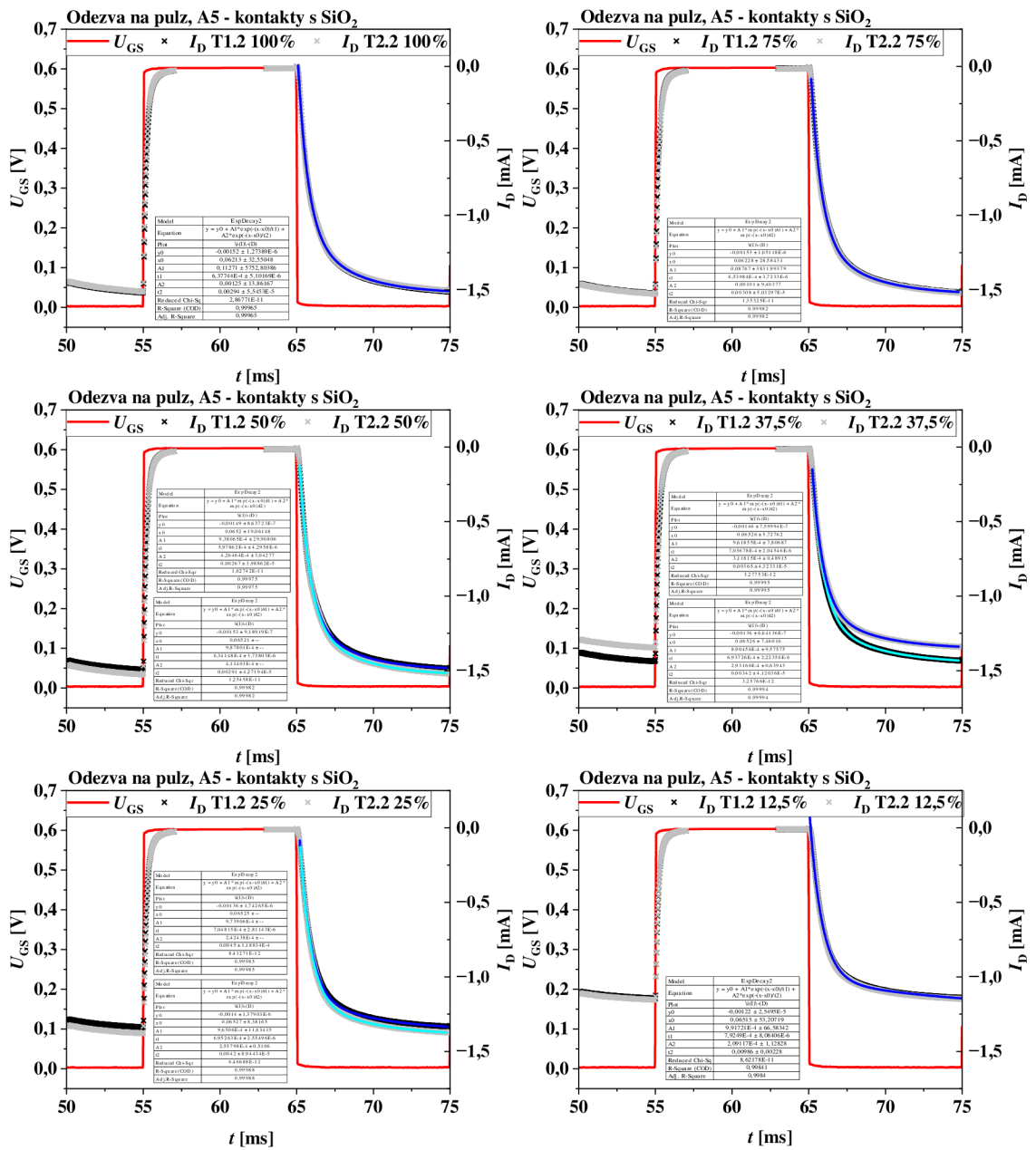
Tabulka 5.3 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip D2

Čip D2, 650 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%		< 3 dB	T1.1 37,5%	840	5,09	T1.1 75%	691	5,07
T2.1 12,5%		< 3 dB	T2.1 37,5%	1177	4,50	T2.1 75%	500	5,88
T1.1 25%		< 3 dB	T1.1 50%	852	5,18	T1.1 100%	702	6,44
T2.1 25%		< 3 dB	T2.1 50%	1095	4,35	T2.1 100%	716	5,80
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%		< 3 dB	T1.2 37,5%	1004	3,00	T1.2 75%	771	4,73
T2.2 12,5%		< 3 dB	T2.2 37,5%	1115	4,52	T2.2 75%	838	5,18
T1.2 25%	1446	3,60	T1.2 50%	806	5,07	T1.2 100%	759	5,30
T2.2 25%	zničen		T2.2 50%	980	5,07	T2.2 100%	518	6,65
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	1520	7,98	T3.1 50%	1145	5,14			
T3.2 12,5%	2742	5,03	T3.2 50%	1084	5,14			
T3 25%	1192	4,52	T3 75%	1248	4,13			
T3 37,5%	2448	5,29	T3 100%	562	4,71			

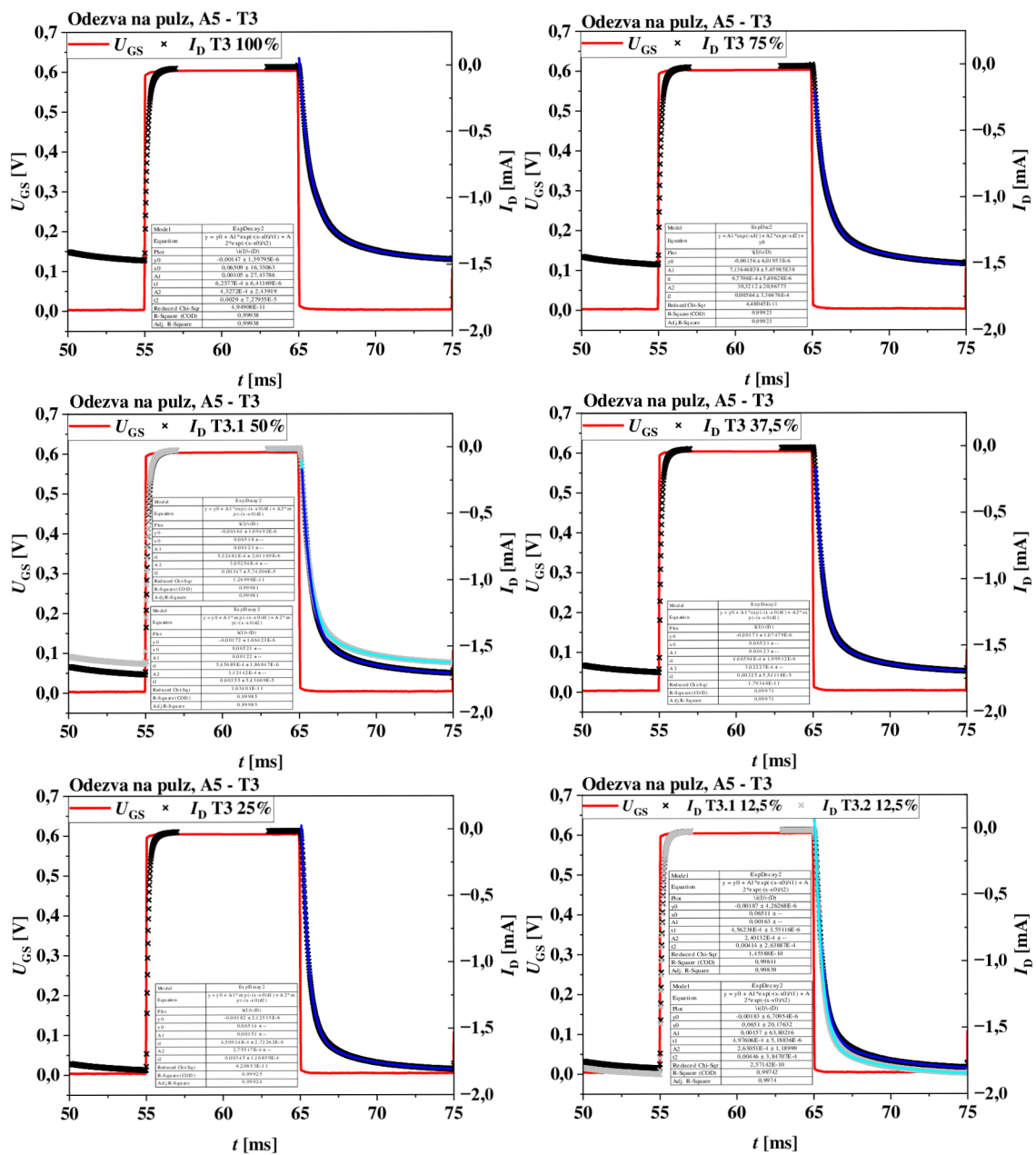
B.3 Pulzní charakteristiky – čip A5



Obrázek 5.57: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – lepatané zlato



Obrázek 5.58: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – SiO₂

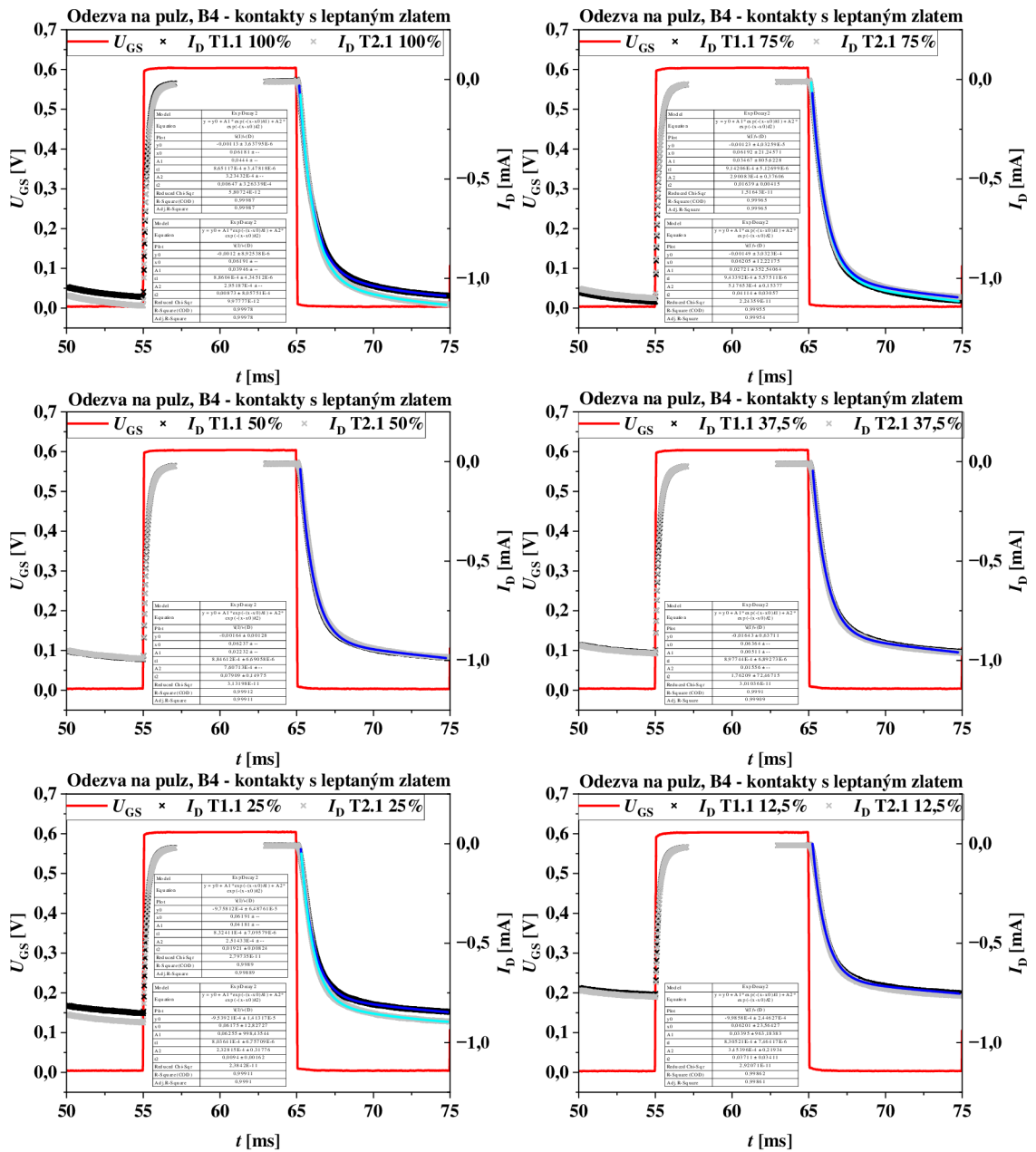


Obrázek 5.59: Porovnání pulzních charakteristik čipu A5 – tranzistoru T3

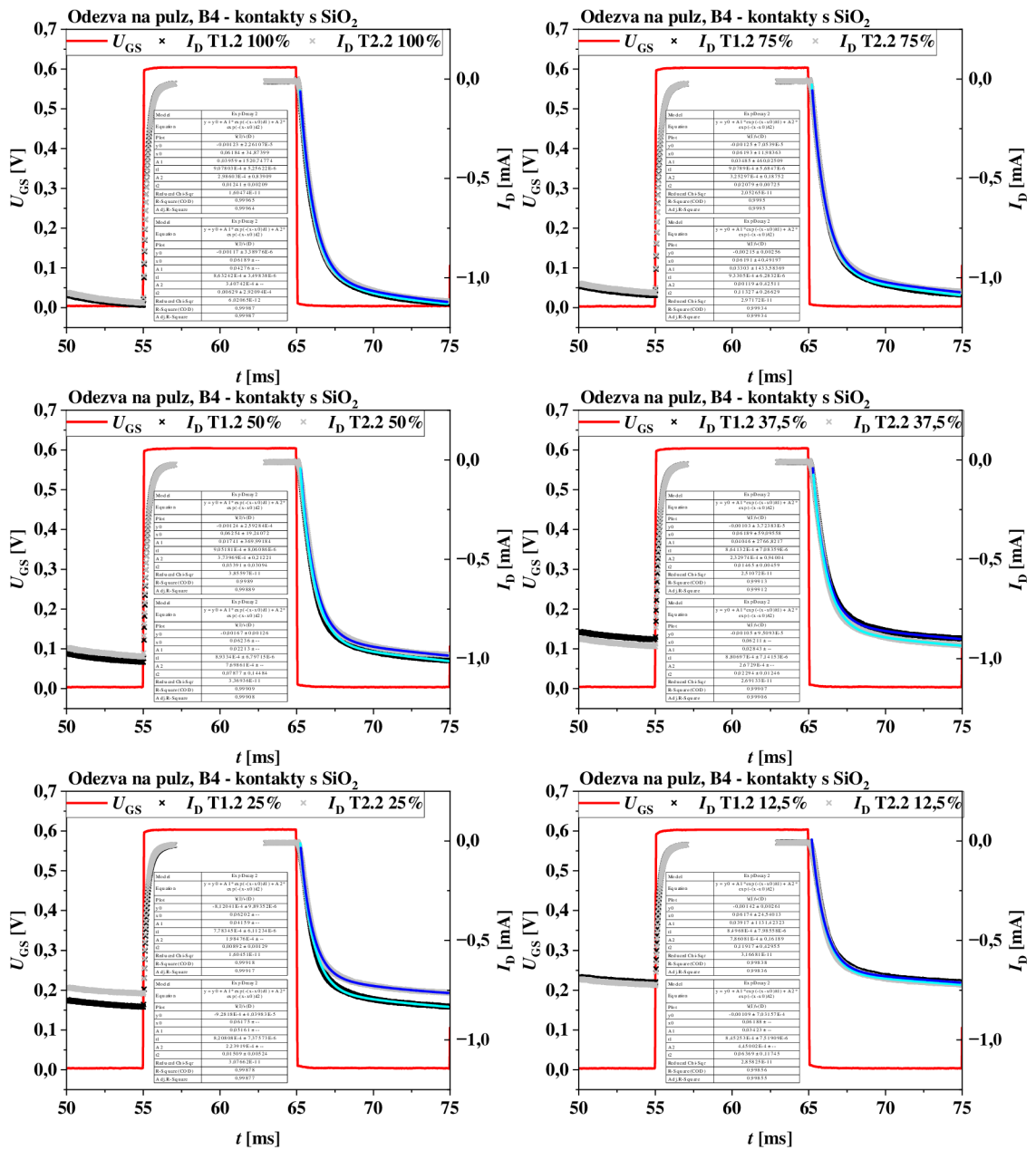
Tabulka 5.4 Získané časové konstanty – čip A5

Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	7,90E-04	3,95	1,08E-02	54
T2.1 12,5 %	7,90E-04	3,95	1,08E-02	54
T1.1 25 %	7,02E-04	3,51	4,35E-03	21,75
T2.1 25 %	7,04E-04	3,52	4,44E-03	22,2
T1.1 37,5 %	7,29E-04	3,64	3,92E-03	19,6
T2.1 37,5 %	7,66E-04	3,83	4,61E-03	23,05
T1.1 50 %	6,36E-04	3,18	3,02E-03	15,1
T2.1 50 %	6,36E-04	3,18	3,02E-03	15,1
T1.1 75 %	6,32E-04	3,16	2,91E-03	14,55
T2.1 75 %	6,32E-04	3,16	2,91E-03	14,55
T1.1 100 %	6,87E-04	3,43	3,19E-03	15,95
T2.1 100 %	6,87E-04	3,43	3,19E-03	15,95
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	7,92E-04	3,96	9,86E-03	49,3
T2.2 12,5 %	7,92E-04	3,96	9,86E-03	49,3
T1.2 25 %	7,05E-04	3,52	4,50E-03	22,5
T2.2 25 %	6,95E-04	3,48	4,20E-03	21
T1.2 37,5 %	7,06E-04	3,53	3,65E-03	18,25
T2.2 37,5 %	6,94E-04	3,47	3,42E-03	17,1
T1.2 50 %	5,99E-04	2,99	2,67E-03	13,35
T2.2 50 %	6,34E-04	3,17	2,91E-03	14,55
T1.2 75 %	6,54E-04	3,27	3,08E-03	15,4
T2.2 75 %	6,54E-04	3,27	3,08E-03	15,4
T1.2 100 %	6,38E-04	3,19	2,94E-03	14,7
T2.2 100 %	6,38E-04	3,19	2,94E-03	14,7
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	4,98E-04	2,49	4,46E-03	22,3
T3.2 12,5 %	4,26E-04	2,13	3,09E-03	15,45
T3 25 %	4,51E-04	2,25	3,45E-03	17,25
T3 37,5 %	4,67E-04	2,33	3,25E-03	16,25
T3.1 50 %	5,46E-04	2,73	3,55E-03	17,75
T3.2 50 %	5,32E-04	2,66	3,47E-03	17,35
T3 75 %	6,77E-04	3,39	5,64E-03	28,2
T3 100 %	6,26E-04	3,13	2,90E-03	14,5

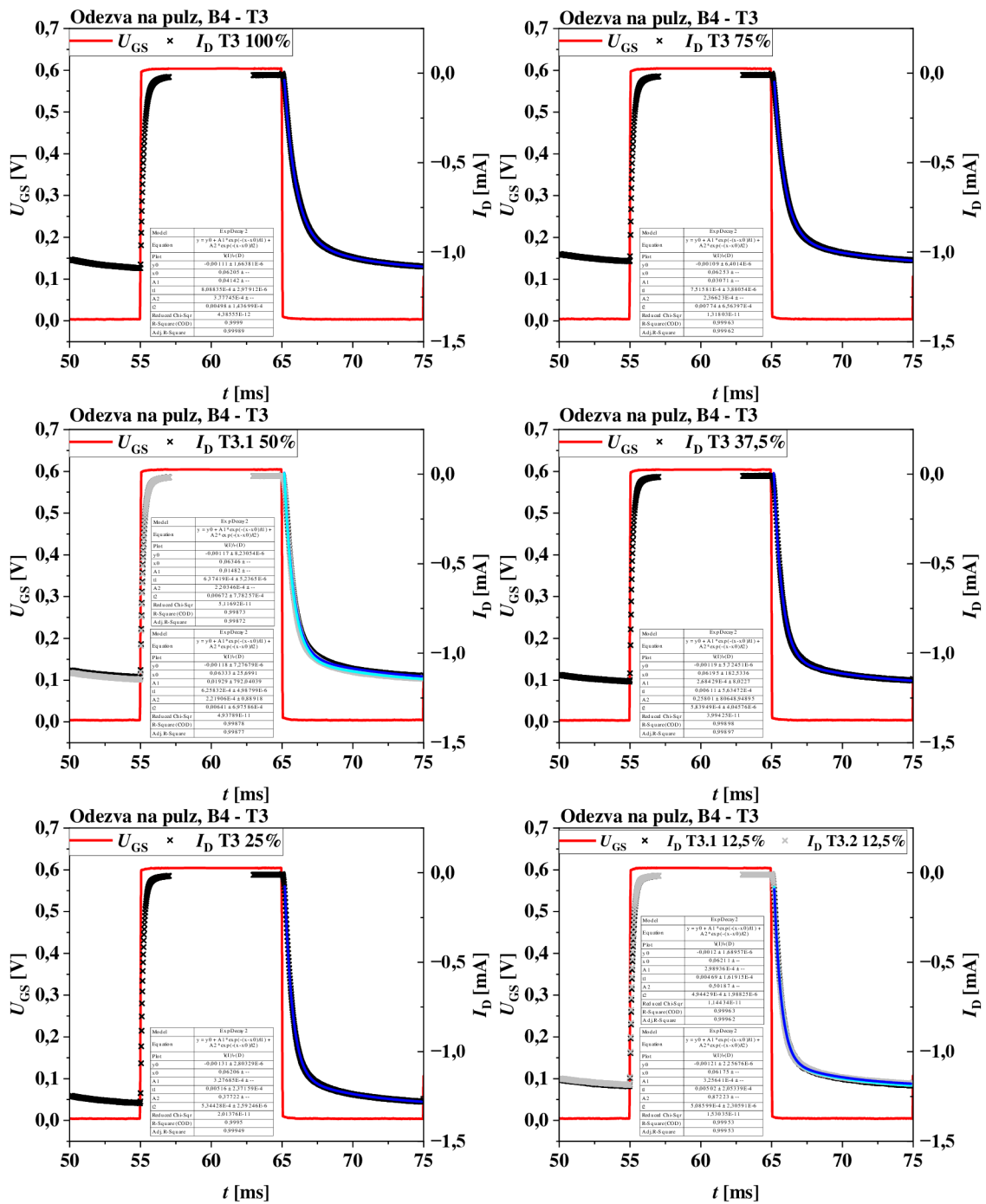
B.4 Pulzní charakteristiky – čip B4



Obrázek 5.60: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – lepané zlato



Obrázek 5.61: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – SiO₂

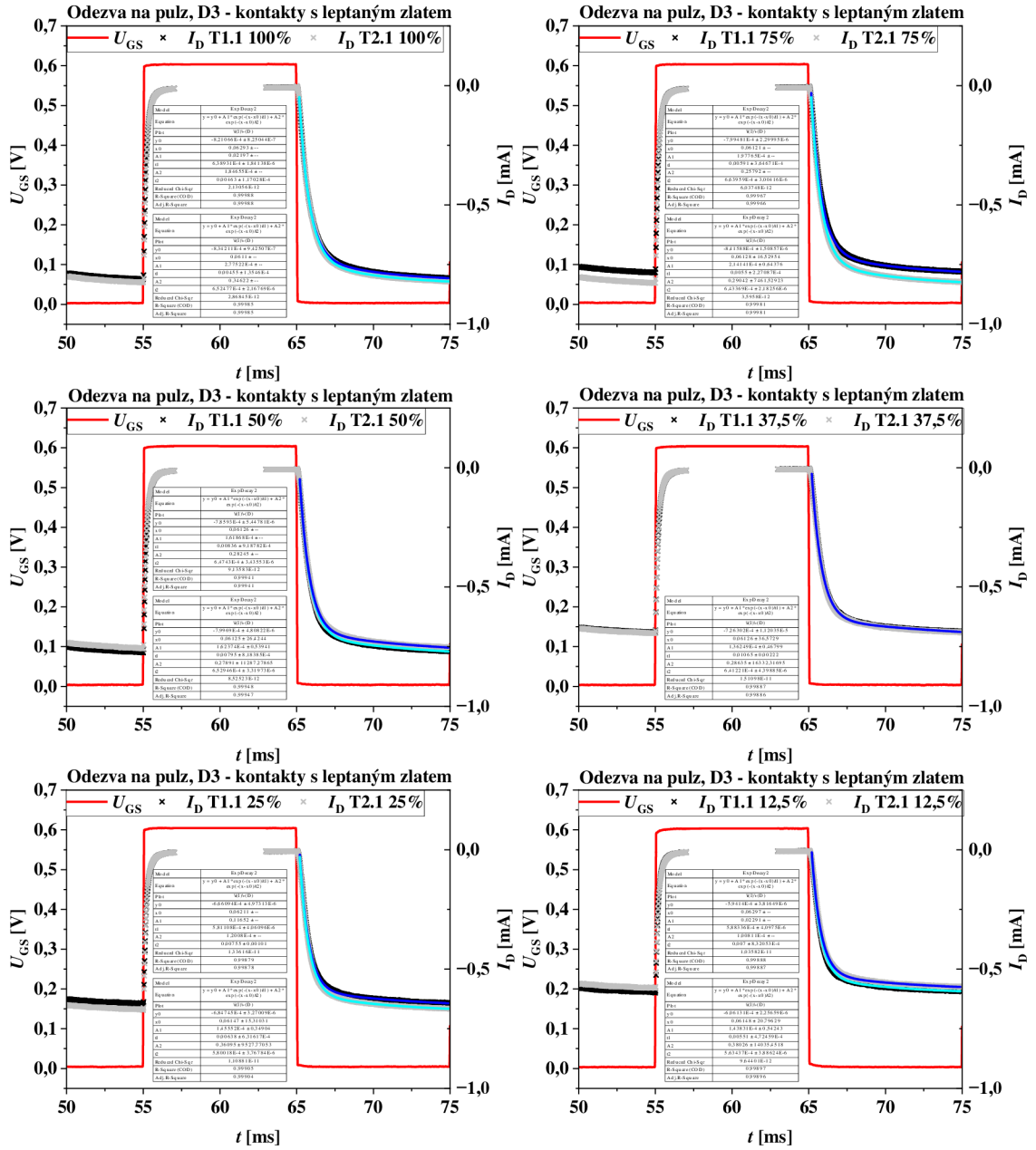


Obrázek 5.62: Porovnání pulzních charakteristik čipu B4 – tranzistoru T3

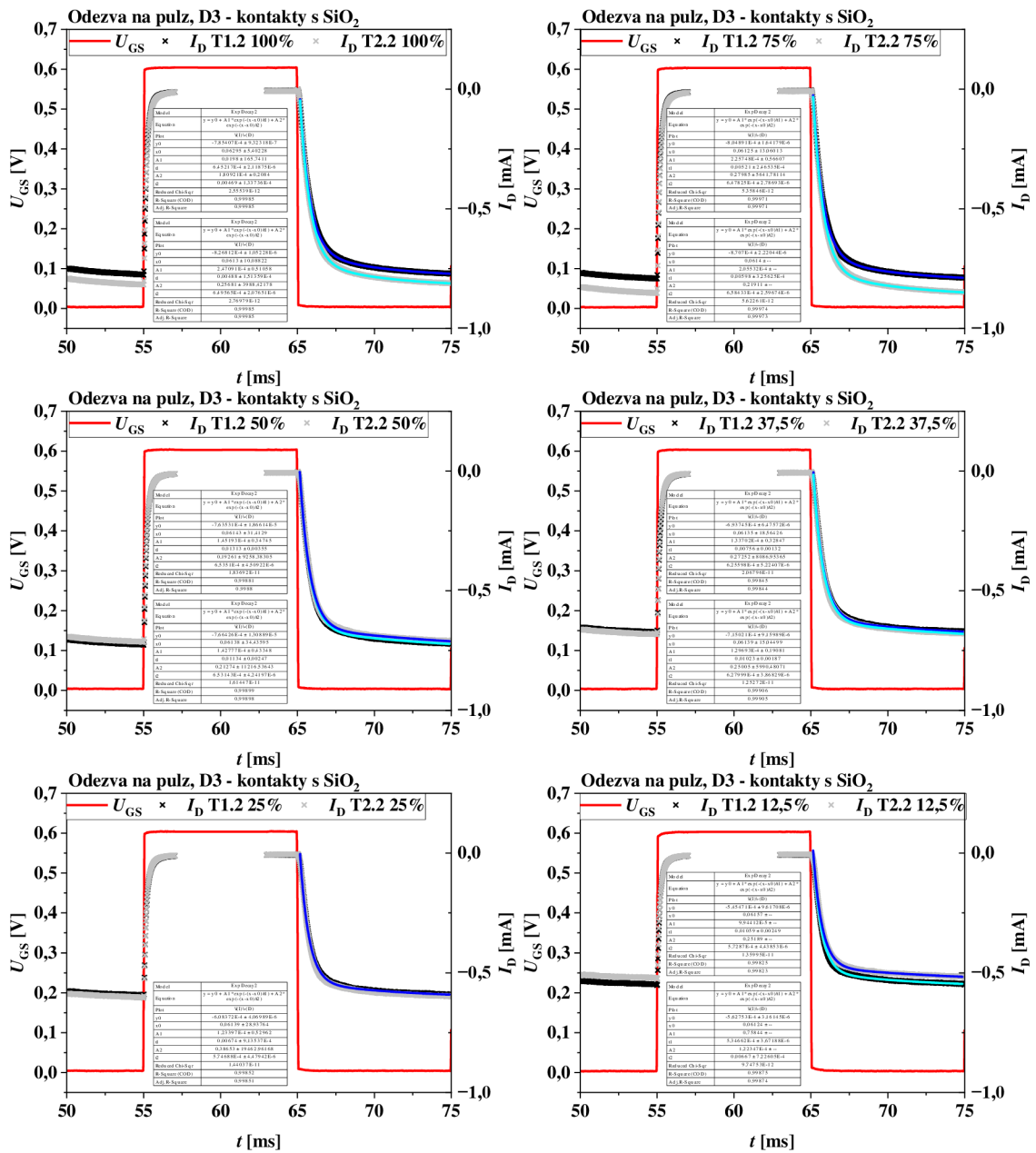
Tabulka 5.5 Získané časové konstanty – čip B4

Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	8,31E-04	4,15	3,71E-02	185,55
T2.1 12,5 %	8,31E-04	4,15	3,71E-02	185,55
T1.1 25 %	8,32E-04	4,16	1,92E-02	96,05
T2.1 25 %	8,04E-04	4,02	9,40E-03	47
T1.1 37,5 %	8,90E-04	4,45	2,74E-02	137,1
T2.1 37,5 %	8,98E-04	4,49	2,74E-02	137,1
T1.1 50 %	8,85E-04	4,42	7,91E-02	395,45
T2.1 50 %	8,85E-04	4,42	7,91E-02	395,45
T1.1 75 %	9,43E-04	4,72	4,11E-02	205,7
T2.1 75 %	9,14E-04	4,57	1,64E-02	81,95
T1.1 100 %	8,65E-04	4,33	6,47E-03	32,35
T2.1 100 %	8,86E-04	4,43	8,73E-03	43,65
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	8,50E-04	4,25	1,19E-01	595,85
T2.2 12,5 %	8,45E-04	4,23	6,37E-02	318,45
T1.2 25 %	8,21E-04	4,10	1,51E-02	75,45
T2.2 25 %	7,78E-04	3,89	8,92E-03	44,6
T1.2 37,5 %	8,81E-04	4,40	2,29E-02	114,7
T2.2 37,5 %	8,64E-04	4,32	1,47E-02	73,25
T1.2 50 %	8,93E-04	4,47	7,88E-02	393,85
T2.2 50 %	9,05E-04	4,53	3,39E-02	169,55
T1.2 75 %	9,33E-04	4,67	1,13E-01	566,35
T2.2 75 %	9,08E-04	4,54	2,08E-02	103,95
T1.2 100 %	8,63E-04	4,32	6,29E-03	31,45
T2.2 100 %	9,08E-04	4,54	1,24E-02	62,05
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	5,09E-04	2,54	5,02E-03	25,1
T3.2 12,5 %	4,94E-04	2,47	4,69E-03	23,45
T3 25 %	5,34E-04	2,67	5,16E-03	25,8
T3 37,5 %	5,84E-04	2,92	6,11E-03	30,55
T3.1 50 %	6,37E-04	3,19	6,72E-03	33,6
T3.2 50 %	6,26E-04	3,13	6,41E-03	32,05
T3 75 %	7,52E-04	3,76	7,74E-03	38,7
T3 100 %	8,09E-04	4,04	4,98E-03	24,9

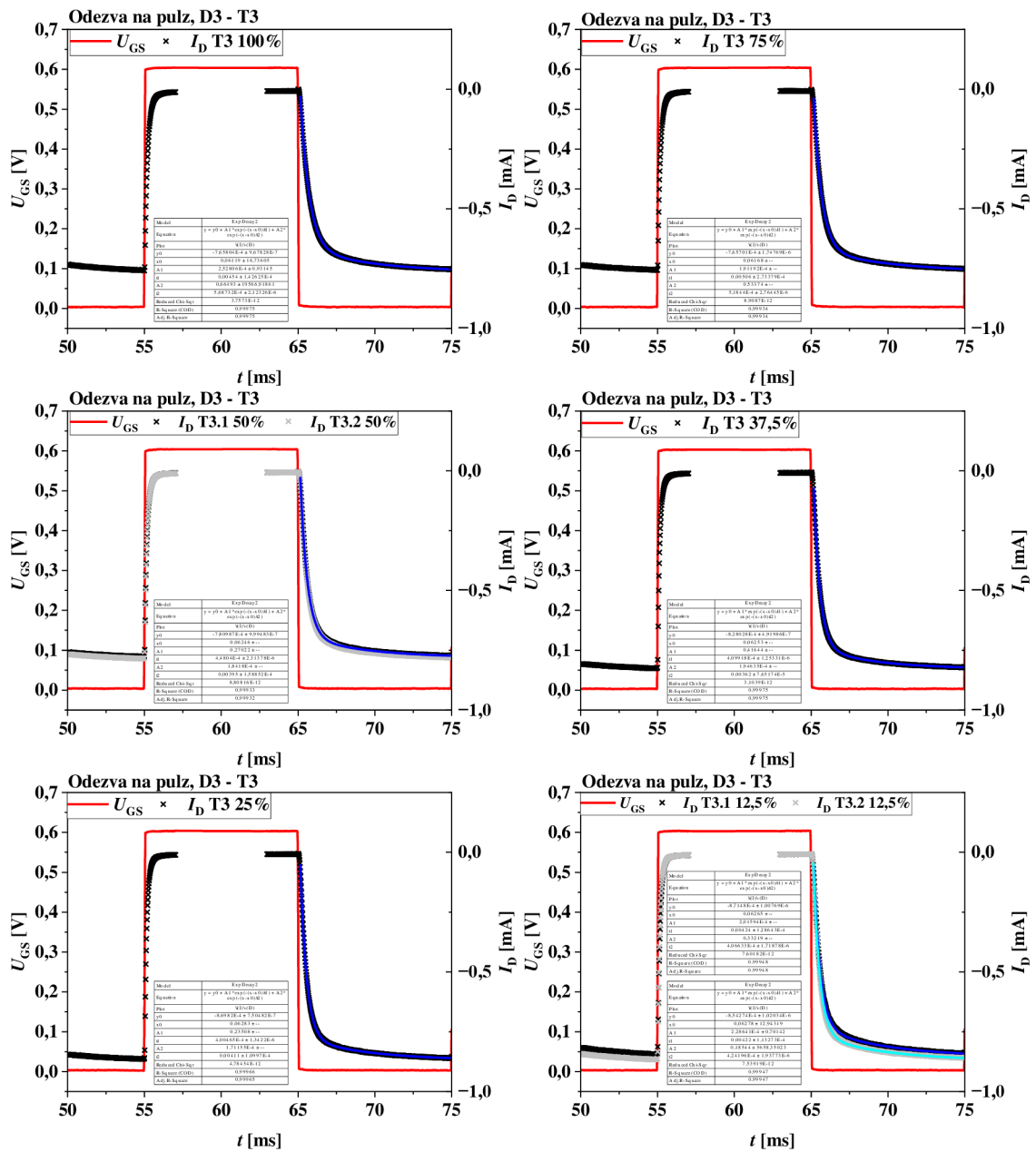
B.5 Pulzní charakteristiky – čip D3



Obrázek 5.63: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – leptané zlato



Obrázek 5.64: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – SiO₂



Obrázek 5.65: Porovnání pulzních charakteristik čipu D3 – tranzistoru T3

Tabulka 5.6 Získané časové konstanty – čip D3

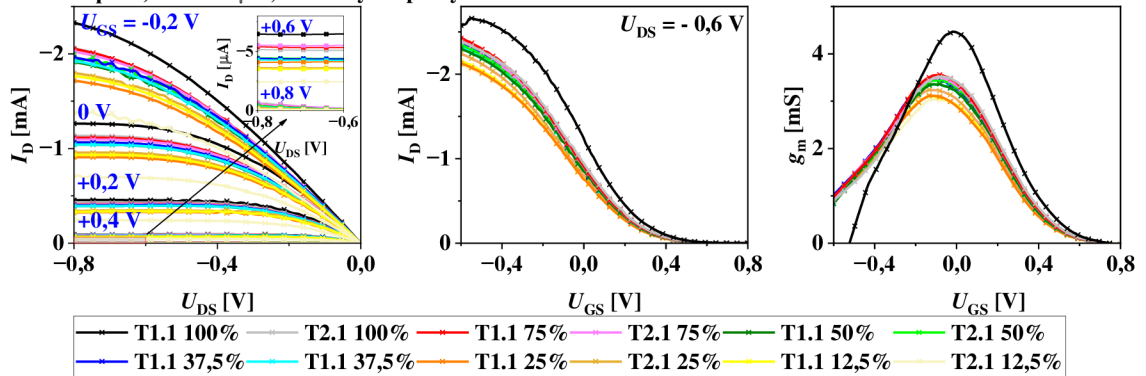
Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	5,63E-04	2,82	5,51E-03	27,55
T2.1 12,5 %	5,88E-04	2,94	7,00E-03	35
T1.1 25 %	5,81E-04	2,91	7,55E-03	37,75
T2.1 25 %	5,80E-04	2,90	6,38E-03	31,9
T1.1 37,5 %	6,41E-04	3,21	1,07E-02	53,25
T2.1 37,5 %	6,41E-04	3,21	1,07E-02	53,25
T1.1 50 %	6,53E-04	3,26	7,95E-03	39,75
T2.1 50 %	6,47E-04	3,24	8,36E-03	41,8
T1.1 75 %	6,64E-04	3,32	5,91E-03	29,55
T2.1 75 %	6,43E-04	3,22	5,50E-03	27,5
T1.1 100 %	6,39E-04	3,19	4,63E-03	23,15
T2.1 100 %	6,52E-04	3,26	4,55E-03	22,75
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	5,35E-04	2,67	6,67E-03	33,35
T2.2 12,5 %	5,73E-04	2,86	1,06E-02	52,95
T1.2 25 %	5,75E-04	2,87	6,74E-03	33,7
T2.2 25 %	5,75E-04	2,87	6,74E-03	33,7
T1.2 37,5 %	6,26E-04	3,13	7,56E-03	37,8
T2.2 37,5 %	6,28E-04	3,14	1,02E-02	51,15
T1.2 50 %	6,53E-04	3,27	1,13E-02	56,7
T2.2 50 %	6,54E-04	3,27	1,31E-02	65,65
T1.2 75 %	6,48E-04	3,24	5,21E-03	26,05
T2.2 75 %	6,58E-04	3,29	5,98E-03	29,9
T1.2 100 %	6,45E-04	3,23	4,69E-03	23,45
T2.2 100 %	6,50E-04	3,25	4,89E-03	24,44
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	4,24E-04	2,12	4,22E-03	21,1
T3.2 12,5 %	4,07E-04	2,03	4,24E-03	21,2
T3 25 %	4,00E-04	2,00	4,11E-03	20,55
T3 37,5 %	4,10E-04	2,05	3,62E-03	18,1
T3.1 50 %	4,48E-04	2,24	3,95E-03	19,75
T3.2 50 %	4,48E-04	2,24	3,95E-03	19,75
T3 75 %	5,19E-04	2,59	5,06E-03	25,3
T3 100 %	5,69E-04	2,84	4,54E-03	22,7

Příloha C - Získaná data – wafer 2000 ot./min

C.1 Stejnoseměrné charakteristiky – čip A2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

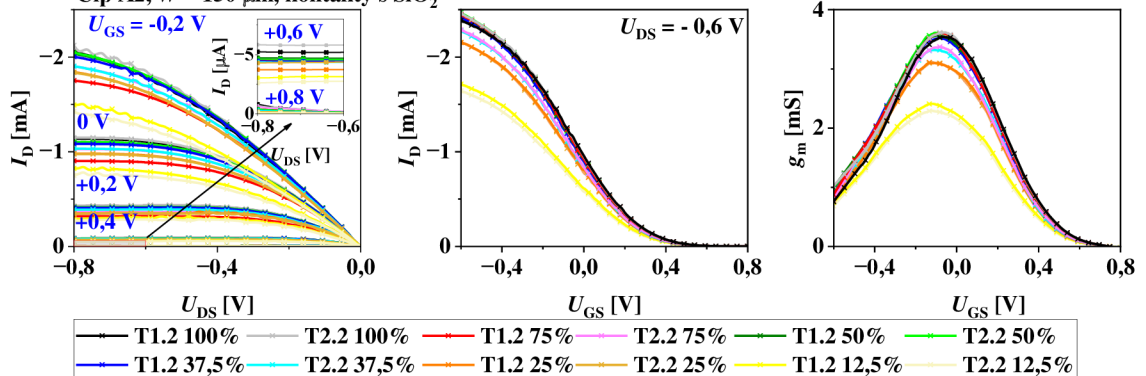
Čip A2, $W = 150 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.66: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

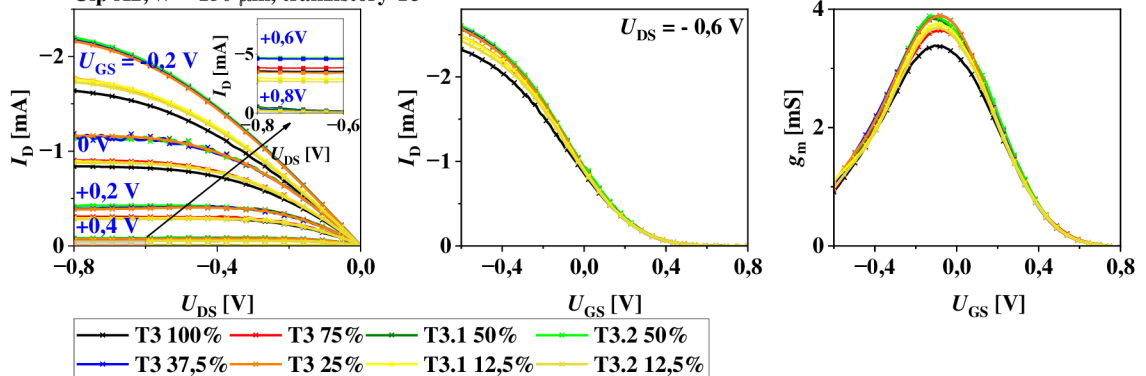
Čip A2, $W = 150 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



Obrázek 5.67: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – SiO_2

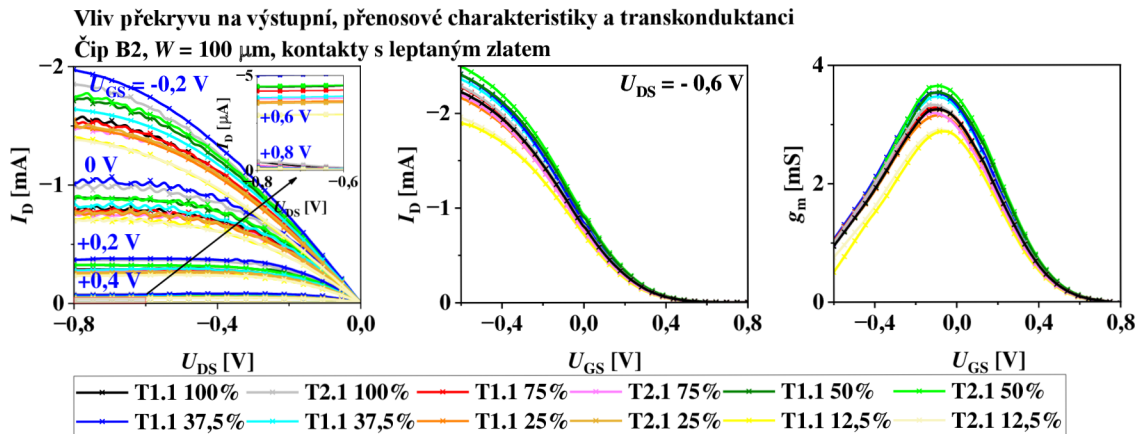
Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

Čip A2, $W = 150 \mu\text{m}$, tranzistory T3

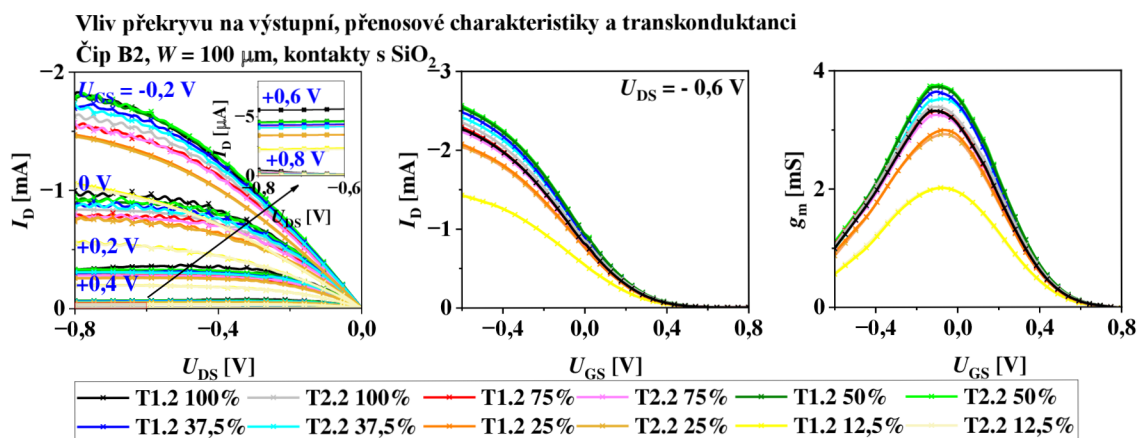


Obrázek 5.68: Stejnoseměrné charakteristiky čipu A2 – tranzistory T3

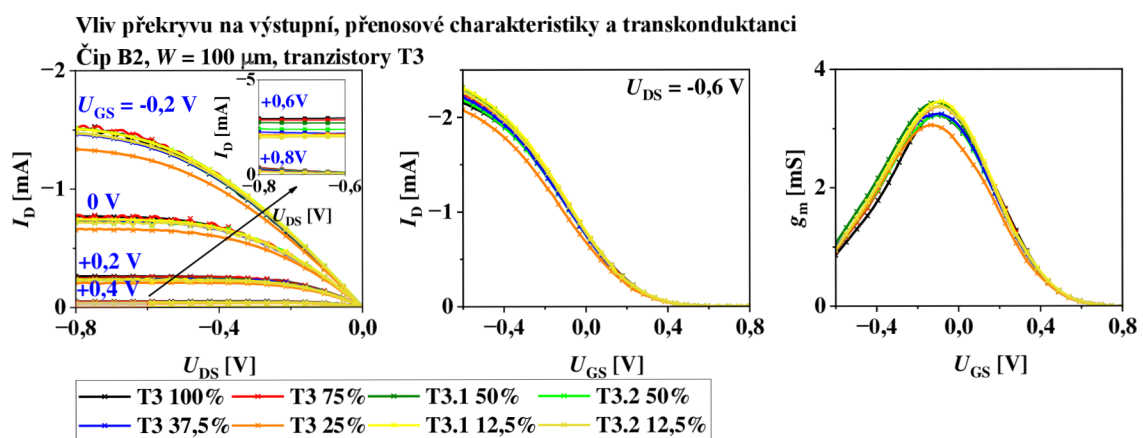
C.2 Stejnoseměrné charakteristiky – čip B2



Obrázek 5.69: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – leptané zlato



Obrázek 5.70: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – SiO_2

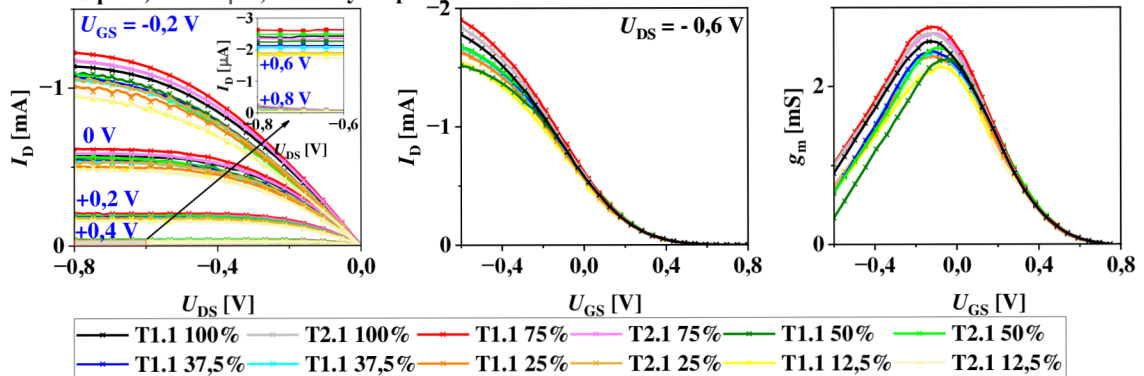


Obrázek 5.71: Stejnoseměrné charakteristiky čipu B2 – tranzistory T3

C.3 Stejnoseměrné charakteristiky – čip D2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

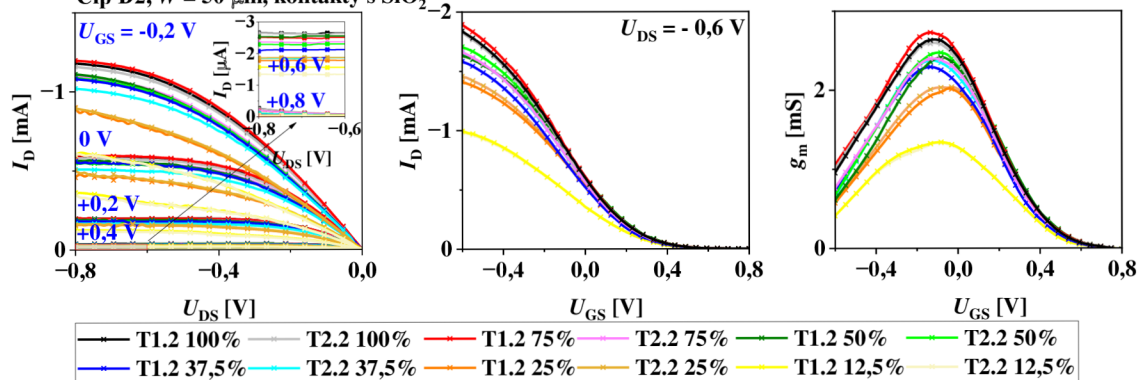
Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s leptaným zlatem



Obrázek 5.72: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – leptané zlato

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

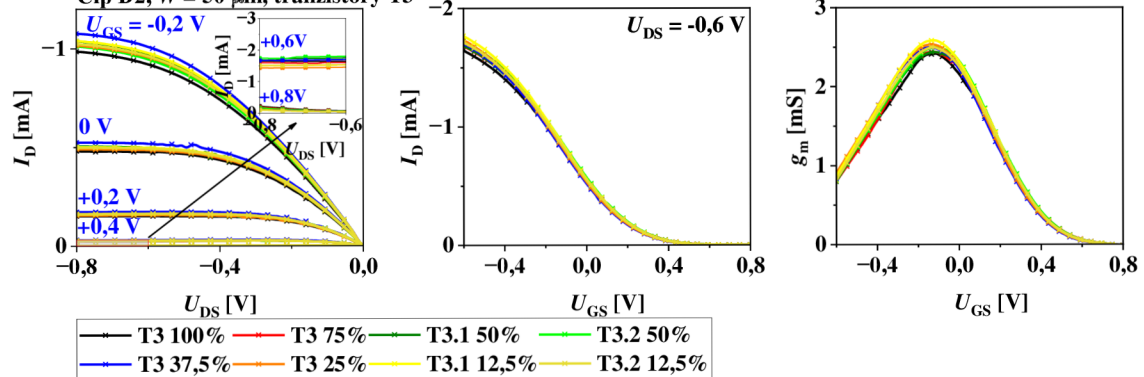
Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, kontakty s SiO_2



Obrázek 5.73: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – SiO_2

Vliv překryvu na výstupní, přenosové charakteristiky a transkonduktanci

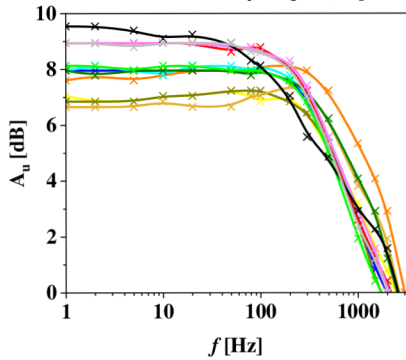
Čip D2, $W = 50 \mu\text{m}$, tranzistory T3



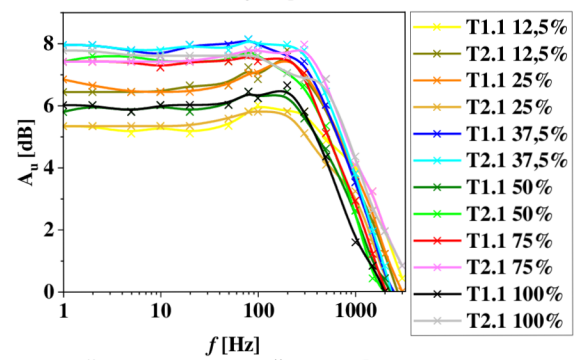
Obrázek 5.74: Stejnoseměrné charakteristiky čipu D2 – tranzistory T3

C.4 Frekvenční charakteristiky – čipy A, B, D

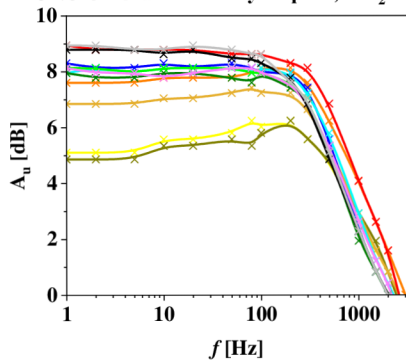
Frekvenční charakteristiky - čip A2, leptané zlato



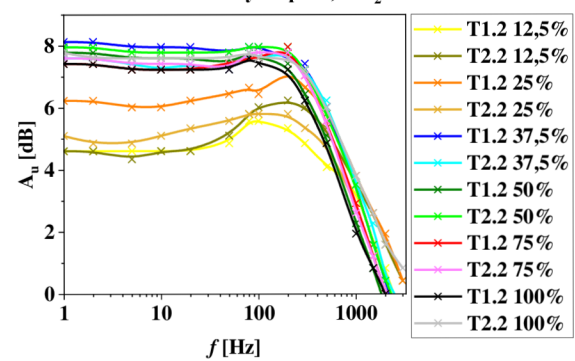
Frekvenční charakteristiky - čip B2, leptané zlato



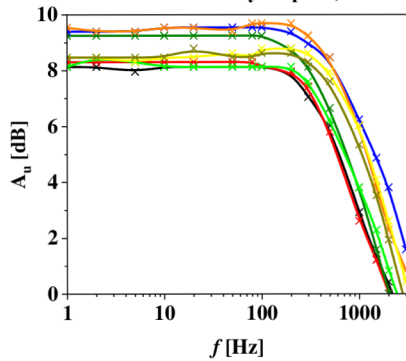
Frekvenční charakteristiky - čip A2, SiO₂



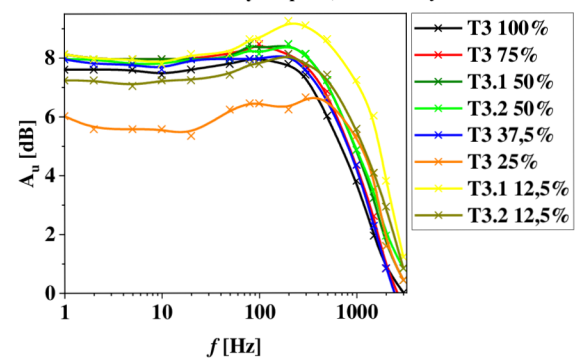
Frekvenční charakteristiky - čip B2, SiO₂



Frekvenční charakteristiky - čip A2, tranzistory T3

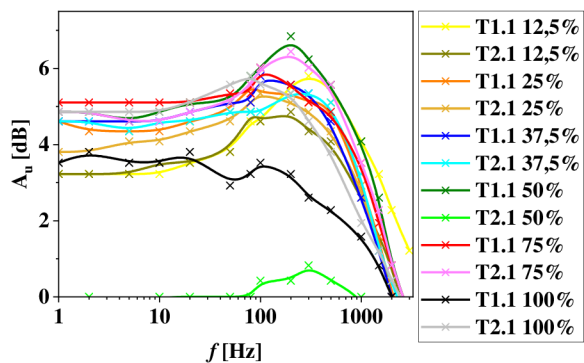


Frekvenční charakteristiky - čip B2, tranzistory T3

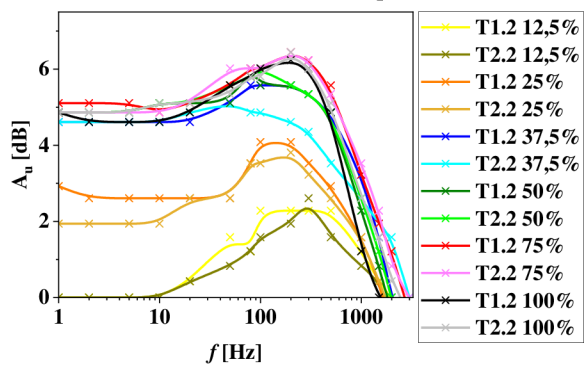


Obrázek 5.75: Porovnání frekvenčních charakteristik čipů A a B

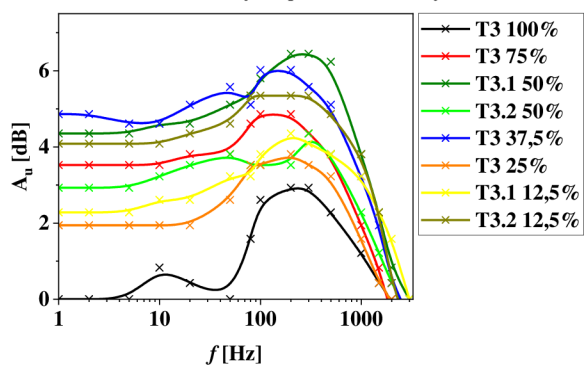
Frekvenční charakteristiky - čip D2, leptané zlato



Frekvenční charakteristiky - čip D2, SiO₂



Frekvenční charakteristiky - čip D2, tranzistory T3



Obrázek 5.76: Porovnání frekvenčních charakteristik čip D

C.5 Tabulky mezních frekvencí a zesílení

Tabulka 5.7 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip A2

Čip A2, 2000 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%	748	7,04	T1.1 37,5%	540	7,96	T1.1 75%	429	8,94
T2.1 12,5%	689	7,04	T2.1 37,5%	570	7,96	T2.1 75%	457	8,94
T1.1 25%	1151	7,85	T1.1 50%	762	7,96	T1.1 100%	253	9,25
T2.1 25%	999	6,85	T2.1 50%	501	7,96	T2.1 100%	422	8,94
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%	988	5,64	T1.2 37,5%	542	8,1	T1.2 75%	628	8,94
T2.2 12,5%	1248	5,35	T2.2 37,5%	575	8,1	T2.2 75%	519	8,13
T1.2 25%	793	7,78	T1.2 50%	527	7,8	T1.2 100%	366	8,79
T2.2 25%	676	7,04	T2.2 50%	489	8,13	T2.2 100%	394	8,94
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	1111	8,46	T3.1 50%	535	9,25			
T3.2 12,5%	943	8,46	T3.2 50%	655	8,3			
T3 25%	876	9,4	T3 75%	554	8,3			
T3 37,5%	926	9,4	T3 100%	586	8,13			

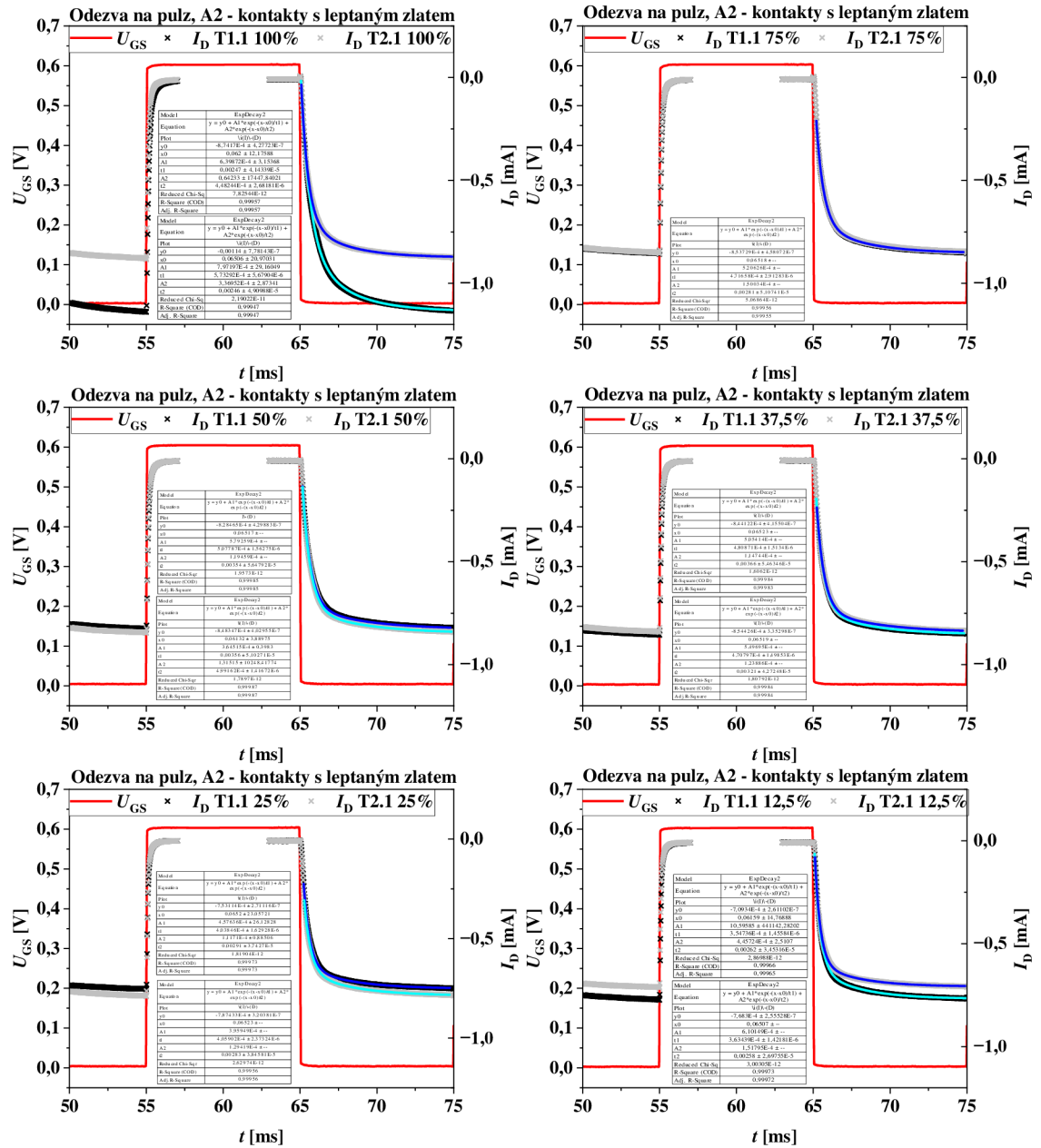
Tabulka 5.8 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip B2

Čip B2, 2000 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%	1859	5,34	T1.1 37,5%	687	7,78	T1.1 75%	661	7,42
T2.1 12,5%	964	6,65	T2.1 37,5%	774	7,78	T2.1 75%	1023	7,42
T1.1 25%	926	7,04	T1.1 50%	838	6,02	T1.1 100%	687	6,02
T2.1 25%	1087	5,58	T2.1 50%	598	7,6	T2.1 100%	891	7,78
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%	1391	4,98	T1.2 37,5%	662	7,96	T1.2 75%	647	7,56
T2.2 12,5%	1523	5,45	T2.2 37,5%	799	7,42	T2.2 75%	626	7,56
T1.2 25%	1117	6,49	T1.2 50%	532	7,78	T1.2 100%	520	7,42
T2.2 25%	1065	5,59	T2.2 50%	645	7,96	T2.2 100%	833	7,6
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	1612	8,47	T3.1 50%	535	9,25			
T3.2 12,5%	1399	7,26	T3.2 50%	655	8,3			
T3 25%	1689	6,1	T3 75%	554	8,3			
T3 37,5%	852	7,81	T3 100%	586	8,13			

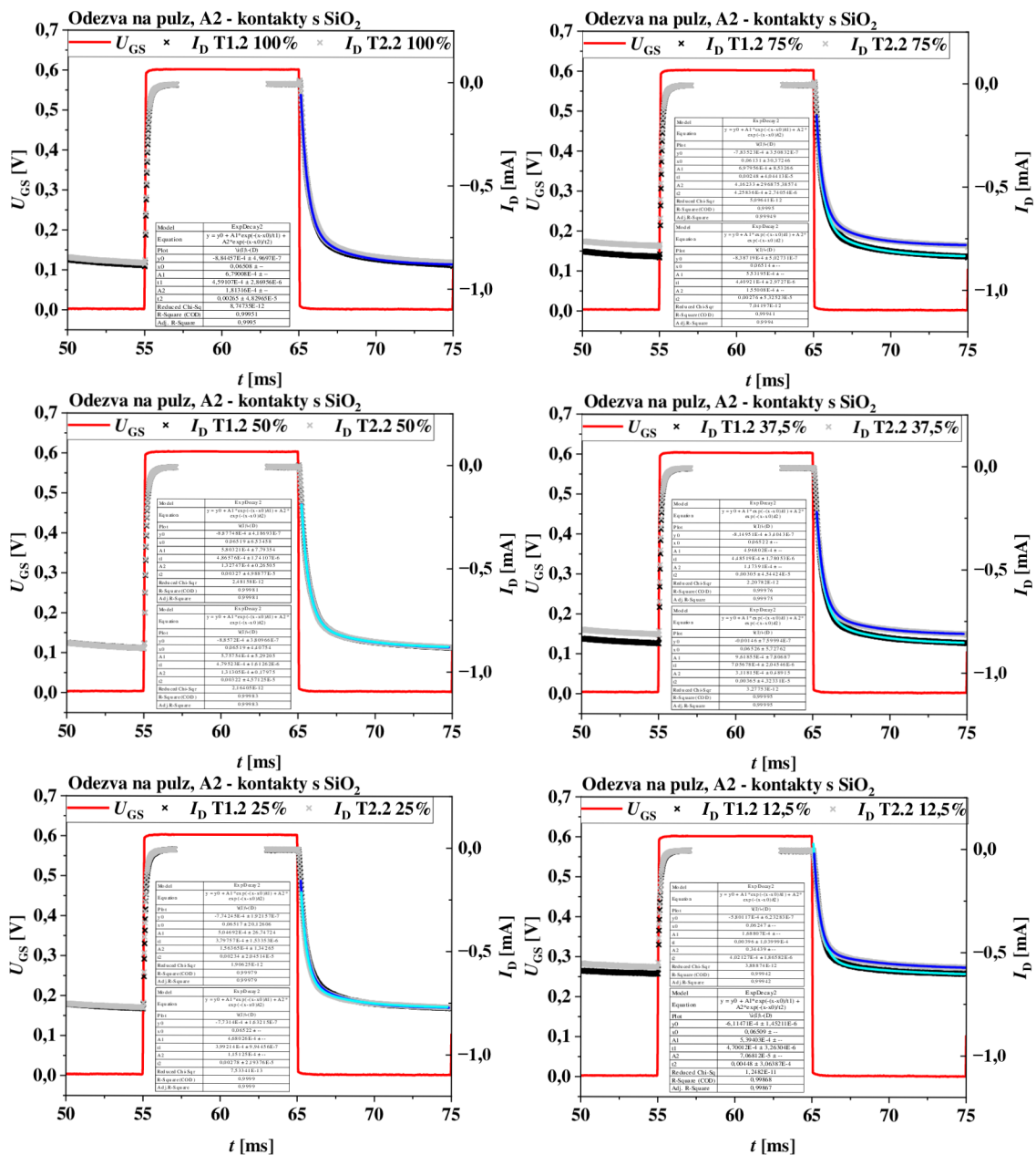
Tabulka 5.9 Naměřené hodnoty zesílení a mezní frekvence – čip D2

Čip D2, 2000 ot./min								
Leptané zlato								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.1 12,5%	2285	4,88	T1.1 37,5%	1109	5,18	T1.1 75%	1326	5,39
T2.1 12,5%	1785	4,07	T2.1 37,5%	1283	4,97	T2.1 75%	1248	5,8
T1.1 25%	1304	5,03	T1.1 50%	1065	5,82	T1.1 100%	1618	3,52
T2.1 25%	1363	4,58	T2.1 50%	zničen		T2.1 100%	929	5,2
SiO ₂								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]
T1.2 12,5%	PP $A_{u\max} = 2$ dB		T1.2 37,5%	1274	5,2	T1.2 75%	1172	5,69
T2.2 12,5%			T2.2 37,5%	1752	4,75	T2.2 75%	1269	5,78
T1.2 25%	1441	3,49	T1.2 50%	941	5,48	T1.2 100%	790	5,46
T2.2 25%	1592	3,13	T2.2 50%	1025	5,48	T2.2 100%	984	5,76
T3								
Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]	Vzorek	f_m [Hz]	A_u [dB]			
T3.1 12,5%	2768	3,36	T3.1 50%	1397	5,56			
T3.2 12,5%	1569	4,87	T3.2 50%	1897	3,56			
T3 25%	1685	3,28	T3 75%	1271	4,24			
T3 37,5%	1302	5,43	T3 100%	PP $A_{u\max} = 3$ dB				

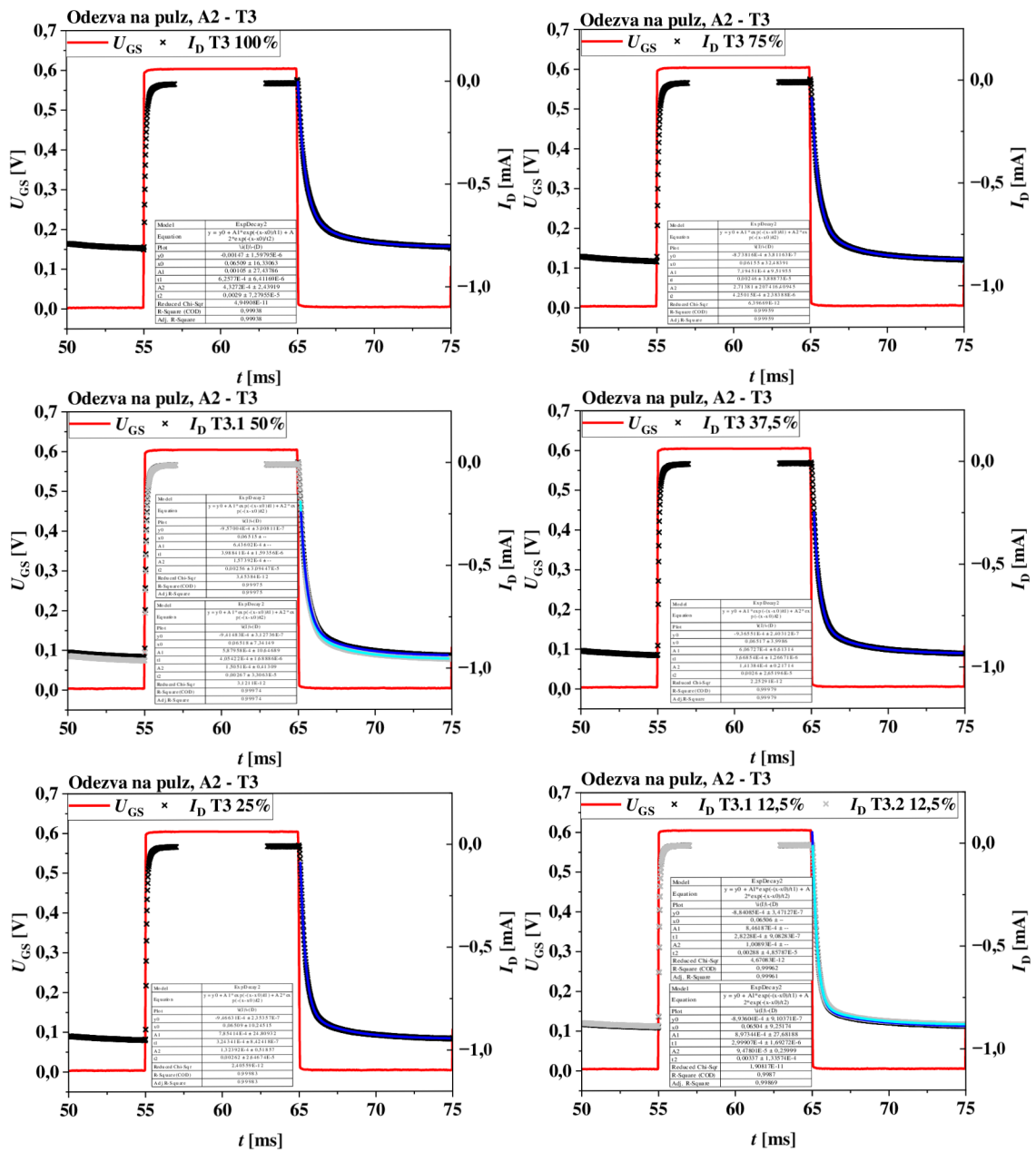
C.6 Pulzní charakteristiky – čip A2



Obrázek 5.77: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – lepané zlato



Obrázek 5.78: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – SiO₂

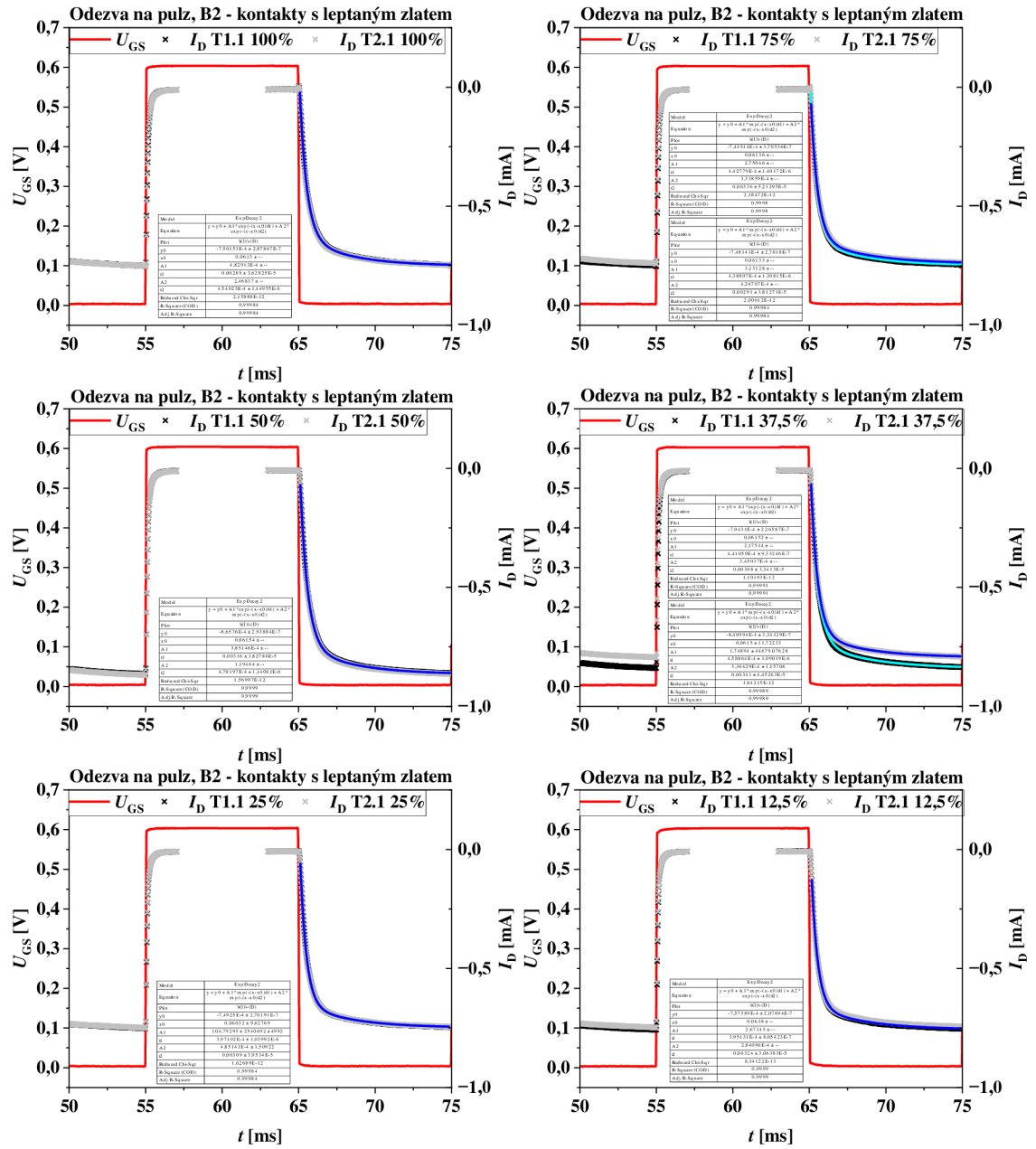


Obrázek 5.79: Porovnání pulzních charakteristik čipu A2 – tranzistoru T3

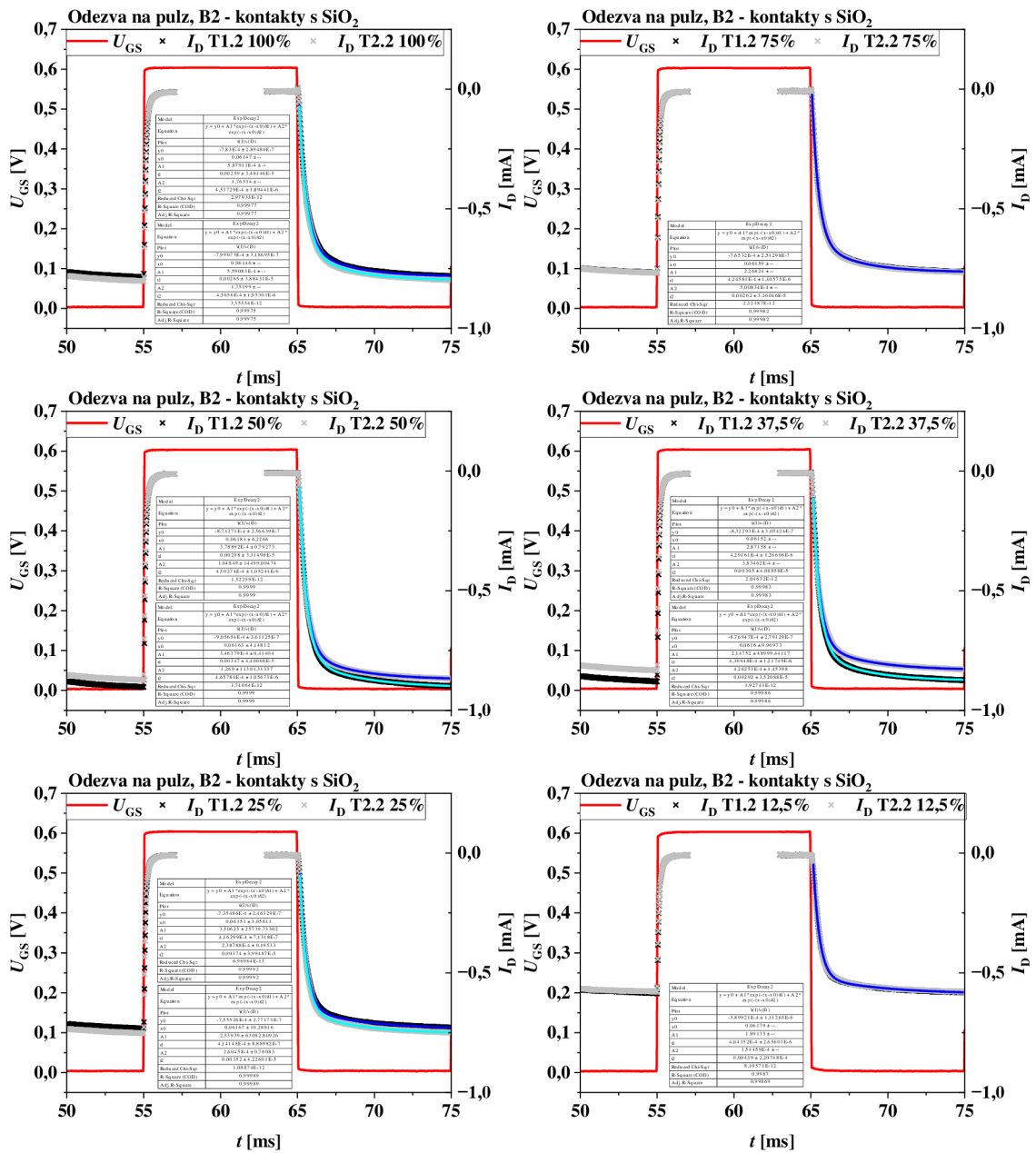
Tabulka 5.10 Získané časové konstanty – čip A2

Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	3,63E-04	1,82	2,58E-03	12,90
T2.1 12,5 %	3,55E-04	1,77	2,62E-03	13,10
T1.1 25 %	4,04E-04	2,02	2,91E-03	14,55
T2.1 25 %	4,06E-04	2,03	2,83E-03	14,15
T1.1 37,5 %	4,81E-04	2,40	3,66E-03	18,30
T2.1 37,5 %	4,71E-04	2,35	3,21E-03	16,05
T1.1 50 %	5,08E-04	2,54	3,54E-03	17,70
T2.1 50 %	4,99E-04	2,50	3,56E-03	17,80
T1.1 75 %	4,72E-04	2,36	2,81E-03	14,05
T2.1 75 %	4,72E-04	2,36	2,81E-03	14,05
T1.1 100 %	5,73E-04	2,87	2,46E-03	12,30
T2.1 100 %	4,48E-04	2,24	2,47E-03	12,35
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	4,70E-04	2,35	4,48E-03	22,40
T2.2 12,5 %	4,02E-04	2,01	3,96E-03	19,80
T1.2 25 %	3,80E-04	1,90	2,34E-03	11,70
T2.2 25 %	3,99E-04	2,00	2,78E-03	13,90
T1.2 37,5 %	5,06E-04	2,53	3,25E-03	16,25
T2.2 37,5 %	4,49E-04	2,24	3,05E-03	15,25
T1.2 50 %	4,87E-04	2,43	3,27E-03	16,35
T2.2 50 %	4,80E-04	2,40	3,22E-03	16,10
T1.2 75 %	4,41E-04	2,20	2,76E-03	13,80
T2.2 75 %	4,26E-04	2,13	2,48E-03	12,40
T1.2 100 %	4,46E-04	2,23	2,65E-03	13,25
T2.2 100 %	4,46E-04	2,23	2,65E-03	13,25
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	2,82E-04	1,41	2,88E-03	14,40
T3.2 12,5 %	3,00E-04	1,50	3,77E-03	18,85
T3 25 %	3,24E-04	1,62	2,62E-03	13,10
T3 37,5 %	3,67E-04	1,83	2,60E-03	13,00
T3.1 50 %	3,99E-04	1,99	2,56E-03	12,80
T3.2 50 %	4,05E-04	2,03	2,67E-03	13,35
T3 75 %	4,25E-04	2,13	2,46E-03	12,30
T3 100 %	6,26E-04	3,13	2,90E-03	14,50

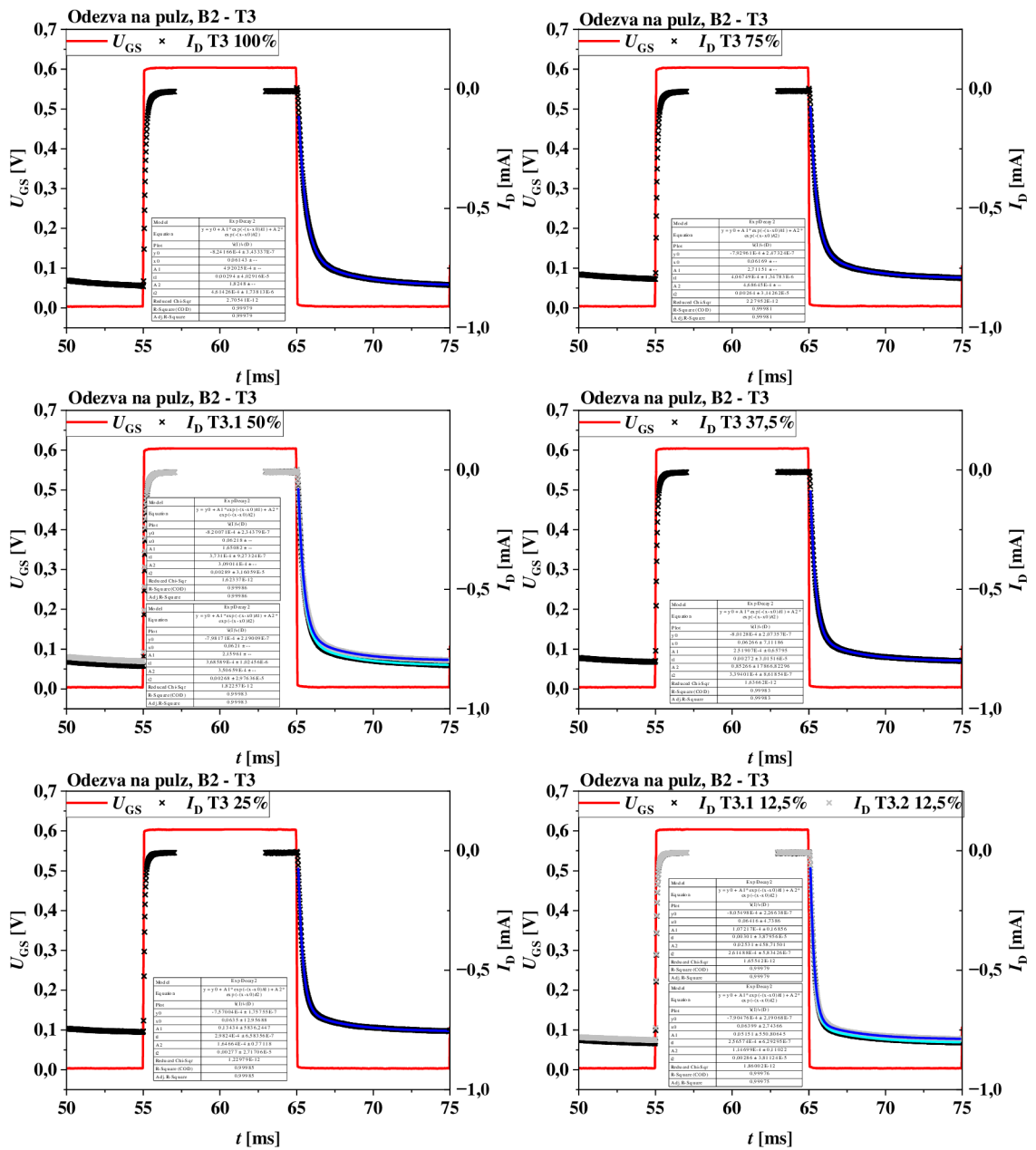
C.7 Pulzní charakteristiky – čip B2



Obrázek 5.80: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – leptané zlato



Obrázek 5.81: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – SiO₂

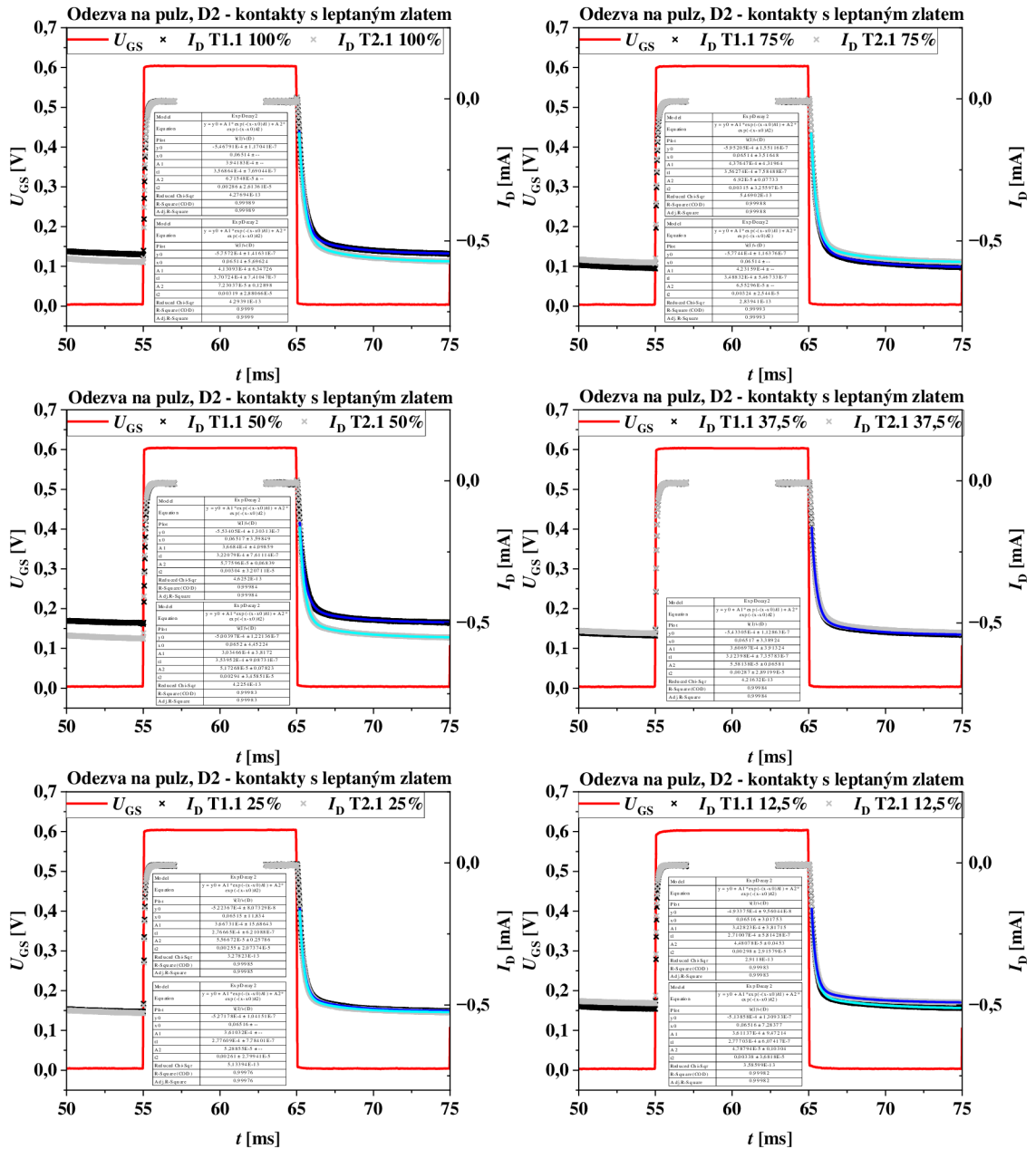


Obrázek 5.82: Porovnání pulzních charakteristik čipu B2 – tranzistoru T3

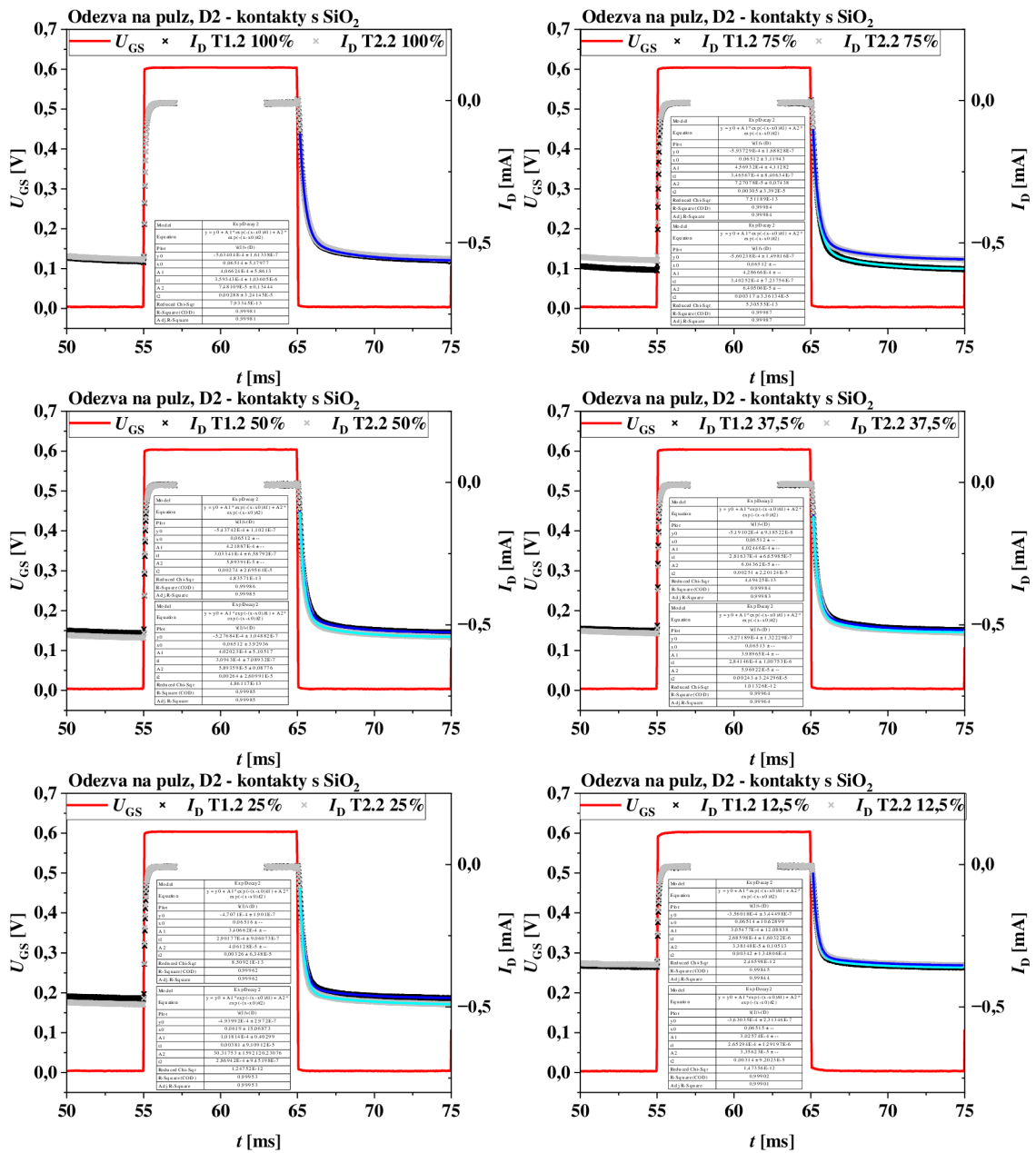
Tabulka 5.11 Získané časové konstanty – čip B2

Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	3,95E-04	1,98	3,24E-03	16,20
T2.1 12,5 %	3,95E-04	1,98	3,24E-03	16,20
T1.1 25 %	3,97E-04	1,99	3,09E-03	15,45
T2.1 25 %	3,97E-04	1,99	3,09E-03	15,45
T1.1 37,5 %	4,59E-04	2,29	3,41E-03	17,05
T2.1 37,5 %	4,41E-04	2,21	3,08E-03	15,40
T1.1 50 %	4,78E-04	2,39	3,16E-03	15,80
T2.1 50 %	4,78E-04	2,39	3,16E-03	15,80
T1.1 75 %	4,39E-04	2,19	2,91E-03	14,55
T2.1 75 %	4,41E-04	2,20	3,36E-03	16,80
T1.1 100 %	4,54E-04	2,27	2,89E-03	14,45
T2.1 100 %	4,54E-04	2,27	2,89E-03	14,45
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	4,04E-04	2,02	4,39E-03	21,95
T2.2 12,5 %	4,04E-04	2,02	4,39E-03	21,95
T1.2 25 %	4,16E-04	2,08	3,74E-03	18,70
T2.2 25 %	4,14E-04	2,07	3,52E-03	17,60
T1.2 37,5 %	4,37E-04	2,18	2,92E-03	14,60
T2.2 37,5 %	4,29E-04	2,15	3,05E-03	15,25
T1.2 50 %	4,66E-04	2,33	3,47E-03	17,35
T2.2 50 %	4,50E-04	2,25	2,98E-03	14,90
T1.2 75 %	4,25E-04	2,12	2,62E-03	13,10
T2.2 75 %	4,25E-04	2,12	2,62E-03	13,10
T1.2 100 %	4,54E-04	2,27	2,59E-03	12,95
T2.2 100 %	4,57E-04	2,28	2,65E-03	13,25
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	2,61E-04	1,31	3,01E-03	15,05
T3.2 12,5 %	2,57E-04	1,28	2,86E-03	14,30
T3 25 %	2,98E-04	1,49	2,77E-03	13,85
T3 37,5 %	3,39E-04	1,70	2,72E-03	13,60
T3.1 50 %	3,73E-04	1,87	2,89E-03	14,45
T3.2 50 %	3,69E-04	1,84	2,68E-03	13,40
T3 75 %	4,07E-04	2,03	2,64E-03	13,20
T3 100 %	4,61E-04	2,31	2,94E-03	14,70

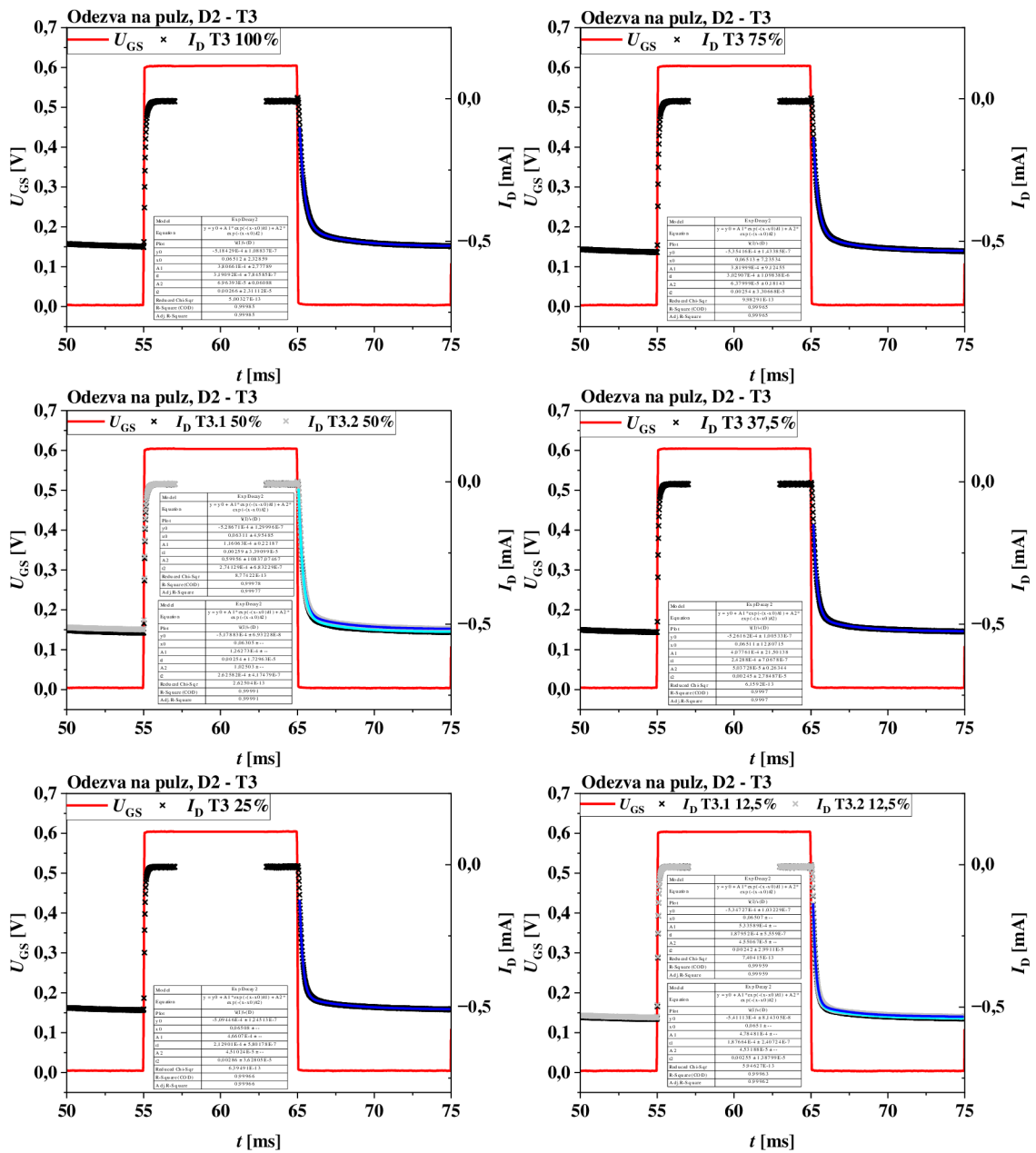
C.8 Pulzní charakteristiky – čip D2



Obrázek 5.83: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – leptané zlato



Obrázek 5.84: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – SiO₂



Obrázek 5.85: Porovnání pulzních charakteristik čipu D2 – tranzistoru T3

Tabulka 5.12 Získané časové konstanty – čip D2

Leptané zlato				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.1 12,5 %	2,71E-04	1,36	2,98E-03	14,90
T2.1 12,5 %	2,78E-04	1,39	3,38E-03	16,90
T1.1 25 %	2,77E-04	1,38	2,55E-03	12,75
T2.1 25 %	2,78E-04	1,39	2,61E-03	13,05
T1.1 37,5 %	3,12E-04	1,56	2,87E-03	14,35
T2.1 37,5 %	3,12E-04	1,56	2,87E-03	14,35
T1.1 50 %	3,22E-04	1,61	3,04E-03	15,20
T2.1 50 %	3,54E-04	1,77	2,94E-03	14,70
T1.1 75 %	3,49E-04	1,74	3,24E-03	16,20
T2.1 75 %	3,56E-04	1,78	3,15E-03	15,75
T1.1 100 %	3,57E-04	1,78	2,86E-03	14,30
T2.1 100 %	3,71E-04	1,85	3,19E-03	15,95
SiO ₂				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T1.2 12,5 %	2,65E-04	1,33	3,14E-03	15,70
T2.2 12,5 %	2,69E-04	1,34	3,42E-03	17,10
T1.2 25 %	2,87E-04	1,43	3,81E-03	19,05
T2.2 25 %	2,90E-04	1,45	3,26E-03	16,30
T1.2 37,5 %	2,84E-04	1,42	2,43E-03	12,15
T2.2 37,5 %	2,82E-04	1,41	2,51E-03	12,55
T1.2 50 %	3,03E-04	1,52	2,74E-03	13,70
T2.2 50 %	3,09E-04	1,55	2,64E-03	13,20
T1.2 75 %	3,40E-04	1,70	3,17E-03	15,85
T2.2 75 %	3,47E-04	1,73	3,05E-03	15,25
T1.2 100 %	3,59E-04	1,80	2,88E-03	14,40
T2.2 100 %	3,59E-04	1,80	2,88E-03	14,40
Tranzistory T3				
Překryv [%]	C ₁		C ₂	
	τ_1 [s]	5 τ [ms]	τ_2 [s]	5 τ [ms]
T3.1 12,5 %	1,88E-04	0,94	2,42E-03	12,10
T3.2 12,5 %	1,88E-04	0,94	2,55E-03	12,75
T3 25 %	2,13E-04	1,06	2,86E-03	14,30
T3 37,5 %	2,43E-04	1,21	2,45E-03	12,25
T3.1 50 %	2,74E-04	1,37	2,59E-03	12,95
T3.2 50 %	2,63E-04	1,31	2,54E-03	12,70
T3 75 %	3,03E-04	1,51	2,54E-03	12,70
T3 100 %	3,19E-04	1,60	2,66E-03	13,30