



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tištěné rezistory na bázi organických materiálů

Autor práce: Zdeněk Burda

Vedoucí práce: Ing. Silvan Pretl

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk BURDA**
Osobní číslo: **E09B0250P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Tištěné rezistory na bázi organických materiálů**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou tištěných rezistivních struktur v elektronice a popište současný stav vývoje v této oblasti s ohledem na používané technologie, materiálové systémy a cílové aplikace.
2. Popište možnosti využití intrinzičně vodivých organických materiálů pro realizaci odporových elementů. Podrobněji se zaměřte na aplikace organického vodivého materiálu PEDOT: PSS v této oblasti.
3. Charakterizujte klíčové parametry tištěných rezistorů a popište možnosti testování jejich kvality.
4. Proměřte elektrické vlastnosti předložených tištěných rezistivních struktur s vybranými organickými materiály.

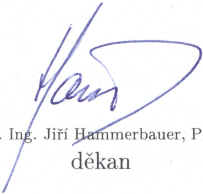


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

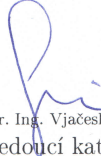
1. Stęplewski, W.; Serzysko, T.; Koziół, G.; Dziejczak, A.: Preliminary assessment of the stability of thin- and polymer thick-film resistors embedded into printed wiring boards. *Microelectronics Reliability*, 52(8), 1719-1725. doi:10.1016/j.microrel.2012.03.026
2. Cheng, P. L. et al.: Quantitative Analysis of Resistance Tolerance of Polymer Thick Film Printed Resistors. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(2), 269-274. doi:10.1109/TCAPT.2007.897968
3. Ionescu, C.; Svasta, P.; Vasile, A.; Bonfert, D.: Investigations on organic printed resistors based on PEDOT: PSS. 2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 85-89. doi:10.1109/SIITME.2012.6384352
4. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Silvan Pretl**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou tištěných rezistivních struktur v elektronice a popisuje současný stav vývoje v této oblasti s ohledem na používané technologie, materiálové systémy a cílové aplikace. Popisuje možnosti využití intrinzičně vodivých organických materiálů pro realizaci odporových elementů a podrobněji se zaměřuje na aplikace organického vodivého materiálu PEDOT:PSS v této oblasti. Dále práce charakterizuje klíčové parametry tištěných rezistorů a možnosti pro testování jejich kvality. Na závěr budou proměřeny elektrické vlastnosti předložených tištěných rezistivních struktur s vybranými organickými materiály.

Klíčová slova

tištěné struktury, organické materiály PEDOT:PSS, tištěné rezistory

Abstract

Burda, Zdeněk. *Printed resistors based on organic materials [Tištěné rezistory na bázi organických materiálů]*. Pilsen, 2014. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Silvan Pretl

This bachelor thesis deals with the printed resistive structures in electronics and describes the current state of development in this area with regard to the technology, material systems and the target application. Describes the availability of conductive organic materials for the realization of resistive elements, and further focuses on the application of organic conductive material PEDOT:PSS in this area. Furthermore, this work characterizes the key parameters of printed resistors and options for testing their quality. In the last part, will be measured the electrical properties of the produced printed resistive structures with selected organic materials.

Keywords

printed structure, organic materials PEDOT:PSS, printed resistors

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4. června 2014

Zdeněk Burda

.....

Podpis

Poděkování

Tato práce vznikla s podporou Technologické agentury České republiky v rámci projektu FLEXPINT (TE01020022) a s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
Seznam symbolů a zkratk	xi
1 Úvod	1
2 Tištěné rezistivní struktury	2
2.1 Základní informace	2
2.2 Materiály a konstrukce rezistorů	3
2.3 Kontaktování rezistorů	4
2.4 Testování rezistorů	6
3 Organický vodivý materiál PEDOT:PSS	14
3.1 Základní informace	14
3.2 Složení a použití materiálu	15
3.3 Aplikace	16
4 Elektrické vlastnosti tištěných rezistorů	19
4.1 Metodika měření	19
4.1.1 Struktury tištěných vzorků	19
4.1.2 Plošný odpor	20
4.1.3 4-vodičové měření	21
4.1.4 Měřicí přístroje	21
4.2 Specifická rezistance	22
4.2.1 Variační koeficient	24
4.3 V-A charakteristika	25
4.4 Teplotní závislost rezistance	26
4.5 Proudové zatěžování	28
5 Závěr	30
Reference, použitá literatura	32

Přílohy	34
A Specifická rezistance	34
B Variační koeficient	37
C V-A charakteristika	39
D Teplotní závislost rezistance	41
E Proudové zatěžování	42

Seznam obrázků

2.1	Typy rezistivních kontaktů: a) Cu; b) asymetrická Cu; c) Cu s ochranou vrstvou Ni/Au; d) Cu s ochranou vrstvou Ag. Převzato z [1] 	4
2.2	Použitý profil pro pájení přetavením. Převzato z [1] 	5
2.3	Změna odporu v procesu pájení přetavením; rezistivní vrstva 25 Ω/\square . Převzato z [1] 	5
2.4	Změna odporu v procesu pájení přetavením; rezistivní vrstva 100 Ω/\square . Převzato z [1] 	6
2.5	Změna odporu v procesu pájení přetavením na rezistorech typu PTF v závislosti na typ inkoustu a šířky rezistivní vrstvy. Převzato z [1] 	6
2.6	Tepelné obrazce rezistorů 820 Ω s připojením zdrojem proudu o velikosti 21 mA (dodávaný výkon 361 mW); a) tenkovrstvý rezistor; b) silnovrstvý rezistor. Převzato z [1] 	7
2.7	Změny teploty na povrchu tenkovrstvého rezistoru 820 Ω (šířka rezistoru 1 mm, rezistivní vrstva 100 Ω/\square). Převzato z [1] 	8
2.8	Tepelný obraz tenkovrstvých rezistorů s viditelným poškozením (šířka rezistoru 1 mm). Převzato z [1] 	8
2.9	Teploty a změny výkonu tenkovrstvého rezistoru 820 Ω vlivem rostoucího proudu. Převzato z [1] 	9
2.10	Tepelné poškození: a) tenkovrstvý a b) silnovrstvý rezistor. Převzato z [1] 	9
2.11	Schéma teplotních parametrů cyklického testu. Převzato z [1] 	10
2.12	Průměrná procentuelní změna hodnot odporu po 120 teplotních cyklech pro tenkovrstvé rezistory NiP s rezistivní vrstvou 25 Ω/\square a 100 Ω/\square . Převzato z [1] 	10
2.13	Průměrná procentuelní změna hodnot odporu po 120 teplotních cyklech pro odpory PTF vytištěných na jednotlivých kontaktních materiálech: holé Cu, asymetrické Cu, Ni/Au a Ag. Převzato z [1] 	11
2.14	Velikosti odporů rezistorů v průběhu teplotních cyklů. Převzato z [1] 	11
2.15	Praskliny po teplotním cyklickém testu; zvětšení 5 000x a 50 000x. Převzato z [1] 	12
3.1	Chemická struktura poly(3,4-ethylenedioxythiofen) - poly(styrenesulfonik). Převzato z [5] 	15
3.2	Ukázka topologie vyrobené fólie tištěných rezistivních struktur podle velikosti šířky a efektivní délky PEDOT:PSS.	17

3.3	Detailní náhled na tištěnou strukturu rezistoru. Na obrázku je taktéž patrná chyba v drahách při výrobě sítotiskem.	18
4.1	Detailní obrázek tištěných rezistorů PEDOT:PSS se šířkou W300 s počtem čtverců $\square 1000$	20
4.2	Ilustrace plošné rezistance. [18]	20
4.3	Tištěný rezistor "sestavený" z plošných odporů. [18]	20
4.4	Schéma 4-vodičového zapojení pro měření specifické rezistance a teplotní závislosti rezistance.	21
4.5	Schéma zapojení v multiplexovací kartě 7708 pro měření 4-vodičovou metodou.	22
4.6	Schéma zapojení přípravku s hroty pro měření specifické rezistance metodou 4-vodičového měření.	23
4.7	Přípravek pro měření tištěných rezistivních struktur pomocí 4-bodového měření. Pro různé vzdálenosti se nastavovaly hroty manuálně po vodičích lištách.	23
4.8	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtu defektních vzorků.	24
4.9	Graf znázorňující velikost variačních koeficientů rezistivních struktur PEDOT1 s důrazem na jejich chybovost při měření specifické rezistance.	25
4.10	Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W200_ $\square 200$	25
4.11	V-A charakteristika CH2 sady se šířkou W300 a počtem čtverců $\square 200$ vyjadřující naprosto přesný lineární průběh V-A charakteristiky.	26
4.12	Teplotní závislost rezistance PEDOT2_W200_ $\square 50$	27
4.13	Procentuální diference teplotní závislosti rezistance PEDOT2_W200_ $\square 50$	27
4.14	Závislost celkového odporu na velikosti proudu.	29
4.15	Proudový průřez tištěného rezistoru šířky W100 s počtem čtverců $\square 100$ kanálu CH6.	29
A.1	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.	34
A.2	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.	35
A.3	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.	35

A.4	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.	36
A.5	Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.	36
B.1	Graf znázorňující velikost variačních koeficientů rezisitivních struktur PE-DOT2 s důrazem na jejich chybovost při měření specifické rezistance. . . .	37
B.2	Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W200_□200.	37
B.3	Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W300_□200.	38
B.4	Hodnoty variačního koeficientu PEDOT2_W200_□200.	38
B.5	Hodnoty variačního koeficientu PEDOT2_W300_□100. Vzorek na kanálu CH3 byl defektní.	38
C.1	V-A charakteristika CH7 sady se šířkou W200 a počtem čtverců □200 vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.	39
C.2	V-A charakteristika CH2 sady se šířkou W300 a počtem čtverců □200 vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.	40
C.3	V-A charakteristika CH7 sady se šířkou W300 a počtem čtverců □100 vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.	40
D.1	Teplotní závislost rezistance PEDOT1_W300_□100.	41
D.2	Procentuální diference teplotní závislosti rezistance PEDOT1_W300_□100.	41
E.1	Závislost celkové rezistance na velikosti proudu.	42

Seznam tabulek

2.1	Základní parametry tenkovrstvé technologie Ohmega-Ply. [4]	4
3.1	Příklady charakteristik PEDOT v závislosti na poměru dopování PSS. [1] .	16
4.1	Tabulky maximálních proudových zatížení testovaných rezistivních struktur. Symbol X značí, že u těchto rezistorů se nepodařilo změřit ani první úroveň proudového zatížení.	28

Seznam symbolů a zkratek

OLED	Organic Light-emitting Diode. Organické světelné diody.
NiP	Nickel-Phosphorus. Nikl-fosfor.
DPS	Deska plošných spojů.
CTE	Coefficient of Thermal Expansion. Koeficient tepelné roztažnosti.
PTF	Polymer Thick-Film. Polymerní silnovrstvý rezistor.
RCM	Resistor-Conductor Material. Rezistivní vodivý materiál.
TKR	Teplotní koeficient odporu.
CRT	Cathode Ray Tube. Vakuová obrazovka.

1

Úvod

Organická neboli přesněji polymerní elektronika, pro niž platí i označení polytronika, využívá vodivé plasty na bázi polymerů. Jejím základem jsou vodivé polymery objevené v roce 1977, za jejichž objev získali A. J. Heeger, A. G. MacDiarmid a H. Shirakawa v roce 2000 Nobelovu cenu [10]. Zájem o organickou a tištěnou elektroniku po celém světě rapidně roste a vyvolává velké investice do výstavby nových výrobních linek. Předpokládá se, že organická elektronika v budoucnu ovlivní všechna hospodářská odvětví a do některých vnese dokonce převratné změny. Mezi její důležité vlastnosti patří nízká hmotnost, výborná zpracovatelnost, mechanická flexibilita, barevná variabilita a protikorozní odolnost.

Organická elektronika je založena na kombinování nových materiálů a efektivním využití nákladů. Kombinací nových vodivých materiálů a s postupy hromadné výroby umožňuje ve vysokoobjemovém množství velmi levně vyrábět tenké a lehké elektronické komponenty na pružném substrátu. Z nepřeberného množství způsobů využití organické elektroniky lze zmínit např. srolovatelné displeje a počítače, elektronické časopisy a knihy, obvazy a náplasti s integrovanými senzory, inteligentní textilie, svítící tapety, ohebné plastové fotovoltaické články, lékařské diagnostické přístroje pro jedno použití, obaly indikující, nakolik čerstvé je zboží uvnitř, apod. První produkty, např. jednoduché snímače na polymerní bázi, elektronické čtečky a organické světelné diody (OLED), již přicházejí na trh a mnohé další jsou intenzivně připravovány do výroby.

První kapitola této práce se bude zabývat problematikou tištěných rezistivních struktur v elektronice a bude zkoumat současný stav vývoje v této oblasti s ohledem na používané technologie, materiálové systémy a cílové aplikace.

V další kapitole se budou řešit možnosti využití intrinzičně vodivých organických materiálů pro realizaci odporových elementů, kde se podrobněji zaměří na aplikace organického vodivého materiálu PEDOT:PSS v této oblasti.

Poslední kapitola nabídne charakteristiku klíčových parametrů tištěných rezistorů a popíše možnosti testování jejich kvality a proměření elektrických vlastností předložených tištěných rezistivních struktur s vybranými organickými materiály.

2

Tištěné rezistivní struktury

Tato kapitola popisuje problematiku tištěných tenkovrstvých NiP rezistorů a polymerních silnovrstvých rezistorů při jejich trvalém provozu s ohledem na jejich teplotu a velikosti odporů. Elektronické pasivní i aktivní komponenty vložené do vícevrstevných desek s plošnými spoji (DPS) splňují všechny standardní elektronické požadavky, mezi které patří zmenšení desky plošného spoje a zlepšení funkčního i bezpečnostního elementu. Celkový produkt desky plošného spoje s tištěnou elektronikou vede ke snížení nákladů. Po dokončení desky nelze vložené součásti měnit a výrobci tedy kladou velký důraz na stabilitu a spolehlivost těchto součástí.

2.1 Základní informace

Pasivní komponenty, jako jsou lineární a nelineární rezistory, kondenzátory, cívky, pojistky, atd., jsou základní součástí každého elektronického zařízení a zabírají značnou část povrchu desek plošných spojů. Současně malá velikost některých pasivních součástek může způsobovat problémy v automatizovaném montážním procesu. Technologií zabudováním pasivních prvků do vícevrstevné desky lze překonat mnohé nesnáze, například používání v některých konečných produktech, jako jsou mobilní telefony. Je pravda, že výrobci se snaží komponenty stále zmenšovat a tím vzniká velká řada problémů, jako je uchycení, manipulace a konečná fáze kontroly funkčnosti součástky. Tištěné pasivní komponenty jsou spolehlivější, mají lepší elektronické vlastnosti a DPS má větší hustotu a vodivost spojů.

Ačkoli vestavěné pasivní součástky mají mnoho výhod, mohou se u nich vyskytovat různé problémy spojené s trhlinami, deformacemi a nestabilitou komponentů. Na každou desku se vkládají odlišné pasivní součástky, a proto musí být každá deska odzkoušena kvůli koeficientu tepelné roztažnosti (CTE). Pokud se na DPS implementuje vadný rezistor, může být celá deska plošného spoje odmítnuta, protože špatný rezistor nelze vyměnit. V důsledku toho se snaží výrobci o dlouhodobou stabilitu a spolehlivost komponentů, aby se tato technologie rezistivních struktur dostala do další fáze pro široké komerční využití.

Pasivní součástky vložené do vnitřní struktury plošných spojů se objevily před řadou let. První pokusy s vložením kondenzátorů začaly na konci šedesátých let minulého století. Na počátku sedmdesátých let se začaly uplatňovat vrstvy typu NiP nebo NiCr pro výrobu tenkých rezistivních vrstev.

V tomto století se objevilo mnoho dalších materiálů, které mohou být použity pro vestavěné pasivní součástky. Stále platí, že technologie pro tenkovrstvé odporové materiály jsou nově vyvinuty. Tyto integrované technologie se používají v malém rozsahu, a to zejména ve vojenské a letecké elektronice. Růst poptávky po vysoce pokročilé a současně nízko-nákladové elektronice stoupá. Tištěné rezistory na DPS se uplatňují například v mobilních telefonech, noteboocích a síťových zařízeních. V současné době zažívá technologie tištěných součástek boom a očekává se, že tato technologie integrací součástek v DPS bude klíčovou. Předchozí výzkum byl zaměřen téměř výhradně na jeden druh materiálu. Dnes se kombinací tenkovrstvých a silnovrstvých technologií (thin- and thick-film) umožňuje vyrábět celou řadu rezistorů. To umožňuje získávat přesné odpory s vysokým stupněm miniaturizace v nižších tolerancích tenkovrstvých rezistorech a velmi vysokou odolnost při vyšších tolerancích odporů.

Polymerní silnovrstvé rezistory (PTF) jsou obvykle tvořeny z inkoustových polymerů, které jsou kompatibilní s různými základními materiály pro desky plošných spojů. Většinou se jedná o materiály, které jsou složené z uhlíku, jak ve formě prášku nebo grafitu, nebo z polymerní pryskyřice s přídavkem rozpouštědla pro reologické vlastnosti. Teplota vytvrzování inkoustových PTF rezistorů pro desky plošných spojů nesmí být vyšší než 180 °C, ale někteří výrobci nabízejí pasty s vytvrzovací teplotou až 220 °C. Tyto silnovrstvé rezistory poskytují mnohem širší rozsah plošného odporu než tenkovrstvé odporové materiály, ale jejich nevýhodou jsou menší odporové tolerance a stabilita. Oxidací mezi polymerem a mědí může mít za následek posun v hodnotách odporu a jsou náchylné k praskání v důsledku tepelné roztažnosti.

2.2 Materiály a konstrukce rezistorů

Tenkovrstvé rezistory jsou vyrobeny jako odporový materiál s použitím NiP v souladu s výrobními technologiemi. V této technologii se nejdříve vyrobí tenká vrstva slitiny nikl-fosforu, která se galvanicky nanese na měděnou fólii, které se říká RCM - rezistivní vodivý materiál. Nakonec z tohoto materiálu vznikne substrát s označením FR-4 (sklolaminátová epoxidová deska) s měděnými obvody a plošnými odpory.

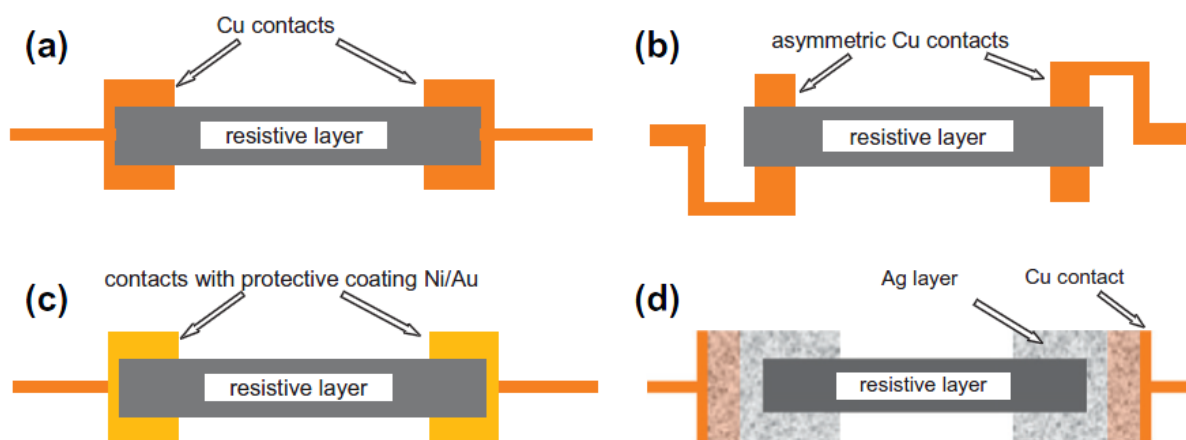
Ve studii výrobních a testovacích odporových prvků se zásadně podílí americká firma Ohmega s technologií Ohmega-Ply [4]. Vytvořili a odzkoušeli podle tabulkových předpokladů dva odporové materiály o plošné rezistivitě 25 Ω/\square a 100 Ω/\square , které poté nanесли na polymerní materiál FR-4. Jejich základní parametry jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Existuje několik typů konstrukcí pro kontaktní ukončení rezistivních materiálů. Jedná se především o Cu (měď), Cu v asymetrickém uspořádání, Ni/Au (nikl/zlato), a Ag (stří-

Typ materiálu	Tab. rezistivita (Ω/\square)	Tolerance (%)	Vrstva NiP (μm)	TKR (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	Odporový rozsah
R25	25	± 5	0,40	-50	od 40Ω do 680Ω
A100	100	± 5	0,10	-80	od 100Ω do 3300Ω

Tab. 2.1: Základní parametry tenkovrstvé technologie Ohmega-Ply. [4]

bro). K eliminaci mechanického namáhání se nejlépe hodí technologie kontaktování mědi v asymetrickém ukončení. Jako ochranná vrstva měděného povrchu slouží zbylé materiály: Ni/Au a Ag. Všechny typy konstrukcí jsou ilustrovány na Obr. 2.1.



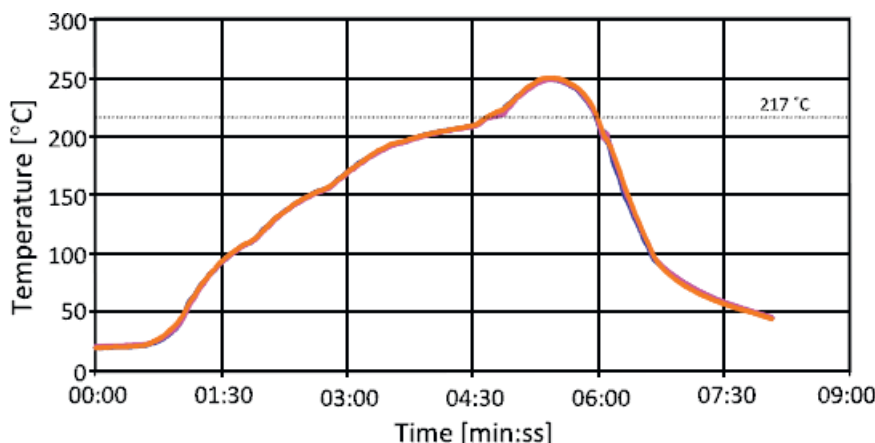
Obr. 2.1: Typy rezistivních kontaktů: a) Cu; b) asymetrická Cu; c) Cu s ochranou vrstvou Ni/Au; d) Cu s ochranou vrstvou Ag. [Převzato z [1]]

Tenkovrstvé a polymerní silnovrstvé obdélníkové rezistory byly navrženy ve třech provedeních, od šířky 1,5 mm do 0,5 mm. Rezistory byly vyrobeny v těchto geometrických útvarech: plošná dráha, multi-plošná dráha a meander. Zkušební deska T1 o rozměrech 160 x 160 mm obsahuje z technologie Ohmega-Ply 240 tenkovrstvých rezistivních struktur, které jsou laminované z obou stran s vnějšími vrstvami pryskyřice potažené měděnou fólií. Druhá zkušební deska T2 s rozměry 177 x 192 mm obsahuje 189 silnovrstvých rezistivních struktur nanesených sítotiskem na polymerní materiál FR-4.

2.3 Kontaktování rezistorů

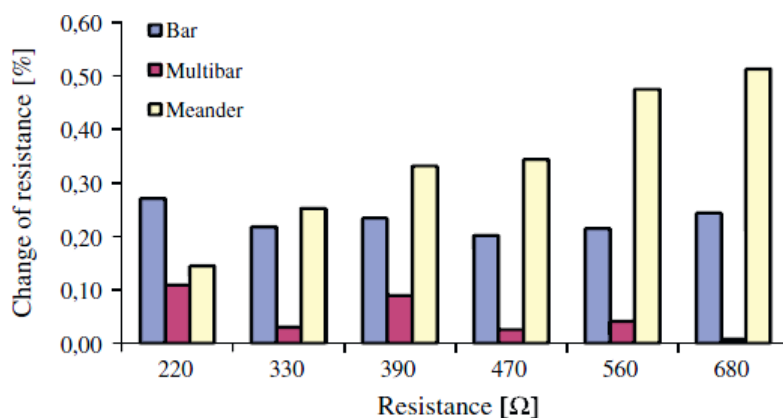
Integrované rezistory prošly dvakrát přes konvekční pás tepelné pece pro simulaci bezolovnatého pájení přetavením, aby určily hodnoty stability a tepelného namáhání. Proces se prováděl za použití časového a teplotního profilu SAC305 pájecí pasty. Maximální teplota povrchu DPS byla $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a doba tavení liquidu byla 76 s při $217\text{ }^{\circ}\text{C}$, Obr. 2.2. Testy byly

provedeny na čtyřech T1 deskách s tenkovrstvými rezistory (měření s 18 odpory na každé desce) a na šesti T2 deskách s rezistory PTF (měření se 40 odpory na každé desce).



Obr. 2.2: Použitý profil pro pájení přetavením. [Převzato z [1]]

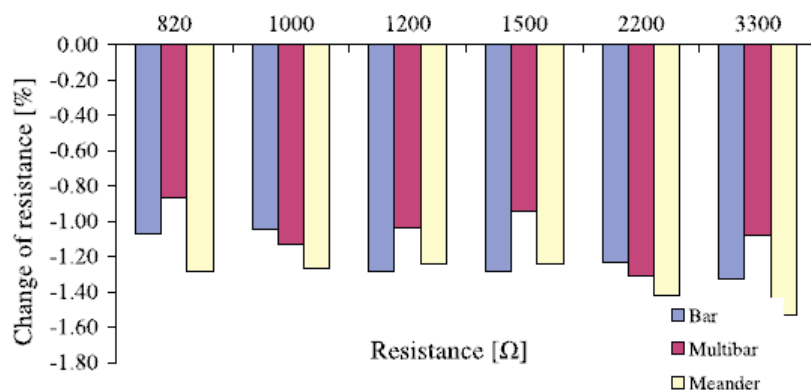
Odolnost testovaných rezistorů před a po pájení přetavením byla měřena čtyřbodovou digitální sondou Agilent 34401A. Měřící sondy byly připojeny na rezistory, které byly umístěny v montážních otvorech o průměru 800 μm . Pozorované změny v hodnotách odporu jsou uvedeny na Obr. 2.3 a Obr. 2.4. pro tenkovrstvé integrované odpory a na Obr. 2.5. pro polymerní silnovrstvé rezistory. Vysoká teplota pájení měla nezanedbatelný vliv na změny tenkovrstvých rezistorů a byl pozorován rezistivní drift jak pro kladné i záporné hodnoty parametrů v odporových vrstvách.



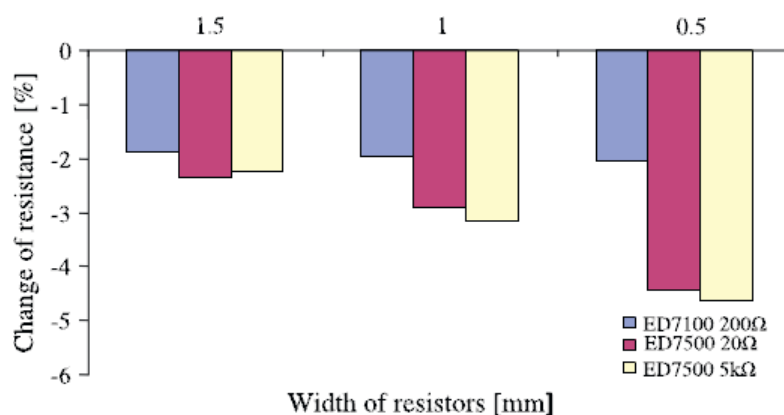
Obr. 2.3: Změna odporu v procesu pájení přetavením; rezistivní vrstva 25 Ω/\square . [Převzato z [1]]

Změny se pohybovaly v rozmezí od 0 % do 0,5 % pro odpory vyrobené z rezistivní vrstvy 25 Ω/\square a od 0 % do 1,6 % pro odpory z rezistivní vrstvy 100 Ω/\square . To naznačuje, že integrované tenkovrstvé rezistory, nezávisle na jejich tvaru, nejsou citlivé na pájení bez olova. Opakovaně prováděné měření integrovaných rezistorů v průběhu dalších experimentů potvrdily dosažené výsledky použití pájení přetavením bez použití olova.

Polymerní silnovrstvé rezistory, které měly holé měděné kontakty, ukázaly zcela odlišné chování od NiP rezistorů. Po testu pájení poklesl mírně jejich odpor v závislosti na šířce



Obr. 2.4: Změna odporu v procesu pájení přetavením; rezistivní vrstva $100 \Omega/\square$. [Převzato z [1]]



Obr. 2.5: Změna odporu v procesu pájení přetavením na rezistorech typu PTF v závislosti na typ inkoustu a šířky rezistivní vrstvy. [Převzato z [1]]

a typ pájecí pasty. Největší změny odporu nastaly na nejmenší šířce rezistorů (0,5 mm), kde odpor klesl až o 4 % oproti původní hodnotě, i když byla použita pájecí pasta s Ag výplní. Pro širší rezistory nebyly změny tolik patrné, hodnota odporu klesla o necelé 2 %, což se ukázalo jako maximální možná odchylka.

2.4 Testování rezistorů

Aby se mohlo docílit při vývoji a následné výrobě rezistorů co nejlepších fyzikálních vlastností, musí se od prvopočátku součástky testovat. Neprobíhají pouze základní testy, jako je měření rezistivity, ale také se klade důraz na klimatické i mechanické zkoušky. V této teoretické části se zaměřím na dvě univerzity ve Varšavě (Wrocław University of Technology)[1] a Hong Kongu (Hong Kong University of Science and Technology)[2], kde prováděli výzkum a následné testy s firmou Ohmega[4]. Základní rozdělení zkoušek pro rezistivní struktury jsou:

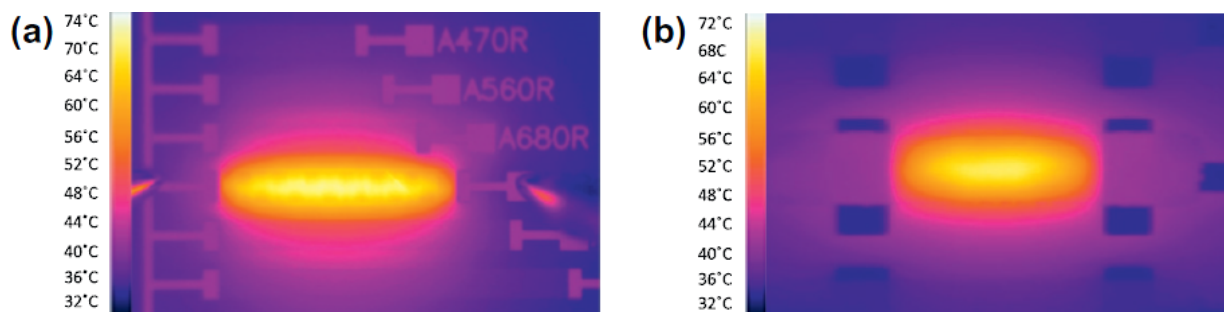
- selektivní testy
 - napěťové zatěžovací - vliv napětí na velikost rezistance

- proudové zatěžovací - vliv proudu na velikost rezistance
- měření V-A charakteristiky - míra hystereze, linearity
- TKR - teplotní závislost rezistance
- klimatické zkoušky - teplotní a vlhkostní závislost rezistance
- mechanické testy
 - ohybové (bend test)
 - oděrové - vliv oděru na velikost rezistance

Teplotní stabilita integrovaných odporů při provozu je kritickým faktorem pro úspěch rezistivních odporových technologií, kdy proud tekoucí přes odpor vytváří teplo, které se musí účinně odvádět skrz desku.

Odvod tepla, kdy proud tekl přes rezistor, byl zkoumán pomocí termokamery FLIR A320 s objektivem Closeup x2 a se stabilizátorem napětí HMP2020 HAMEG. Touto kamerou byly zřízeny následující parametry různých druhů záření: vyzařovací odporová vrstva, teplota okolí a relativní vlhkost vzduchu.

Termografy snímaly rozložení teplot na povrchu tenkovrstvých i silnovrstvých rezistorů všech druhů geometrického uspořádání. Příklady tepelných obrazců tenkovrstvých a silnovrstvých obdélníkových rezistorů ukazuje Obr. 2.6.



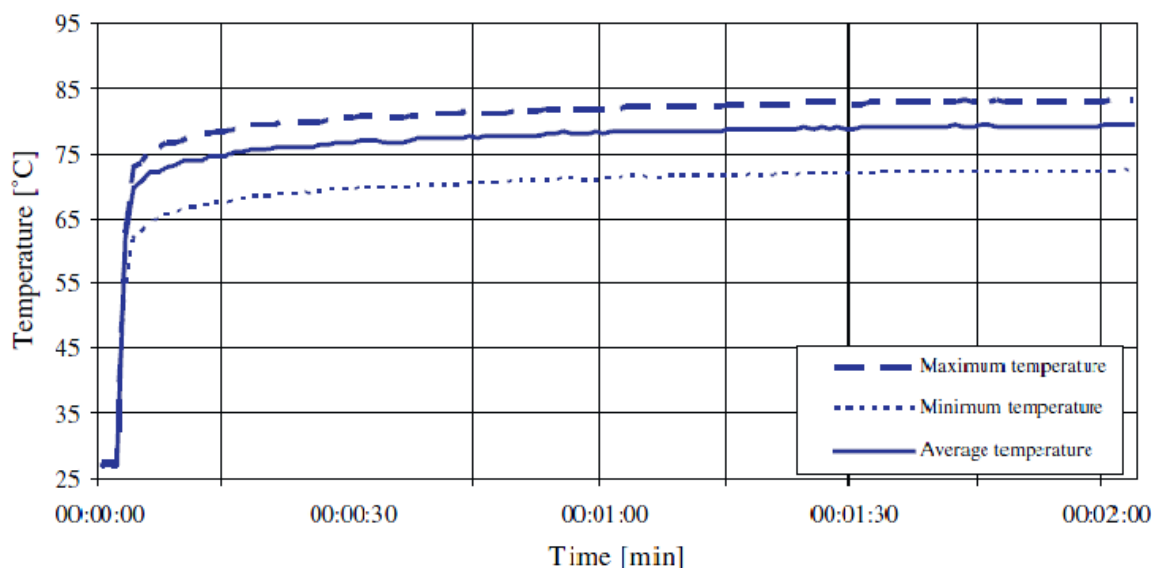
Obr. 2.6: Tepelné obrazce rezistorů 820Ω s připojením zdrojem proudu o velikosti 21 mA (dodávaný výkon 361 mW); a) tenkovrstvý rezistor; b) silnovrstvý rezistor. [Převzato z [1]]

Ve všech zaznamenaných tenkovrstvých rezistorech bylo zjištěno, že rozložení teploty podél odporu nebylo jednotné. Pro odpory ve tvaru souvislého pruhu se nacházely nejvyšší teploty v centrální části rezistoru. Bylo taktéž zaznamenáno, že teplo vyzařující skrz rezistor měnilo svůj charakter, protože procházející teplo v oblasti s vyšším stupněm teploty se střídalo s oblastmi s viditelně nižší teplotou. Proto můžeme vidět na obrázku "střídavý" charakter meandru pohybu tepla skrz rezistor (nejsvětější barva uprostřed rezistoru - teplota až $74 \text{ }^\circ\text{C}$). U okrajů rezistoru, v blízkosti měděných kontaktů, bylo jednoznačně lepší rozložení tepla.

V případě silnovrstvých odporů byly zaznamenány pravidelnější hodnoty teplot. Nejteplejší oblast byla ve střední části odporu. Teplota pak pravidelně klesala od střední části

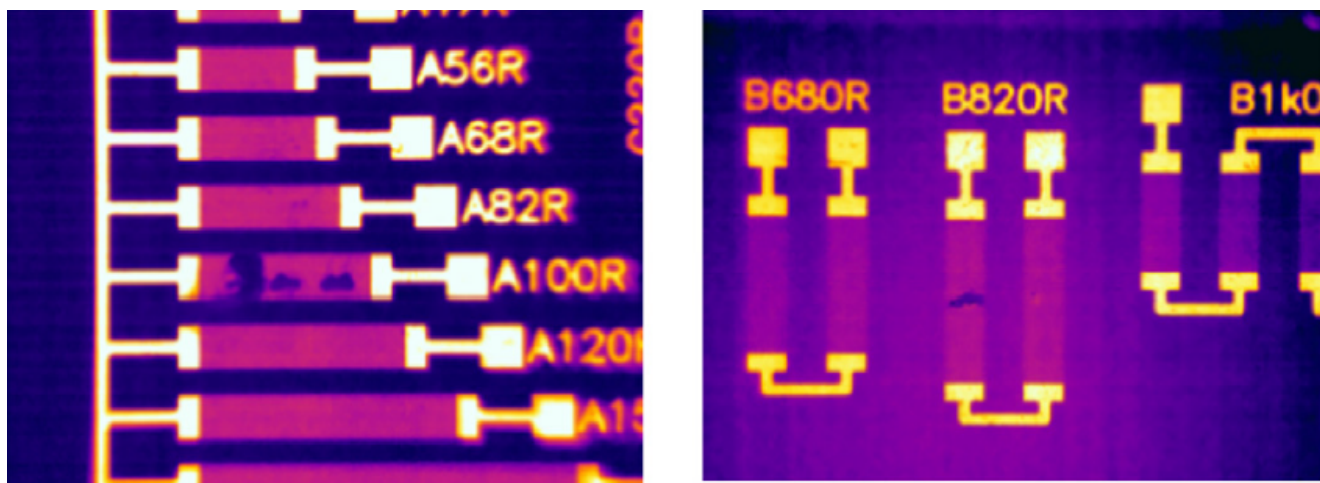
k okrajům rezistoru. Všechny tyto tepelné testy se uskutečnily na rezistorech o tloušťce $60 \mu\text{m}$.

Další příklad teploty povrchu rezistoru ukazuje Obr. 2.7, kde je znázorněn graf tenkovrstvého rezistoru. Během činnosti odporu se rychle zahřeje na průměrnou teplotu $78 \text{ }^\circ\text{C} \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$, kde tyto teplotní hodnoty znamenají zavedený standart a nepřekročily povolenou mez.

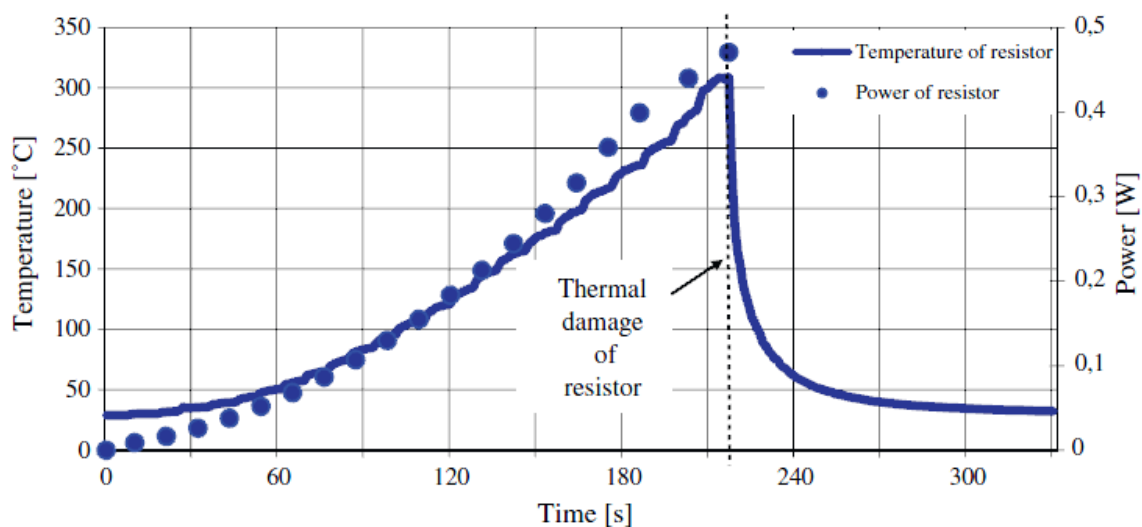


Obr. 2.7: Změny teploty na povrchu tenkovrstvého rezistoru 820Ω (šířka rezistoru 1 mm , rezistivní vrstva $100 \Omega/\square$). [Převzato z [1]]

Překročení přípustné hodnoty výkonu vede k nadměrnému zahřívání rezistorů a po dosažení pevnostní hranice dojde k jeho poškození. Termografy poškozených odporů výsledkem přehřátí jsou uvedeny na Obr. 2.8.



Obr. 2.8: Tepelný obraz tenkovrstvých rezistorů s viditelným poškozením (šířka rezistoru 1 mm). [Převzato z [1]]



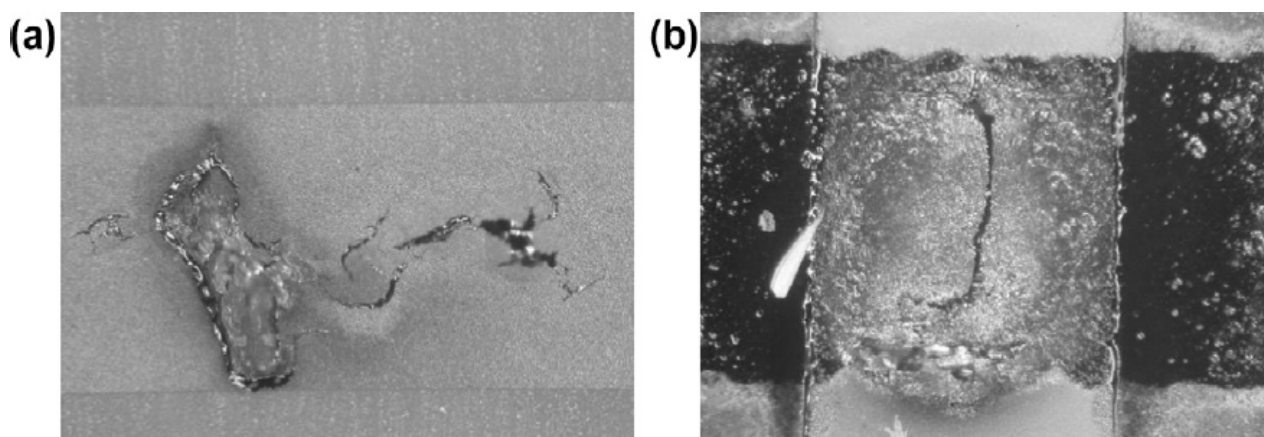
Obr. 2.9: Teploty a změny výkonu tenkovrstvého rezistoru 820 Ω vlivem rostoucího proudu.

[Převzato z [1]]

Příklady změn teplot měřených na těchto odporech jsou znázorněny na Obr. 2.9.

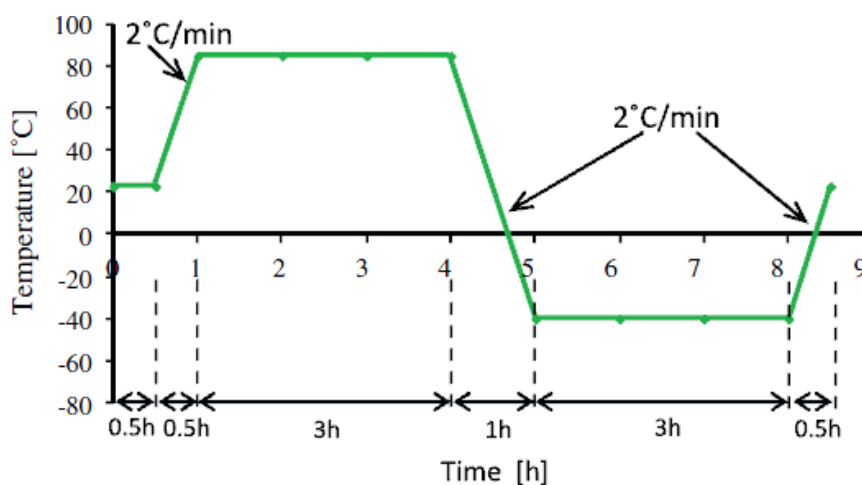
Teplota, na kterou mohou být rezistory maximálně zahřívány, a to díky nadměrnému elektrickému proudu, dosahuje až 300 °C. Tepelná akumulace, zejména v užších prostorech, je větší a docházelo ke zničení rezistorů - shořením. Ukázalo se, že různé druhy rezistorů měly různé tepelné škody. Závisí na typu odporu a jeho materiálu, zda může být využíván v tak vysokých teplotách.

Tepelné poškození tenkovrstvých NiP rezistorů bylo většinou způsobeno rozkladem pryskyřice ve FR-4 laminátu, na jehož povrchu byl odpor umístěn. Plyny vzniklé při tepelném rozkladu pryskyřice způsobily trhliny na povrchu odporu. V případě silnovrstvých rezistorů bylo zjištěno také tepelné poškození - degradace polymerního materiálu. Pod vlivem vysoké teploty protékajícím proudem se výrazně zvýšila teplota rezistoru a polymerní materiál začal hořet, což bylo patrné i viditelným okem jako světelný efekt (červeno-žlutá záře). Ilustrační obrázek je uveden na Obr. 2.10.



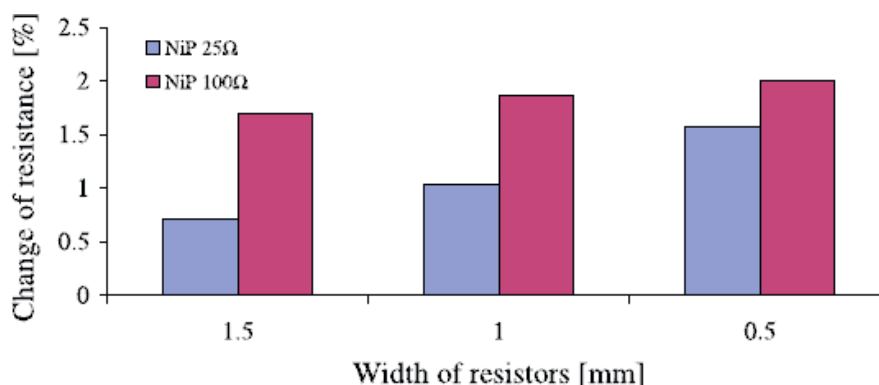
Obr. 2.10: Tepelné poškození: a) tenkovrstvý a b) silnovrstvý rezistor. [Převzato z [1]]

Pro stanovení citlivosti integrovaných rezistorů byly desky podrobeny 120 cyklům v klimatické komoře o teplotách mezi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Parametry jednoho cyklu jsou uvedeny na Obr. 2.11.



Obr. 2.11: Schéma teplotních parametrů cyklického testu. [Převzato z [1]]

Odpory integrovaných rezistorů byly měřeny před a po 120 cyklech. Procenta změny odporů způsobené cyklickou teplotou pro integrované rezistory ($25\ \Omega/\square$ a $100\ \Omega/\square$) jsou uvedeny na Obr. 2.12. a pro polymerní silnovrstvé rezistory na Obr. 2.13.

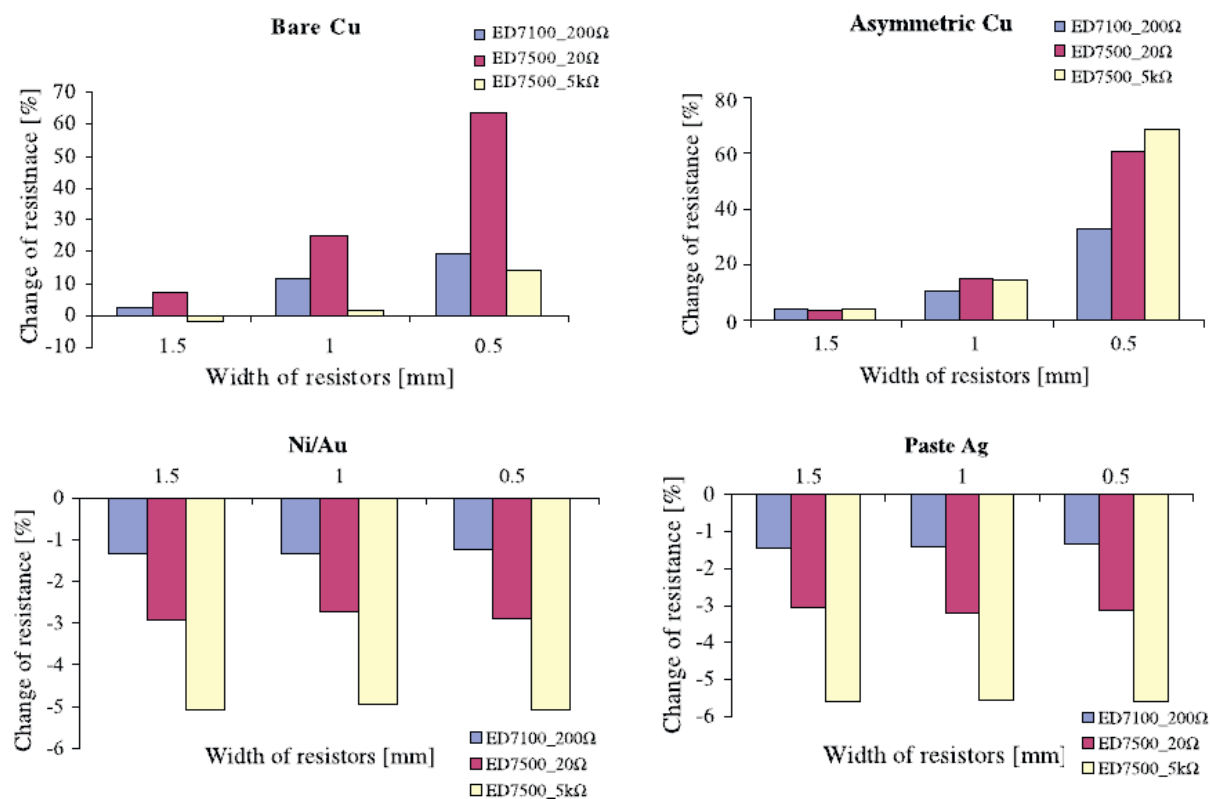


Obr. 2.12: Průměrná procentuální změna hodnot odporu po 120 teplotních cyklech pro tenkovrstvé rezistory NiP s rezistivní vrstvou $25\ \Omega/\square$ a $100\ \Omega/\square$. [Převzato z [1]]

Po 120 teplotních cyklech se odpor měnil od 0 % do 2 %, nezávisle na tloušťce vrstvy a NiP rezistivní šířce. Tyto hodnoty byly dosaženy i pro $0,1\ \mu\text{m}$ silnovrstvé rezistivní vrstvě a 0,5 mm šířky odporu. Obecně platí, že odpory s menší šířkou byly méně stabilní.

Polymerní silnovrstvé rezistory, např.: ED7500_20 Ω a ED7500_5k Ω , tištěné na holých měděných kontaktech měly výrazný nárůst odporu pro odporové šířky 1,0 mm a 0,5 mm. Pro rezistor typu ED7500_20 Ω nastal výrazný nárůst odporu o 24 %, respektive 50 %. Pro rezistory o velikosti šířky 1,5 mm bylo zvýšení hodnot odporu menší do 5 %.

Polymerní silnovrstvé rezistory s měděnými kontakty chráněných Ni/Au a Ag povrchy mají zcela odlišné chování než odpory přímo tištěných na holých měděných zakončeních.



Obr. 2.13: Průměrná procentuelní změna hodnot odporu po 120 teplotních cyklech pro odpory PTF vytištěných na jednotlivých kontaktních materiálech: holé Cu, asymetrické Cu, Ni/Au a Ag. |Převzato z [1]|

V těchto rezistorech, bez ohledu na velikost šířky, došlo po teplotních cyklech ke snížení hodnoty odporu, a to až o 6 %. Nejmenší změny hodnot odporu byly zaznamenány ze série ED7100_200Ω (bez Ag). Použití Ag nebo stříbrné pasty pro měděné zakončení výrazně zlepšilo odporovou stabilitu pro tepelné namáhání. Všechny druhy rezistorů a jejich hodnoty odporů jsou uvedeny v tabulce na Obr. 2.14.

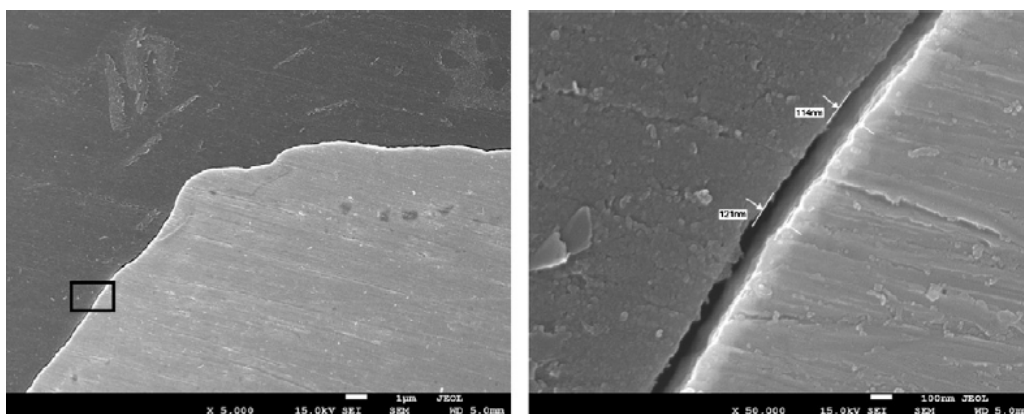
Resistance change (%)						
Type of resistor	Termination	Resistive material	Width of resistors (mm)			
			1.5	1.0	0.5	
Thin-film resistors	Cu	NiP 25 Ω/□	0.71	1.04	1.57	
	Cu	NiP 100 Ω/□	1.7	1.87	2.01	
Thick-film resistors	Cu contacts	ED7100 200 Ω/□	2.01	9.07	19.22	
		ED7500 20 Ω/□	5.61	23.99	49.86	
		ED7500 5 kΩ/□	-2.28	3.37	17.63	
	Asymmetric Cu contacts	ED7100 200 Ω/□	4.46	9.42	33.38	
		ED7500 20 Ω/□	3.03	18.81	66.86	
		ED7500 5 kΩ/□	0.85	8.07	55.97	
	Ni/Au contacts	ED7100 200 Ω/□	-1.35	-1.32	-1.24	
		ED7500 20 Ω/□	-2.97	-2.76	-2.78	
		ED7500 5 kΩ/□	-5.14	-4.85	-5.04	
	Ag contacts	ED7100 200 Ω/□	-1.47	-1.4	-1.18	
		ED7500 20 Ω/□	-3.09	-3.24	-3.22	
		ED7500 5 kΩ/□	-5.64	-5.51	-5.42	

Obr. 2.14: Velikosti odporů rezistorů v průběhu teplotních cyklů. |Převzato z [1]|

Poznatky získané z bezolovnatého pájení teplotní cyklické zkoušky prokázaly neshody mezi stabilitou tenkovrstvých a silnovrstvých polymerních rezistorů tištěných na desky plošných spojů.

Vysoká teplota bezolovnatého pájení má za následek zanedbatelné změny ve struktuře tenkovrstvých rezistorů. Nezávisle na jejich tvaru se mění hodnoty odporů v rozmezí od 0 % do 0,5 % pro odpory $25 \Omega/\square$ rezistivní vrstvy a od 0 % do 1,6 % pro odpory $100 \Omega/\square$ rezistivní vrstvy. Rozsah změn odporů bezolovnatého pájení ukazuje malý vliv na stabilitu tištěných tenkovrstvých rezistorů. Po simulaci procesu pájení silnovrstvých rezistivních struktur s měděnými koncovkami se ukázalo, že změny hodnot odporů jsou podstatně větší než u tenkovrstvých rezistorů. Tyto změny jsou hlavně dány velikostí šířky rezistorů a jejich typem inkoustu. Největší změny (o 4 %) byly prokázány na nejmenší šířce rezistorů (0,5 mm) včetně výplně Ag. Menší změny hodnot odporů (o 2 %) byly prokázány pro všechny rezistory potiskem uhlíkové pasty, bez ohledu na odporovou šířku.

Teplotní cyklická zkouška ukázala, že rezistivní rozhraní mezi filmem a holým Cu může být příčinou špatné stability polymerních silnovrstvých rezistorů. Bližší pozorování značný nárůst odporu, o 50 % a 70 % na 1,0 mm a 0,5 mm. Při použití koncových kontaktů s úpravou ponořením do Ni/Au nebo sítotiskem polymerní stříbrné pasty vedlo k mnohem lepší stabilitě polymerních silnovrstvých rezistorů. U odporových prvků s těmito typy koncových kontaktů došlo ke snížení odporu od -1 % do -5,5 %. Jako selhání při testu se ukázalo, že posun hodnot odporu větší/menší než 50 % vede k přerušení obvodu nebo zkratu. Při konstrukci se musí vzít v úvahu všechny varianty odporů, protože každý má rozdílné vlastnosti pro různé výrobní technologie. Ukázka prasklin po teplotním cyklickém testu ukazuje Obr. 2.15.



Obr. 2.15: Praskliny po teplotním cyklickém testu; zvětšení 5 000x a 50 000x. [Převzato z [1]]

V případě polymerních silnovrstvých rezistorů došlo k drastickému zvýšení hodnot odporů různou technologií zakončení, zapříčiněno chemickou interakcí mezi odporovým filmem a měděným materiálem. Dalším klíčovým problémem se stabilitou byla silná měděná fólie, která měla vliv na teplotu vytvrzování odporových materiálů, protože Cu převádí teplo na odpor tím, že ochlazením se rozpouští rozpouštědla. Odporová pasta má tendenci se držet na okrajích mědi. Pro relativně dlouhé odpory tvoří koncové části jen malou část celkového odporu oproti krátkým rezistorům. S ohledem do budoucnosti by se mělo zvážit a stanovit konstrukční pravidlo o maximální tloušťce měděné fólie, 10 - 14 μm .

Uvedené výsledky ukazují, že je důležité chránit u rezistorů zakončení kontaktů Cu přechodovou vrstvou Ni/Au nebo vrstvou Ag mezi měď a odporovou fólií. Použití této technologie má za následek podstatně více stabilní rezistory, protože tyto ochranné vrstvy snižují mezifázovou oxidaci, v horších případech korozi na rozhraní Cu/carbon.

3

Organický vodivý materiál PEDOT:PSS

V posledních letech vývoje tištěné a organické elektroniky se podařilo dosáhnout vytvoření nových dosud neobjevených možností při vývoji součástek budoucnosti. Hlavním reprezentantem této technologie jsou OLED displeje. K vytvoření těchto moderních komponentů je potřeba organický vodivý materiál, který je na vzestupu a v budoucnu by mohl částečně doplnit současné konvenční technologické procesy. PEDOT:PSS je polymer budoucnosti.

3.1 Základní informace

Za účelem vytvoření elektronických modulů, jako jsou organické fotovoltaické články, organické diody nebo organické tenkovrstvé tranzistory, je nutné použít i pasivní součástky: rezistory, kondenzátory nebo cívky. Vzhledem k přirozenému omezení rozsahu teplot a tepelné stability se využívá právě organická vodivá látka PEDOT:PSS, kde složení této látky je odvozeno z polythiofenu. PEDOT:PSS patří mezi nejúspěšnější polymery pro komerční použití. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří vysoká stabilita v jeho p-dotované formě, vysoká vodivost, dobré filmotvorné vlastnosti a vynikající transparentnost v dopovaném stavu.

Je velmi obtížné produkovat dobré filmotvorné vlastnosti PEDOT. Což je tedy důvod, proč se PEDOT fólie vyrábí obvykle v dotovaném stavu. Samostatně je totiž nerozpustitelný ve všech běžných rozpouštědlech a je velmi nestabilní v neutrálním stavu - na vzduchu rychle oxiduje. Oxidace polymeru drasticky snižuje hodnoty vodivosti a může dojít až ke degradaci polymeru.

PEDOT lze polymerovat chemickými prostředky. Chemická polymerace PEDOT může být provedena tak, že se ponoří EDOT do polyelektrolytu s přítomností oxidačního činidla. Nejběžnější používaný elektrolyt je kyselina polystyrenesulfonik (PSS), která má za následek ve vodné disperzi vytvoření PEDOT:PSS. Tato polymerní směs se ukázala jako

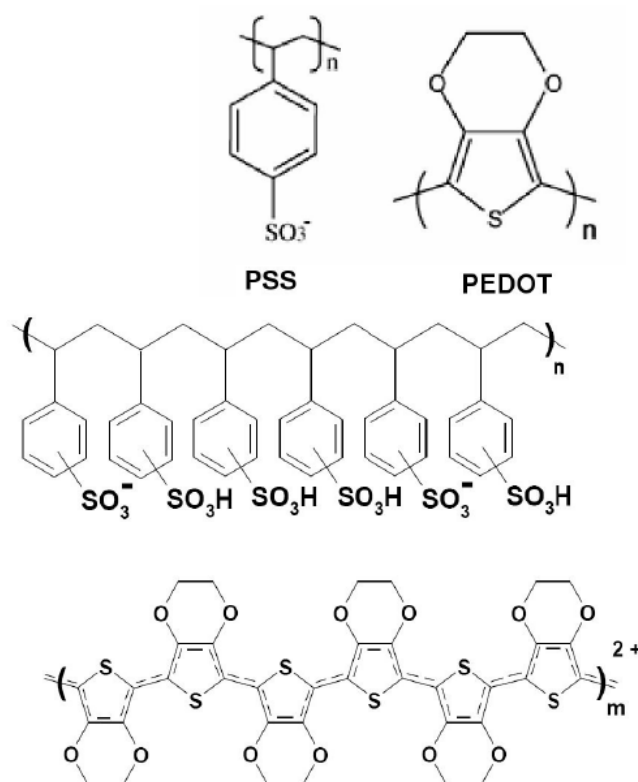
nejstabilnější polymerní systém, který lze snadno zpracovávat. V této disperze je PEDOT ve svém oxidovaném stavu.

I přesto, že se intenzivně studují organické vodivé materiály, nachází se mezery mezi konkrétními aplikacemi. Datové listy od výrobců PEDOT:PSS nemají v některých případech velmi jasné hodnoty o vlastnostech vrstev. V budoucnosti se určité najdou přesná pravidla pro navrhování a formulování těchto problémů.

3.2 Složení a použití materiálu

Existuje mnoho zpráv z poslední doby, kde se využívá PEDOT:PSS, derivát polythiofenu v různých oblastech. Aplikací tohoto polymeru jsou např. odporové vrstvy, vrstvy v kondenzátorech, antistatické vrstvy na katodách, vodivé dráhy na deskách plošných spojů a vodiče v různých displejích.

V závislosti na obsahu PSS v komplexu polymeru matice se může vodivost měnit od 10^{-3} S/cm pro poměr PEDOT:PSS 1:20 až do 1 S/cm pro poměr 1:2,5. Přesná chemická struktura PEDOT:PSS je znázorněna na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Chemická struktura poly(3,4-ethylenedioxythiophen) - poly(styrenesulfonik).

[Převzato z [5]]

PSS jako část celku obsahuje dvě funkce. První z nich je, zabránit oxidaci monomeru, s cílem získat požadované polymerní řetězce. Další úlohou PSS je udržet řetězovou strukturu PEDOT v disperzní formě vodného roztoku, jehož charakteristická barva je tmavě modrá.

Příkladem typických vlastností v závislosti na poměru PEDOT:PSS jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Poměr PEDOT:PSS	Obsah pevných částic (%)	Konduktivita (S/cm)	Aplikace
1:25	1,3	1	Antistatická vrstva pro CRT
1:6	1,5	10^{-3}	Materiály pro OLED
1:20	3	10^{-5}	Vodivá dráha v OLED

Tab. 3.1: Příklady charakteristik PEDOT v závislosti na poměru dopování PSS. [1]

Jak může být z tabulky patrné, zvyšování obsahu PSS bude omezovat elektrickou vodivost. Toho se nejvíce využívá v tištěných vodivých drahách zobrazovací technologie OLED. Makroskopická struktura PEDOT:PSS je ve formě aglomerátu částic a v podstatě tvoří síťovou strukturu obtékajících polymerů. Částice se skládají z 90 až 95 % vody. PEDOT:PSS má vynikající filmotvorné vlastnosti a je snadno zpracovatelný. Pro antistatickou vrstvu musí být nízký obsah PSS, aby se docílilo nejvyšší elektrické vodivosti. Materiály pro OLED vyžadují malé částice a nižší vodivost. Pro zobrazovací techniku s maticí musí být zvýšena hodnota PSS, která redukuje elektrickou vodivost. Obsahový poměr PEDOT ku PSS ve filmech silně ovlivňuje elektrickou vodivost a odpor vrstvy. Čím je větší obsah PEDOT, tím je větší elektrická vodivost.

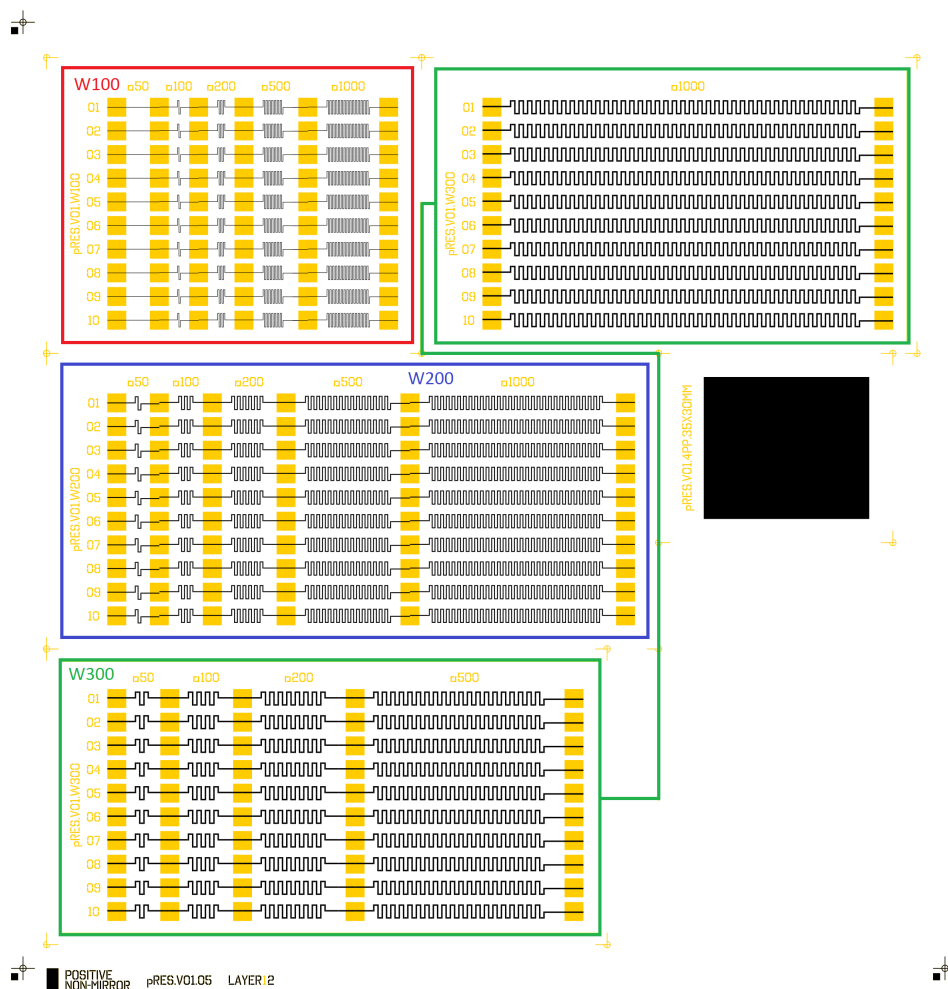
3.3 Aplikace

Pro výzkum testování vodivého organického materiálu se vytvořili tištěné organické rezistory, které budou testovány v praktické části.

Výroba tištěných rezistivních struktur probíhala s podporou Technologické agentury České republiky v rámci projektu FLEXPRINT (TE01020022), kde se pro Západočeskou univerzitu v Plzni vyrobily tři fólie potištěných rezistivními strukturami (Obr. 3.2). Každá ze tří fólií rezistorů byla stejné šířky vodivého polymeru PEDOT:PSS zakončená kontaktní destičkou. Už při první manipulaci a měření se objevily chyby sítotisku (Obr. 3.3), kde některé dráhy polymerních rezistorů obsahovaly neucelené jednotvárné tvary drah.

PEDOT:PSS je také díky své transparentnosti ve viditelné části spektra ideálním kandidátem pro přípravu organických fotovoltaických článků, kde se pro lepší vodivost polymeru smíchá s nanočásticemi ZnO. PEDOT:PSS také zvyšuje výkon organických fotovoltaických článků, kde usnadňuje dopravu děr mezi anodou a aktivní vrstvou [16].

V posledních letech došlo také k velké revoluci u organických tranzistorů řízené polem (OFET), které se využívají v integrovaných obvodech a flexibilní elektronice. Výsledný tranzistor na bázi PEDOT:PSS potažený zlatou vrstvou na konci elektrod má snížený kontaktní odpor a zlepšenou krystalinitu, která má za následek snižování velikosti bariéry

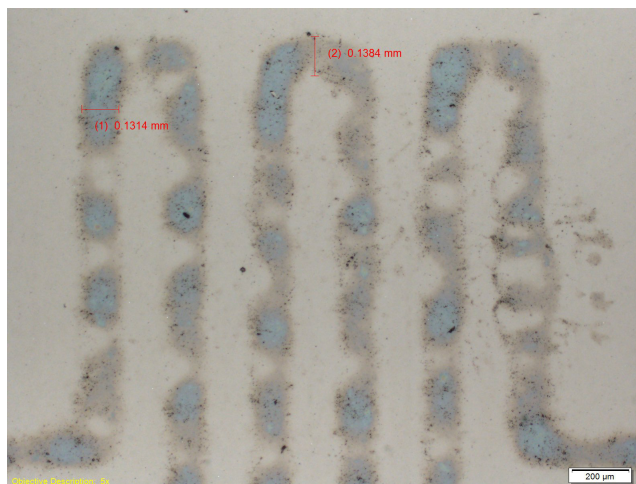


Obr. 3.2: Ukázka topologie vyrobené fólie tištěných rezistivních struktur podle velikosti šířky a efektivní délky PEDOT:PSS.

mezi energetickými hladinami. Pro názorný příklad byl vytvořen v Pohang University of Science and Technology OFET tranzistor PEDOT:PSS, který má sníženou velikost bariéry mezi energetickými hladinami z 0,85 na 0,14 eV a zvýšený účinek pole z 0,031 na 0,218 cm^2/V [15].

Další aplikací vytvořenou pomocí organické elektroniky je již zmíněná technologie OLED. OLED je typ displeje využívající technologii organických elektroluminiscenčních diod. Mezi průhlednou anodou a kovovou katodou je několik vrstev organické látky. Jsou to vrstvy vypuzující díry, přenášející díry, vyzařovací vrstva a vrstva přenášející elektrony. V momentě, kdy je do některého políčka přivedeno napětí, jsou vyvolány kladné a záporné náboje, které se spojují ve vyzařovací vrstvě a tím produkují světelné záření. Struktura a použité elektrody jsou uzpůsobeny tak, aby docházelo k maximálnímu střetávání nábojů ve vyzařovací vrstvě. Proto má světlo dostatečnou intenzitu. Existují dva základní druhy, displeje s pasivní maticí (PMOLED - Passive Matrix Organic Light Emitting Diode) a displeje s aktivní maticí (AMOLED - Active Matrix Organic Light Emitting Diode).

Další aplikací na vzestupu jsou dotykové polymerní obrazovky, které zkoumá firma Ko-



Obr. 3.3: Detailní náhled na tištěnou strukturu rezistoru. Na obrázku je taktéž patrná chyba v drahách při výrobě sítotiskem.

dak [19]. Dotykové obrazovky obsahují v sobě indium oxidu cínu, který je velmi nákladný na výrobu. Proto se firma Kodak rozhodla investovat do vývoje vodivých polymerních materiálů a vytvořili první prototypy dotykové obrazovky z PEDOT:PSS. Takto vyrobené dotykové obrazovky se mohou nacházet díky své ohebnosti i na zaoblených místech, jako jsou rohy domů nebo palubní desky v automobilech.

4

Elektrické vlastnosti tištěných rezistorů

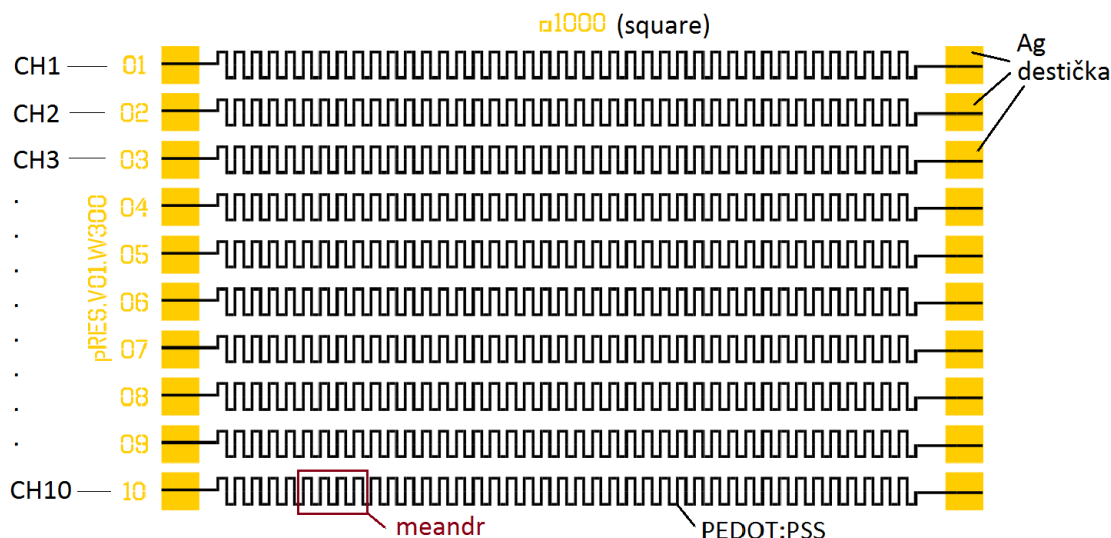
V této kapitole se zaměřím na elektrické vlastnosti tištěných rezistorů. Ke své práci využiji a proměřím parametry rezistorů na bázi PEDOT:PSS. Využíval jsem také poznatků z teoretické části Testování rezistorů. Pro svoji praktickou práci jsem zvolil měření čtyř nejdůležitějších testů: specifické rezistance, V-A charakteristiky, teplotní závislosti rezistance a proudové zatěžování. Při zjišťování konečných hodnot jsem postupoval od nejméně k nejvíce destruktivním měřením.

4.1 Metodika měření

Kapitola popisuje metody měření a použité přístroje ke zpracování dat praktické části. Kapitola je také zaměřena na vysvětlení pojmů před samotným testováním.

4.1.1 Struktury tištěných vzorků

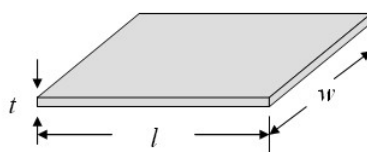
Tištěné rezistory jsou rozděleny podle vodivého polymeru PEDOT:PSS na mnou označené PEDOT1 a PEDOT2, dále do tří skupin podle velikosti tištěné šířky, kde $w = 100 \mu\text{m}$ (W100), $w = 200 \mu\text{m}$ (W200) a $w = 300 \mu\text{m}$ (W300). Každá skupina rezistorů je dále rozdělena do pěti skupin podle efektivní délky: $\square 50$, $\square 100$, $\square 200$, $\square 500$ a $\square 1000$. Celá jedna sada obsahuje deset tištěných rezistorů: CH1 až CH10, celkově tedy 150 rezistorů rozdělených na třech fóliích podle velikosti šířky. Každá skupina rezistorů - W100, W200 a W300 je dopována jinou příměsí PSS. Každý jednotlivý rezistor je zakončen stříbrnou kontaktní destičkou na každém konci, který zároveň odděluje rezistory od sebe. Obrázek topologie je demonstrován v kapitole PEDOT:PSS Obr. 3.9. Detailní náhled na vodivý polymer PEDOT:PSS je na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Detailní obrázek tištěných rezistorů PEDOT:PSS se šířkou W300 s počtem čtverců $\square 1000$.

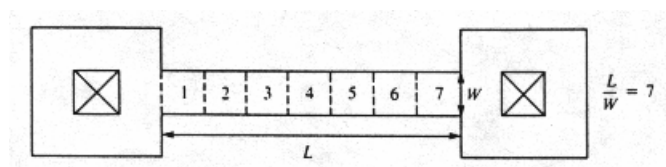
4.1.2 Plošný odpor

Plošný odpor je míra odporu tenkovrstvých a silnovrstvých filmů, které jsou nominálně jednotné velikosti - $L = W$ (délka = šířka).



Obr. 4.2: Ilustrace plošné rezistance. [18]

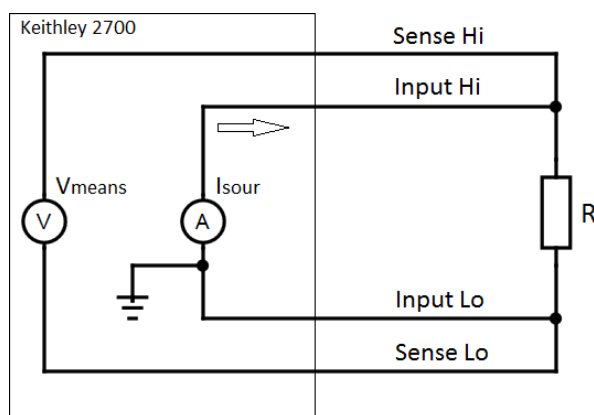
Například výraz $\square 100$ udává, že jeden tištěný rezistor PEDOT:PSS byl "složen" do tvaru meandru ze 100 čtverců o stejné plošné rezistivitě. Je-li rezistance těchto odporů například $50 \Omega/\square$, pak celkový odpor bude mít hodnotu $100 \cdot 50 = 5000 \Omega$. Ilustrační obrázek (Obr. 4.2) ukazuje, že pro vytvoření rezistivní struktury bylo použito 7 identických plošných odporů, kde $L = 7W$. Hodnota jednoho odporu je $100 \Omega/\square$, výsledný celkový odpor bude mít hodnotu $7 \cdot 100 = 700 \Omega$.



Obr. 4.3: Tištěný rezistor "sestavený" z plošných odporů. [18]

4.1.3 4-vodičové měření

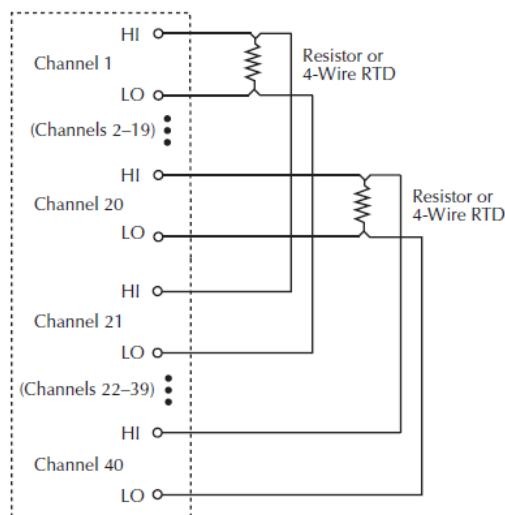
Testování probíhalo formou 4-vodičového měření odporu (Ω 4). Schéma vnitřního zapojení v multimetru Keithley ukazuje Obr. 4.4. Pro použití Ω 4 měření jsou zapotřebí čtyři propojené vodiče, které vylučují vliv úbytku napětí na vnějších (proudových) svorkách. Tento úbytek napětí je způsoben přechodovým odporem těchto svorek a procházejícím proudem. Proud teče přes zdrojové vedení Input Hi/Lo a úbytek napětí na rezistoru se měří na vnitřními propojenými body Sense Hi/Lo. Bylo nutné také co nejvíce eliminovat vliv termoelektrických napětí na propojovacích svorkách volbou vhodného spojovacího materiálu, udržováním konstantní teploty a měření hodnoty rezistoru při obou polaritách proudu. Čtyřvodičové připojení rezistorů se užívá z toho důvodu, aby se eliminoval vliv odporu dlouhých přívodních kabelů.



Obr. 4.4: Schéma 4-vodičového zapojení pro měření specifické rezistance a teplotní závislosti rezistance.

4.1.4 Měřicí přístroje

Měření probíhala na elektrických přístrojích značky Keithley 2700 a 2636A. Keithley 2700 vyniká svojí přesností nastavení měření a programovým ovládáním díky rozdělení digitální části multimetru a systému relé, který je dodáván samostatně na multiplexovací kartě. Nejvíce využití probíhalo s připojením multiplexovací karty (MPK) 7708 od stejné společnosti. Propojením těchto zařízení se využilo pro měření specifické rezistance, teplotní závislosti rezistance a proudovému zatěžování. Reprezentativní obrázek zapojení uvnitř karty ukazuje Obr. 4.5. Zapojení bylo následující: kanály Channel1 Hi/Lo až Channel10 Hi/Lo v multiplexovací kartě se propojily s přípravkem přesně popsáním v kapitole Specifická rezistance tak, aby každý jednotlivý rezistor byl propojen čtyřmi vodiči. Tedy, MPK 7708 Channel1 propojený s tištěným rezistorem CH1, MPK 7708 Channel2 propojený s tištěným rezistorem CH2 atd. Toto zapojení jsem využil při testování specifické rezistance a teplotní závislosti rezistance. Pro měření V-A charakteristiky jsem využil Keithley636A, protože tento multimetr má již zabudovaný V-A pulsní generátor s velkým rozsahem dynamických hodnot od 1 fA do 50 A a od 1 μ V do 200 V.



Obr. 4.5: Schéma zapojení v multiplexovací kartě 7708 pro měření 4-vodičovou metodou.

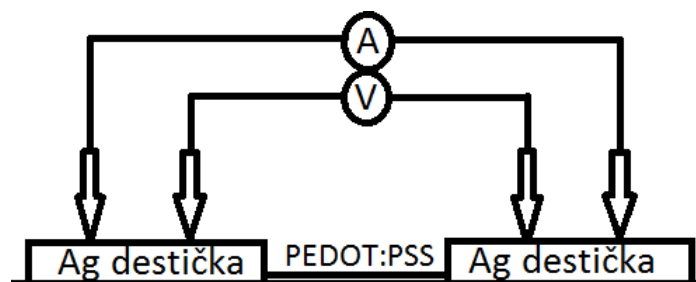
Pro měření teplotní závislosti odporu musím zmínit také horkovzdušnou pec Memmert UFP400, do které byly vloženy vzorky propojené s měřícím přípravkem Keithley 2700 a MPK 7708. Měření a odečítání hodnot teplot probíhalo pomocí platinového teplotního čidla PT1000, kde rozsah teplot od -50 do 500 °C byl plně dostačující. Zapojení všech přístrojů probíhalo formou již zmíněnou metodou 4-vodičového propojení.

4.2 Specifická rezistance

Pro měření specifické rezistance, i u všech dalších měření, jsem využil tištěných vzorků, které jsem popisoval v kapitolách PEDOT:PSS a Metodika měření. Specifická rezistance je jednou z důležitých elektrických vlastností rezistorů, neboť nám udává jeho specifickou hodnotu odporu. Pro lepší a názornější představu těchto hodnot je lepší k prezentaci výsledků využít plošné rezistivity, kde plošná rezistivita vychází ze specifické rezistance, ale zahrnuje v sobě plochu - počet čtverců, ze kterých je konečný tištěný rezistor složen. Konečné hodnoty viditelné v grafu jsou přepočteny na jednotku délky, v tomto případě plošného čtverce.

Měření probíhalo na laboratorním multimetru Keithley 2700. Zapojení a odečítání hodnot probíhalo formou 4-bodového měření, aby se zabránilo offsetu při malých hodnotách odporu a docílilo se velmi přesného výsledku. Samotný multimetr a multiplexovací karta byly programově nastaveny a přes PC probíhalo odečítání hodnot pomocí programu Excelinx, nadstavbou klasického Excelu. Princip 4-bodového měření pro tento účel je takový, že dvojicí hrotů přiložených na stříbrných kontaktních ploškách mezi rezistory prochází signál přes Input Hi/Lo a Sense Hi/Lo. Multiplexovací karta přepíná mezi kanály pomocí vytvořeného programu a multimetr odečítá hodnoty rezistance.

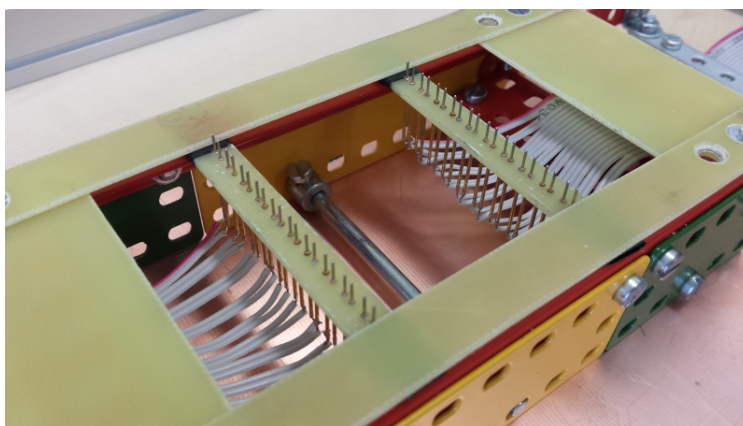
Před prvním měřením se provedly testy celého měřícího systému. Objevené chyby na kontaktech byly odstraněny. Ověření funkčnosti systému proběhlo tak, že se změřily



Obr. 4.6: Schéma zapojení přípravku s hroty pro měření specifické rezistance metodou 4-vodičového měření.

hodnoty naprázdno a nakrátko. Provedl se také test jednotlivých kanálů pomocí jmenovité hodnoty rezistoru 7500Ω a zjistilo se, že výsledky měření ukazovaly hodnotu průměrně $7495,4\Omega$, což odpovídá své třídě toleranci rezistoru. Testovací systém byl úspěšně nastaven a odměřen.

Tištěné rezistivní struktury označené PEDOT1 a PEDOT2 byly otestovány pomocí speciálního přípravku s odpruženými hroty (Obr. 4.7), které se přesně nastavily na určitou sadu deseti exemplářích rezistivních struktur na pozici kontaktních plošek, CH1 až CH10. Nejprve se změřily struktury PEDOT1 po deseti měřeních pro deset sad natištěných struktur na třech fóliích, se šířkou W100, W200 a W300, od efektivní šířky $\square 50$, $\square 100$, $\square 200$, $\square 500$ a $\square 1000$.



Obr. 4.7: Přípravek pro měření tištěných rezistivních struktur pomocí 4-bodového měření. Pro různé vzdálenosti se nastavovaly hroty manuálně po vodících lištách.

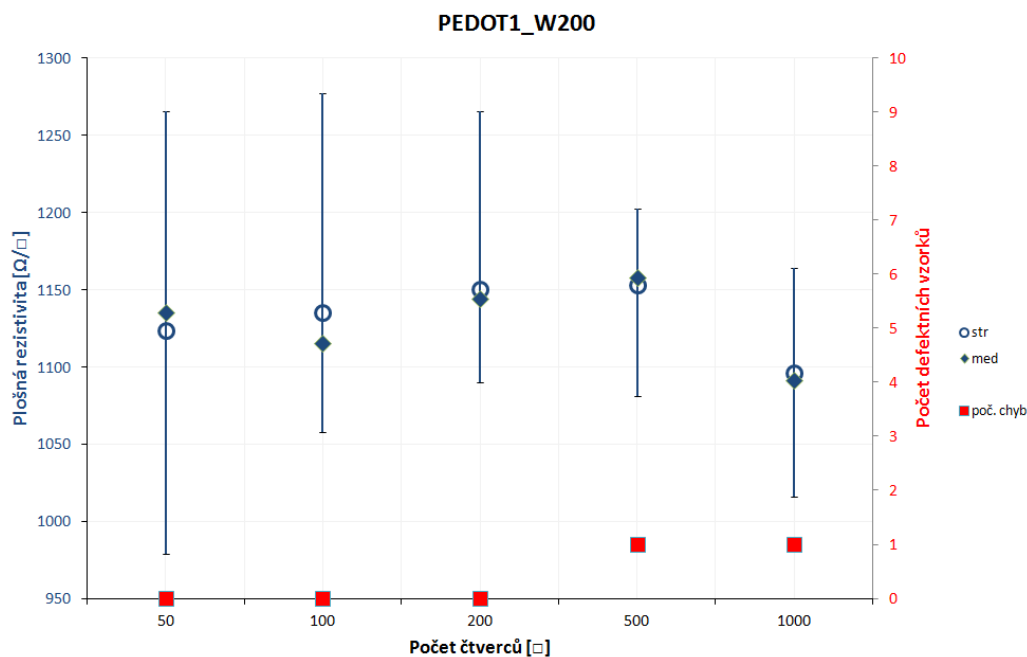
Výsledkem měření je graf (Obr. 4.8.), který ukazuje velikost plošné rezistivity (R_s) přepočítanou z jmenovité velikosti hodnot odporu dané sady (R). Vzorec pro výpočet plošné rezistivity ze specifické rezistance je:

$$R_s = \frac{R}{L/W} \quad [\Omega/\square], \quad (4.1)$$

kde poměr L/W udává počet čtverců dané sady rezistorů.

Do grafu jsou zahrnuty hodnoty v rozpětí minimálních a maximálních hodnot velikosti

plošné rezistivity dané sady, hodnoty velikosti mediánu, střední hodnoty a počet chyb jednotlivých rezistorů dané sady.



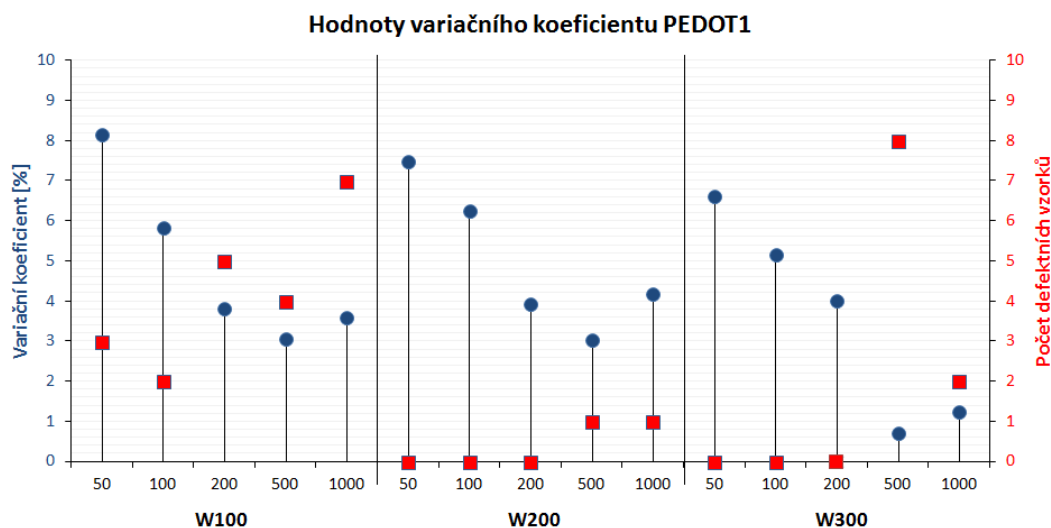
Obr. 4.8: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnutý jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtu defektních vzorků.

Výsledný graf ukazuje, že tyto testovací vzorky měly velmi malou chybovost, která je pro další testování elektrických vlastností velmi důležitá. Velikost specifické rezistance u vzorků s $\square 500$ mají nejmenší rozpětí. Pokud bychom hodnotily oba faktory, počet defektních vzorků i rozpětí specifické rezistance, tak nejlepší volbou by byly vzorky s $\square 200$. Další grafy popisující dané téma jsou v sekci Přílohy.

4.2.1 Variační koeficient

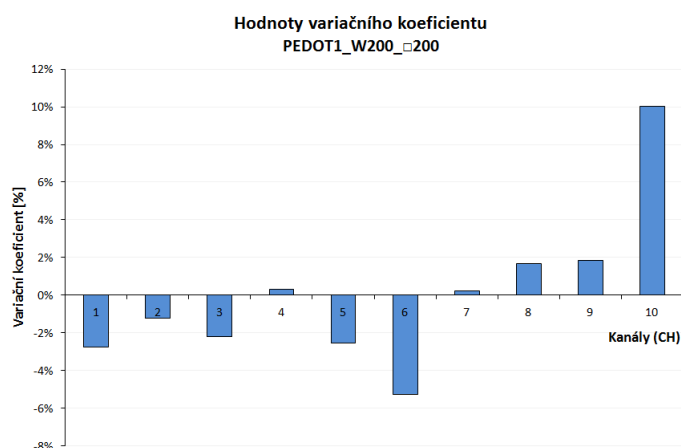
Pro další budoucí testování elektrických vlastností využijí vzorky, které prošly testováním jejich specifické rezistance. K tomuto účelu byly posouzeny jak vzorky od nejnižších hodnot defektních vzorků, tak vzorky podle nejlepších výsledků procentuálních odchylek rezistance oproti střední hodnotě rezistance dané sady. Výpočet se prováděl pomocí variačního koeficientu, který je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny a je dán poměrem směrodatné odchylky a absolutní hodnoty střední hodnoty. Příklad grafu výpočtu variačního koeficientu ukazuje Obr. 4.9 Další exemplární grafy jsou uvedeny v sekci Přílohy.

Souhrnný graf 4.9 ukazuje hodnoty variačních koeficientů a počty defektních vzorků celé skupiny vzorků označovanou jako PEDOT1. Pro další fázi měření se vybrali vzorky s nejmenším počtem defektních vzorků společně s hodnotami variačního koeficientu. Z cel-



Obr. 4.9: Graf znázorňující velikost variačních koeficientů rezistivních struktur PEDOT1 s důrazem na jejich chybovost při měření specifické rezistance.

kového grafu se vytvořil detailní graf pouze s vybranou sadou vzorků - PEDOT1_W200_□200. Tento graf je vidět na Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W200_□200.

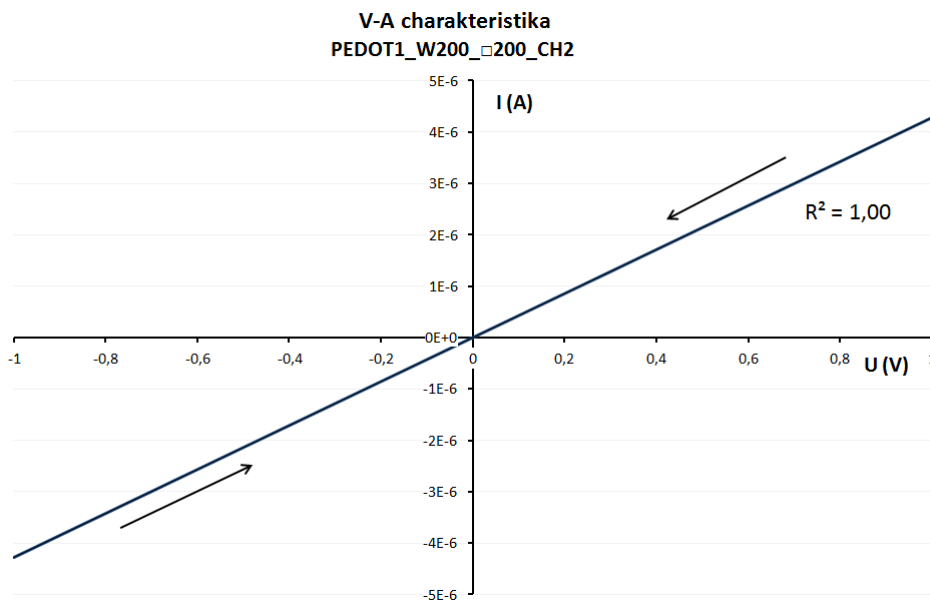
Z grafu hodnot variačního koeficientu dané sady je vidět, že nejmenší procentuální odchylku oproti střední hodnotě mají vzorky na kanálech CH2, CH4 a CH7.

4.3 V-A charakteristika

V-A charakteristika je důležitá elektrická vlastnost a určuje velikost procházejícího proudu skrze tíštěný rezistor při daném napětí. K měření byla využita SMU jednotka Keithley 2636A. Využito bylo jednobodové zapojení SENSE Hi-A - Hi-A a SENSE Lo-A - Lo-A, které bylo dostačující pro 4-bodové měření. Měření bylo programově řízeno přes software ACS Basic, ve kterém se nadefinoval typ měření V-A charakteristiky od počáteční hodnoty

napětí -1 V po 1 V a zpět na -1 V s krokem 50 mV.

Jako nejlepší exemplární vzorky pro tento typ měření jsou tíštěné rezistory: PEDOT1 s W200/□200 - CH2, CH4, CH7; W300/□200 - CH2, CH7, CH8 a PEDOT2 s W200/□200 - CH3, CH5, CH9; W300/□100 - CH5, CH6, CH7.



Obr. 4.11: V-A charakteristika CH2 sady se šířkou W300 a počtem čtverců □200 vyjadřující naprosto přesný lineární průběh V-A charakteristiky.

Z grafu je patrné, že V-A charakteristika daného vzorku má přesný lineární průběh V-A charakteristiky. Hodnota spolehlivosti R^2 dané charakteristiky se rovná jedné.

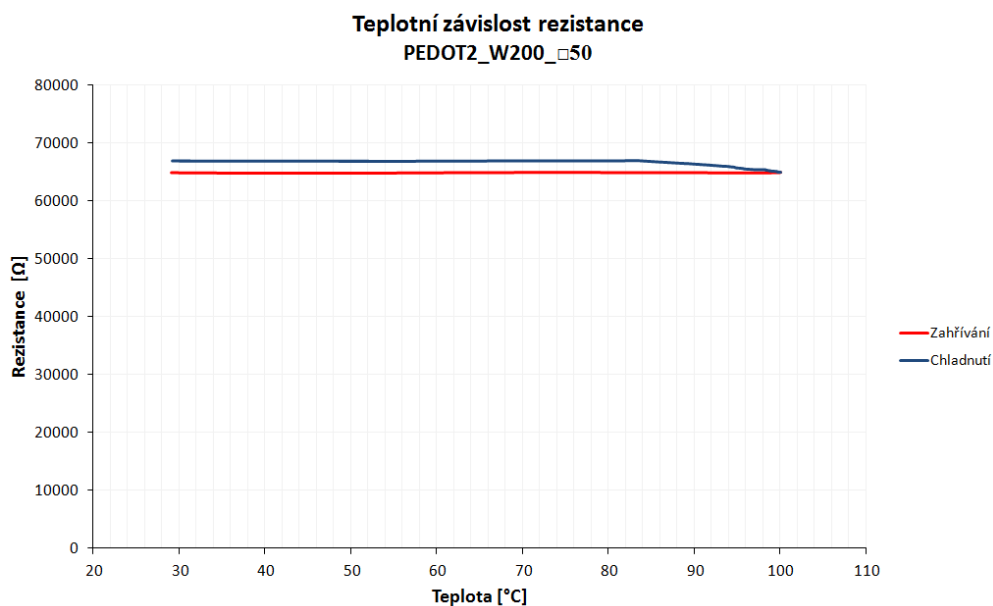
4.4 Teplotní závislost rezistance

Další nedílnou součástí testování elektrických vlastností rezistorů je jejich teplotní závislost, vyjadřující závislost rezistivity na teplotě. Ve studii zkoumání teplotní závislosti se vycházelo z kapitoly Testy s rezistory. Byly využity dvě testovací struktury; PEDOT1 W300/□100 a PEDOT2 W100/□50 díky své rozličnosti velikosti šířky a jejich variačním koeficientem. Měření probíhalo na laboratorním multimetru Keithley 2700 společně s multiplexovací kartou 7708 metodou 4-bodového měření odporů. Kanály CH1-CH10 v multiplexeru byly programově přepínány mezi rezistivními strukturami. K nim byly odděleně na kanály CH13-CH15 připojeny tři platinové teplotní čidla PT1000. Struktury s PEDOT:PSS byly vloženy do horkovzdušné pece Memmert UFP400.

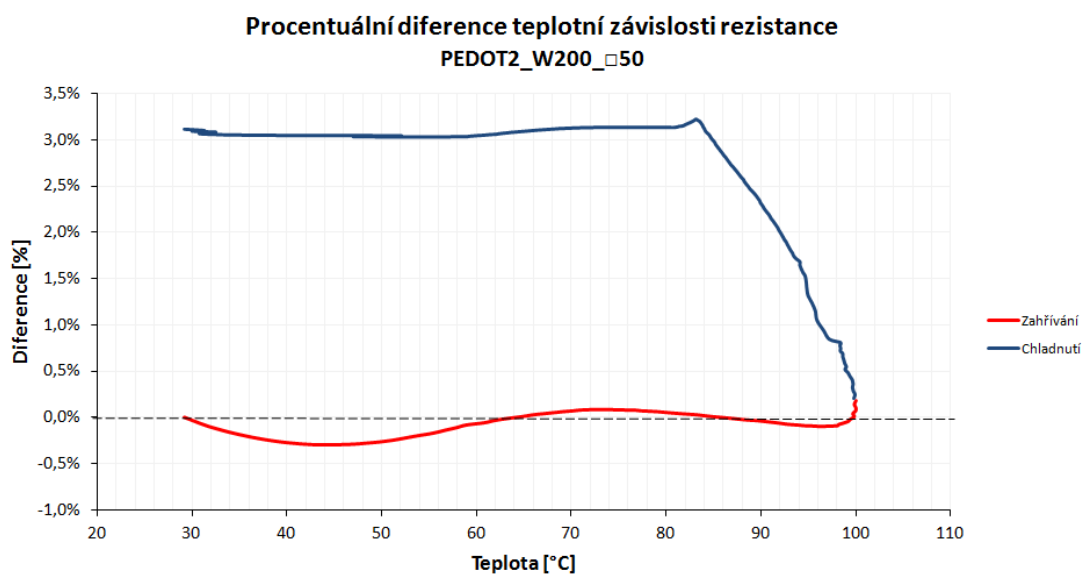
Do horkovzdušné pece se vložila na rošt nevodivá deska, na kterou se položila první sada vzorků. Na rezistory se připojil přípravek již známý z kapitoly Specifická rezistance připojený k multimetru. Tři platinová čidla se rozprostřela okolo rezistorů v pravidelném trojúhelníku co nejbližší, aby bylo měření uvnitř pece co nejpřesnější. Samotné měření probíhalo nastavením teploty pece od 25 °C do 100 °C a následným zchlazením zpět

na původní teplotu. Data byla programově odečítána a odeslána do PC v intervalu 1 s pomocí programu Excelinx.

Výsledné grafy (Obr. 4.12 a Obr. 4.13) ukazují, že při zahřívání do 45 °C docházelo u vzorků k malému poklesu rezistance. Od této hodnoty teploty se začala rezistance zvyšovat a poté snižovat do hodnoty blížíící se počáteční hodnotě. Nejvíce změny se projevilo při chlazení tištěných rezistorů, kde se jejich rezistance oproti původní hodnotě zvedla o více jak 3 %. Po skončení testu se zpětně po hodinové pauze proměřily hodnoty rezistance a byla patrná změna celkové rezistance dané sady vzorků.



Obr. 4.12: Teplotní závislost rezistance PEDOT2_W200_□50.



Obr. 4.13: Procentuální diference teplotní závislosti rezistance PEDOT2_W200_□50.

4.5 Proudové zatěžování

Posledním praktickým testem elektrických vlastností tištěných rezistivních struktur je jejich proudové zatěžování.

Měření probíhalo na SMU jednotce Keithley 2636A, kde vzorky byly vloženy do přípravku (boxu) na rušení vnějších elektromagnetických vlivů, aby byl výsledek měření co nejpřesnější bez známky zkreslení. Měření probíhalo obdobně jako při měření V-A charakteristiky, ale s tím rozdílem, že se nastavovala velikost proudu od 10 nA logaritmičtě se zvyšující hodnoty až na 1 mA. Každé jednotlivé měření trvalo 35 s.

Testované vzorky byly vybrány ze všech předešlých z toho důvodu, že měly nejméně defektní vzorky. Dalším kritériem byla jejich rozdílná šířka vodivého polymeru W100 a W300, ale stejná efektivní délka $\square 100$.

Celý chod měření byl programově ovládán přes softwarový program ACS Basic. Tabulka 4.1. ukazuje maximální hodnoty proudového zatěžování rezistivních struktur.

(a) W100_□100		(b) W300_□100	
Kanál (CH)	Max. I zatížení [A]	Kanál (CH)	Max. I zatížení [A]
1	X	1	X
2	X	2	10^{-3}
3	X	3	X
4	X	4	10^{-3}
5	X	5	10^{-3}
6	10^{-9}	6	X
7	X	7	X
8	10^{-3}	8	X
9	10^{-3}	9	10^{-3}
10	X	10	X

Tab. 4.1: Tabulky maximálních proudových zatížení testovaných rezistivních struktur. Symbol X značí, že u těchto rezistorů se nepodařilo změřit ani první úroveň proudového zatížení.

Z tabulky je patrné, že proudové zatěžování rezistivních struktur až do hodnoty 1 mA bylo velmi destruktivní a většiny z rezistorů označené symbolem X se nepodařilo proměřit ani první hodnoty proudového zatěžování 10 nA. Jedním faktorem ovlivňující tuto skutečnost bylo velmi důkladné namáhání rezistorů předchozími měřeními. Dalším faktorem jsou již výrobní vady při vzniku tištěných fólií.

Obr. 4.14 ukazuje malou změnu hodnoty rezistance při konečném měření proudu 1 mA. Zde nedošlo k proudovému průrazu. Tuto skutečnost ukazuje Obr. 4.15, kde po zahájení druhého měřicího cyklu při hodnotě 20 nA došlo k průrazu rezistoru a jeho zničením. Zničení rezistoru potvrdil test měření odporu.

5

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou tištěných rezistivních struktur a zkoumat možnosti využití intrinzičně vodivých materiálů pro realizaci odporových elementů. Práce se podrobněji zaměřila na aplikaci organického vodivého materiálu PEDOT:PSS a charakterizovaly se klíčové parametry tištěných rezistorů. Posledním cílem bylo proměření elektrických vlastností předložených tištěných rezistivních strukturách s organickým materiálem PEDOT:PSS.

Měření specifické rezistance se provedlo na všech typech vzorků tištěných rezistivních struktur, kde se ukázalo, že čím větší byla efektivní délka drah rezistivních struktur, tím větší byla chybovost dané sady. Rezistory s nejmenší efektivní délkou a šířkou měly největší rezistanci i plošnou rezistivitu oproti stejným rezistorům se stejnou efektivní délkou, ale rozdílnou šířkou. Jako nejlepší exemplární příklad specifické rezistance se jeví sada vzorků s organickým materiálem PEDOT1 W200_□200, neboť tyto rezistory vykazovaly nejmenší chybovost a jejich výsledky rezistance se nejvíce shodovaly s procentuální tolerancí.

Pro měření V-A charakteristiky se přistupovalo od konečných výsledků specifické rezistance, kde se podle jejich chybovosti seřadily tištěné rezistivní struktury za sebou podle pořadí od nulových k nejvíce defektních vzorků. Dalším porovnáním před dalšími fázemi měření byl jejich variační koeficient. Porovnáním těchto všech složek se mohlo přejít k samotnému měření, kde se ukázalo, že všechny vybrané testované rezistivní struktury vykazovaly nulové odchylky V-A charakteristiky. Jejich míra spolehlivosti se rovnala přesně jedné, což naznačuje jejich přesné lineární chování.

Dalším testem byla teplotní závislost, kde se vzorky pro tento účel měření vybraly z předchozích výsledků. Hlavním parametrem byla odlišná šířka struktury a malá chybovost. Výsledky testu jsou takové, že po dobu zahřívání kolísaly hodnoty rezistance o $\pm 0,5$ %, ale při procesu chladnutí došlo k vzestupu hodnot rezistance o 3 %, respektive o 5 % u širší struktury. Za jednu hodinu od konce testování se vzorky proměřily a jejich zvýšené hodnoty rezistance zůstaly nezměněné.

Posledním druhem testování bylo proudové zatěžování, které bylo velmi destruktivní, a proto tento test proběhl na samý závěr. Pro tento účel se vybraly sady, které ještě nezaznamenaly větší nárůst defektních vzorků. Tímto testem úspěšně prošlo pouze šest

vzorků, kde vydržely maximální proudové zatížení 1 mA. Jeden vzorek byl úspěšně odměřen při 10 nA a poté nastal proudový průraz. U zbylých rezistivních strukturách byl proudový průraz hned po začátku měření. Ukázalo se, že změna závislosti rezistance na proudovém zatěžování byla maximálně ± 1 %.

Tato bakalářská práce ukázala, že organický vodivý materiál PEDOT:PSS bude do budoucna velkým přínosem pro elektrotechniku. Už dnes se z toho materiálů testují a vyrábí různé elektronické součástky jako tranzistory, moderní OLED obrazovky nebo dotykové panely. PEDOT:PSS patří mezi nejúspěšnější polymery pro komerční použití. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří vysoká stabilita v jeho p-dotované formě a vysoká vodivost. Před deseti lety si nikdo nedokázala představit, že tato látka, která byla dříve brána jako izolant, je dnes na vrcholku mezi vodivými polymery.

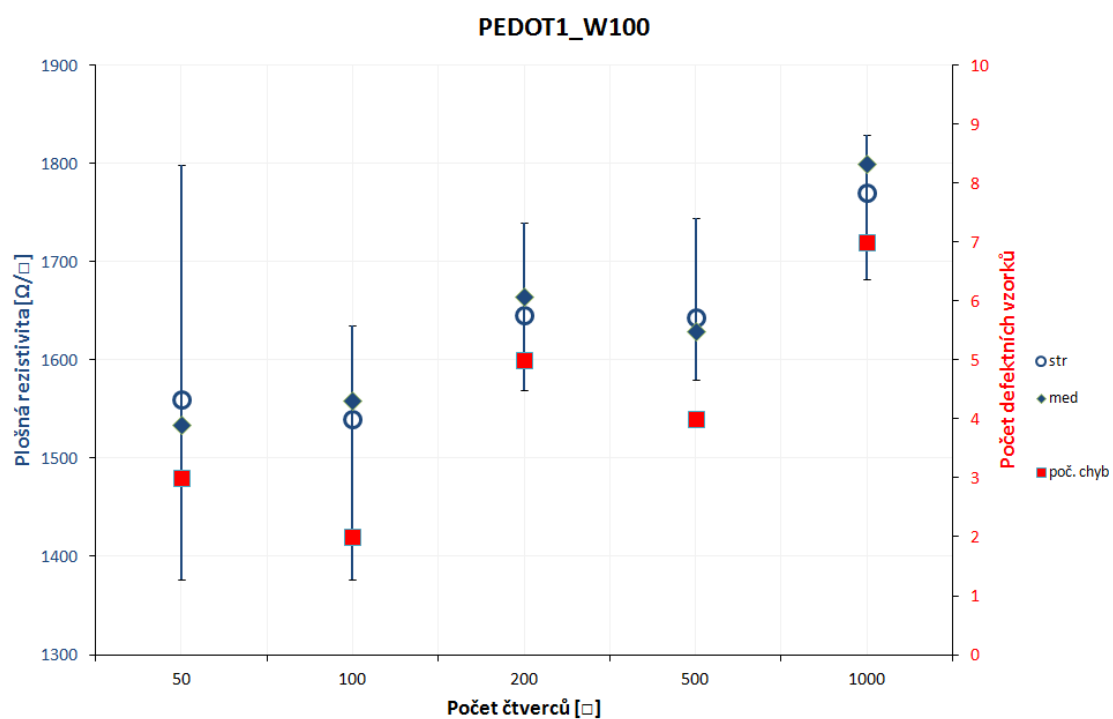
Literatura

- [1] Steplewski, W.; Serzysko, T.; Kozioz, G.; Dziedzic A.: *Preliminary assessment of the stability of thin- and polymer thick-film resistors embedded into printed wiring board*. *Microelectronics Reliability*, 52(8), 1719-1725. doi:10.1016/j.microrel.2012.03.026
- [2] Cheng, P. L. et al.: *Quantitative Analysis of Resistance Tolerance of Polymer Thick Film Printed Resistors*. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(2), 269-274. doi10.1109/TCAPT.2007.897968
- [3] Niessing, B.: *Smarte Kunststoffe und flexible Chips*. *Das Fraunhofer Magazin*, 2009, č. 3, s. 8–12. [Cit. 23. 4. 2014]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42991
- [4] OHMEGA TECHNOLOGIES, Inc. *OhmegaPly*. Ohmega [online]. 2014, vyd. Culver City, 2014 [Cit. 2. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.ohmega.com/technology/>
- [5] Ionescu, C.; Svasta, P.; Vasile, A.; Bonfert, D.: *Investigations on organic printed resistors based on PEDOT:PSS*. 2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 85-89. doi:10.1109/SIITME.2012.6384352
- [6] Záhlava, V.: *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. BEN – technická literatura, Praha, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4
- [7] Tůmová, O.; Čtvrtník, V.; Girg, J.; Švarný, J.: *Elektrická měření - měřící metody*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2005, ISBN 80-7043-412-0
- [8] Jönsson, S.K.M. et al.: *The effects of solvents on the morphology and sheet resistance in poly(3,4-ethylenedioxythiophene) – polystyrenesulfonic acid (PEDOT–PSS) films* *Synthetic Metals*, 2003, 139, doi:10.1016/S0379-6779(02)01259-6
- [9] Jaeger, Richard C.: *Introduction to Microelectronic Fabrication (2nd ed.)*. New Jersey, Prentice Hall, 2002, s. 81–88., ISBN 0-201-44494-1
- [10] Nešpůrek, S.; Prokeš, J.; Stejska, J.: *Inteligentní materiály pro nové století* *Vesmír* 80, 35, 2001/1, [Cit. 24. 4. 2014]. Dostupné z: <http://casopis.vesmir.cz/clanek/vodive-polymery>

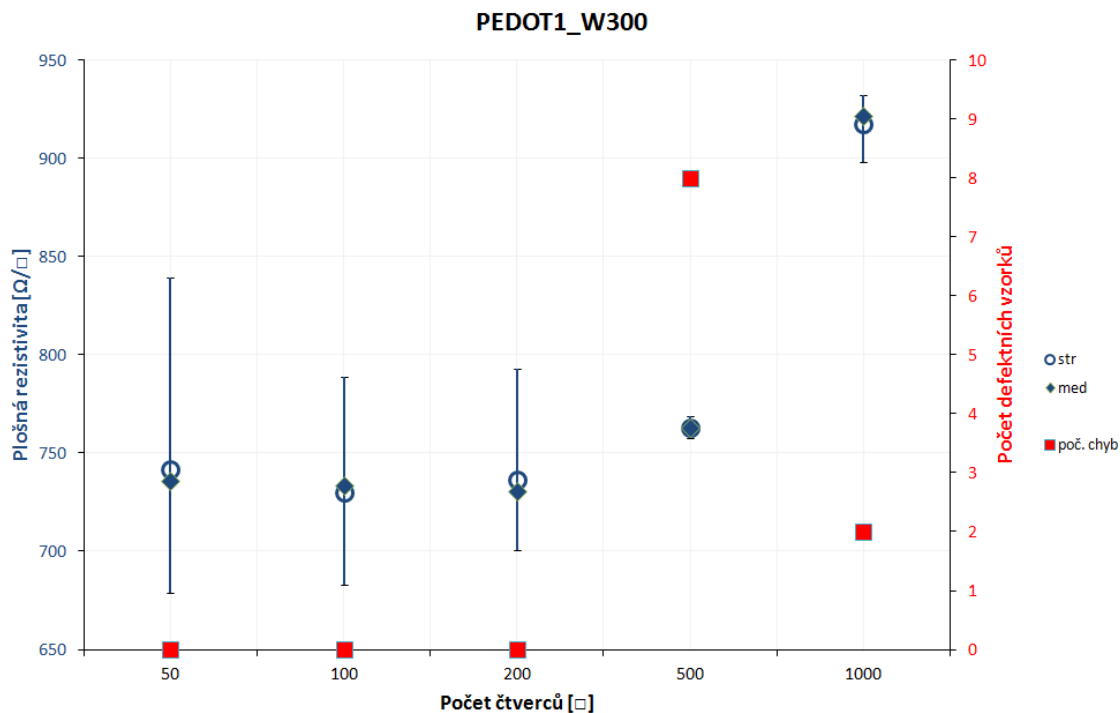
- [11] McNeill, R.; Siudak, R.; Wardlaw, J. H.; Weiss, D. E.: *Electronic Conduction in Polymers. I., II., III.* Aust. J. Chem. 16 (6): 1056–1075. doi:10.1071/CH9631056
- [12] Keithley Model 2700: *Multimeter/Switch System - User's manual* 2700-900-01 Rev., J / August 2011, [Cit. 24. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.keithley.com/products/data/datalogger/?mn=2700>
- [13] Keithley Model 7708: *40-channel Differential Multiplexer Module with Automatic CJC - User's Guide* PA-744 Rev. C / 8-03; [Cit. 24. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.keithley.com/products/switch/rfmicrowave/?mn=7708>
- [14] Keithley Model 2636A: *Model 2636A Dual-channel System SourceMeter Instrument* [Cit. 24. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.keithley.com/products/dcac/currentvoltage/gpmp/?mn=2636A>
- [15] Hong, K. et al.: *Reducing the contact resistance in organic thin-film transistors by introducing a PEDOT:PSS hole-injection layer* Organic Electronics 9, 2008, 864–868, doi:10.1016/j.orgel.2008.06.008
- [16] IFTIMIE, S. et al.: *The influence of LiF layer and ZnO nanoparticles additions on the performances of flexible photovoltaic cells based on polymer blends* Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol. 6, No. 4, 2011, s. 1631-1638
- [17] Kamtekar, K. T.; Monkman, A. P.; Bryce, M. R.: *Recent Advances in White Organic Light-Emitting Materials and Devices* Advanced Materials 22 (5): 572. doi:10.1002/adma.200902148
- [18] Georgie Tech.: *Sheet resistance* [Cit. 28. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/sheetRes.html>
- [19] Savastano D.: *PEDOT:PSS Breakthrough by Kodak* [Cit. 28. 4. 2014]. Dostupné z <http://www.printedelectronicsnow.com/articles/2011/12/pedotpss-breakthrough-by-kodak-heraeus-opens-door->

Příloha A

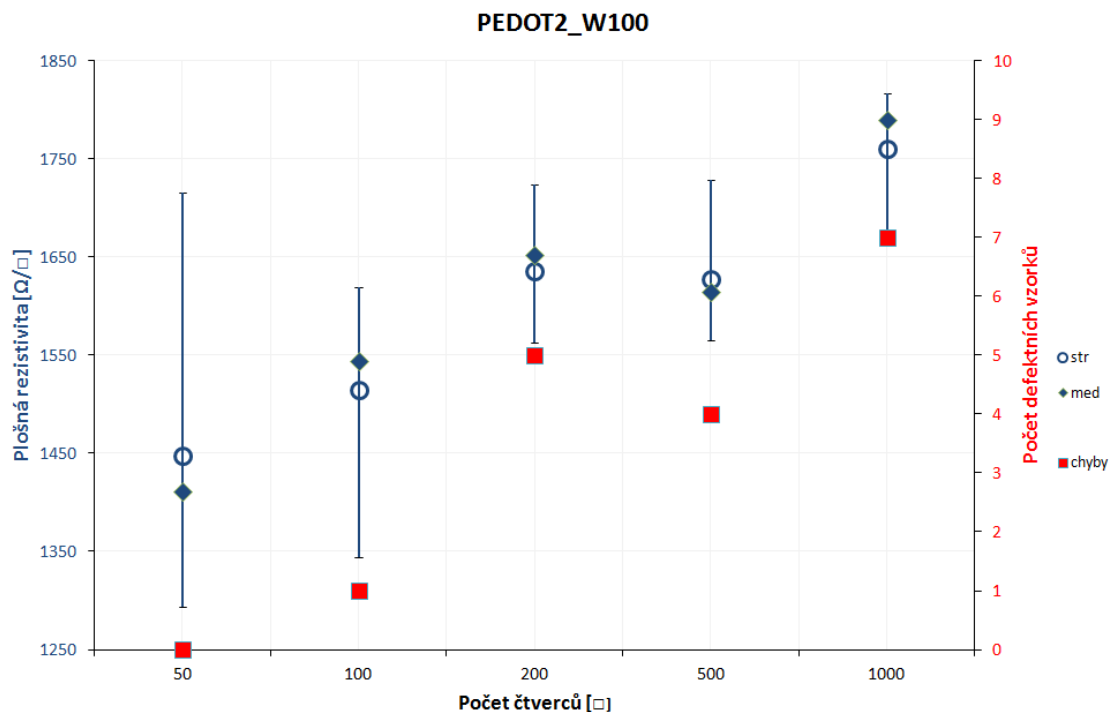
Specifická rezistance



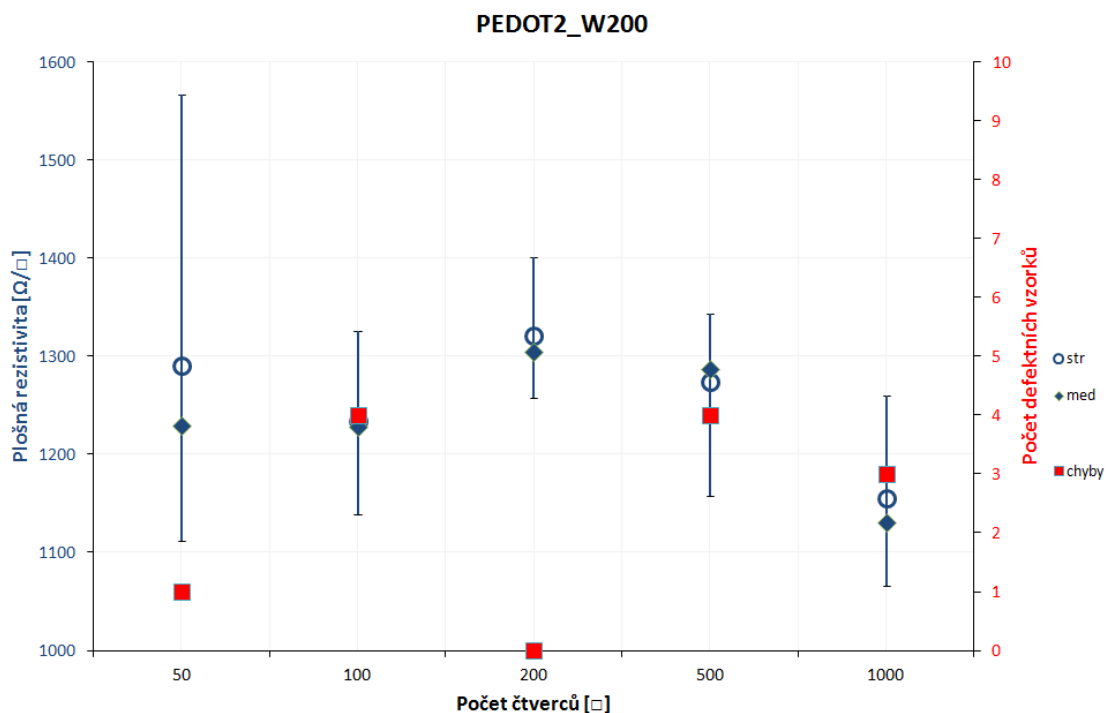
Obr. A.1: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.



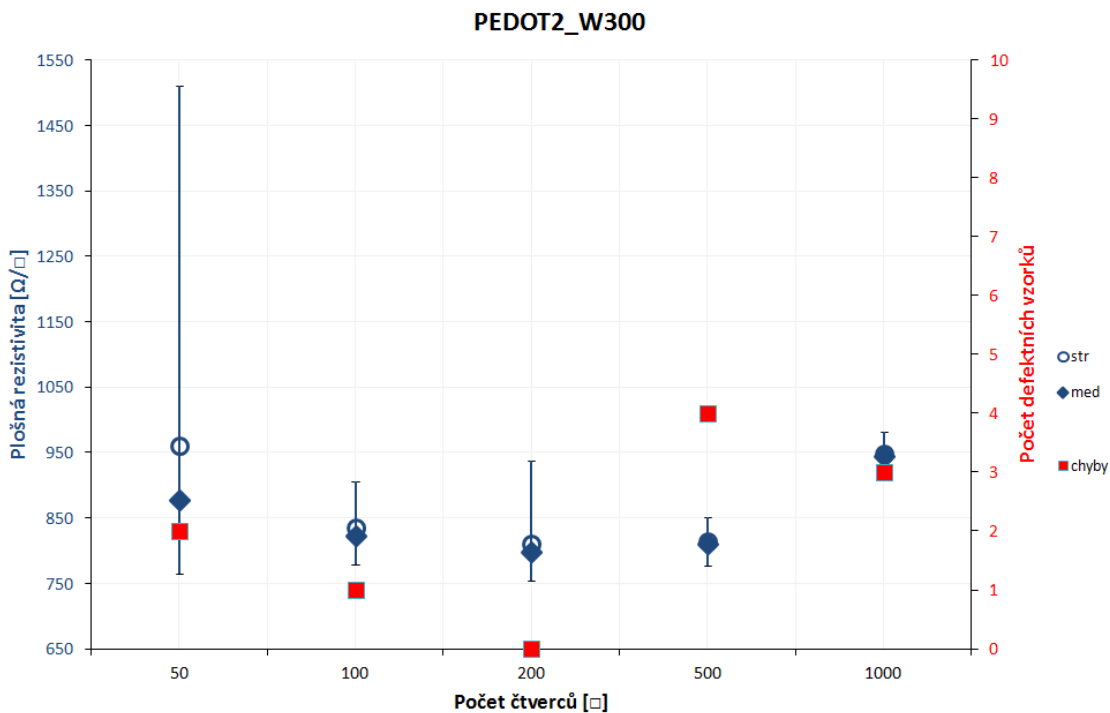
Obr. A.2: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuti jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.



Obr. A.3: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuti jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.



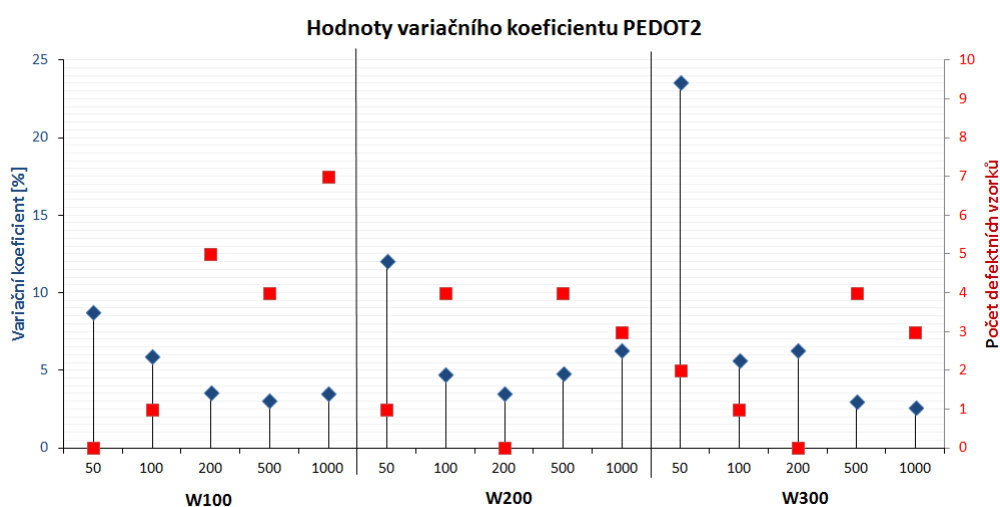
Obr. A.4: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.



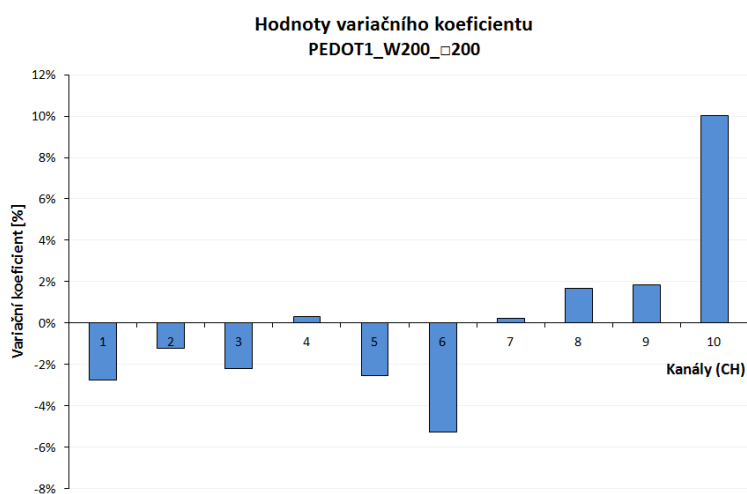
Obr. A.5: Graf znázorňující velikost plošné rezistivity dané sady testovaných vzorků v závislosti na počtu čtverců. Zahrnuty jsou také hodnoty jejich střední hodnoty, mediánu a počtem defektních vzorků.

Příloha B

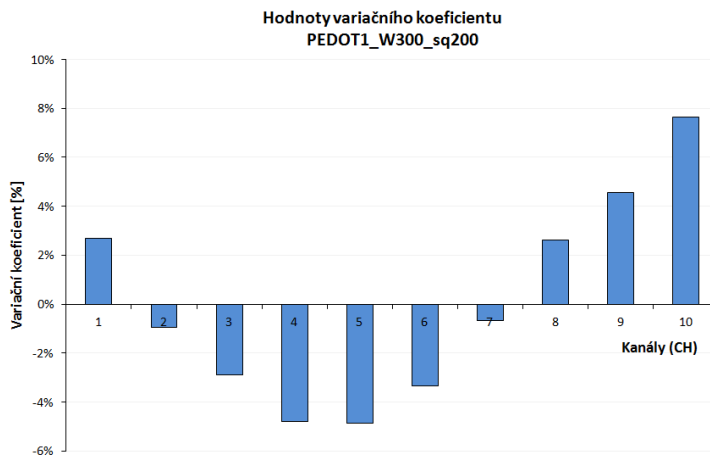
Variační koeficient



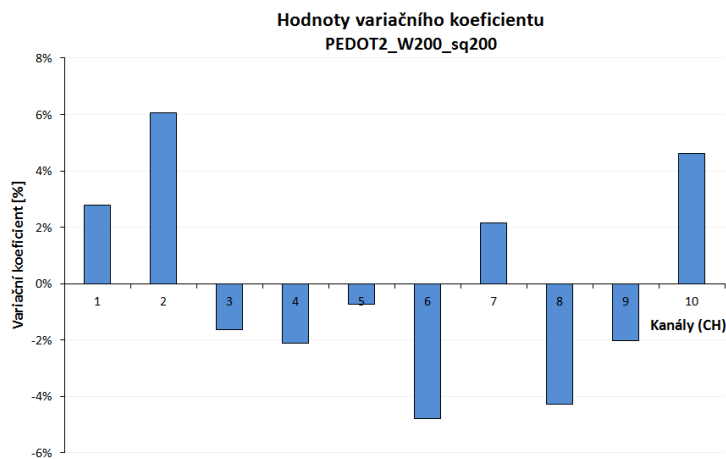
Obr. B.1: Graf znázorňující velikost variačních koeficientů rezistivních struktur PEDOT2 s důrazem na jejich chybovost při měření specifické rezistance.



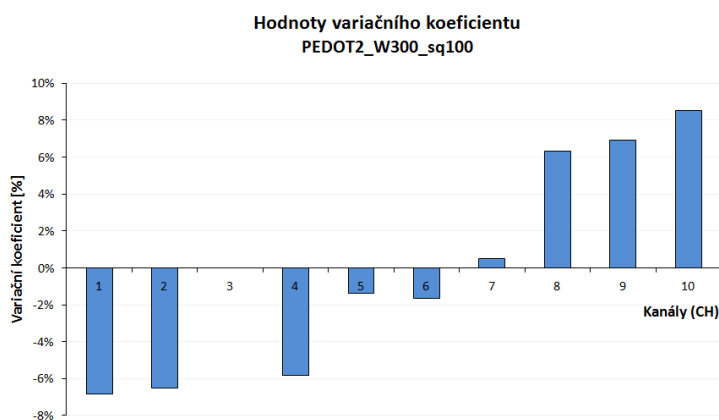
Obr. B.2: Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W200_□200.



Obr. B.3: Hodnoty variačního koeficientu PEDOT1_W300_□200.



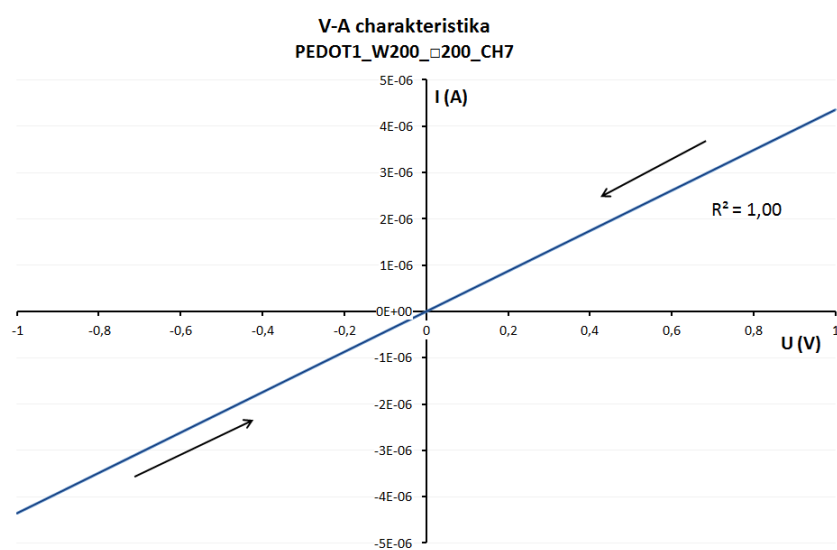
Obr. B.4: Hodnoty variačního koeficientu PEDOT2_W200_□200.



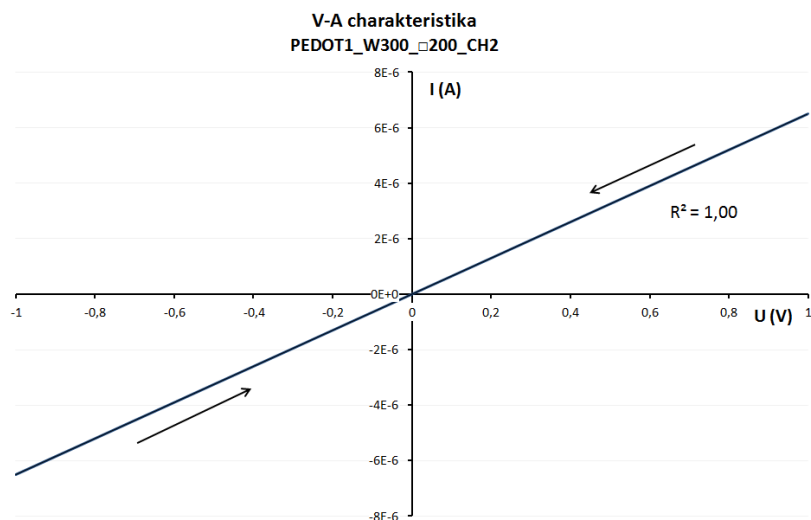
Obr. B.5: Hodnoty variačního koeficientu PEDOT2_W300_□100. Vzorek na kanálu CH3 byl defektní.

Příloha C

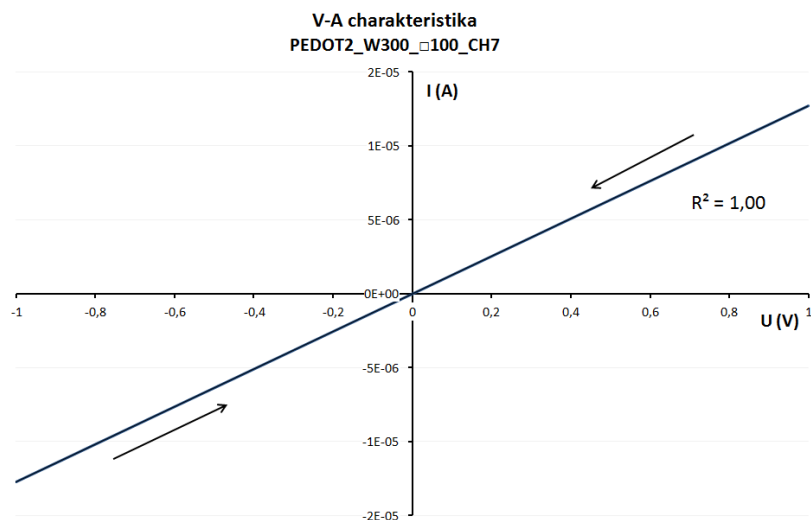
V-A charakteristika



Obr. C.1: V-A charakteristika CH7 sady se šířkou W200 a počtem čtverců □200 vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.



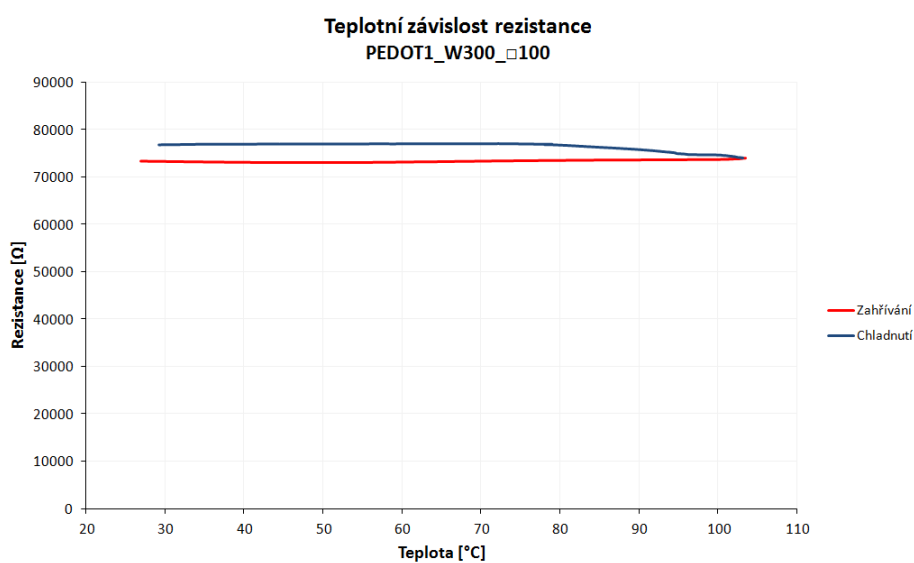
Obr. C.2: V-A charakteristika CH2 sady se šířkou W300 a počtem čtverců $\square 200$ vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.



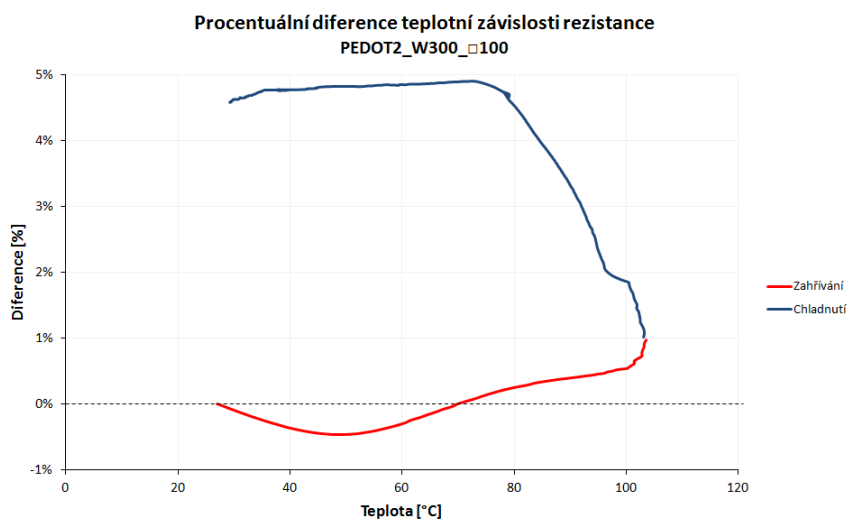
Obr. C.3: V-A charakteristika CH7 sady se šířkou W300 a počtem čtverců $\square 100$ vyjadřující naprosto přesné lineární chování. Hodnota spolehlivosti dané charakteristiky se rovná jedné.

Příloha D

Teplotní závislost rezistance



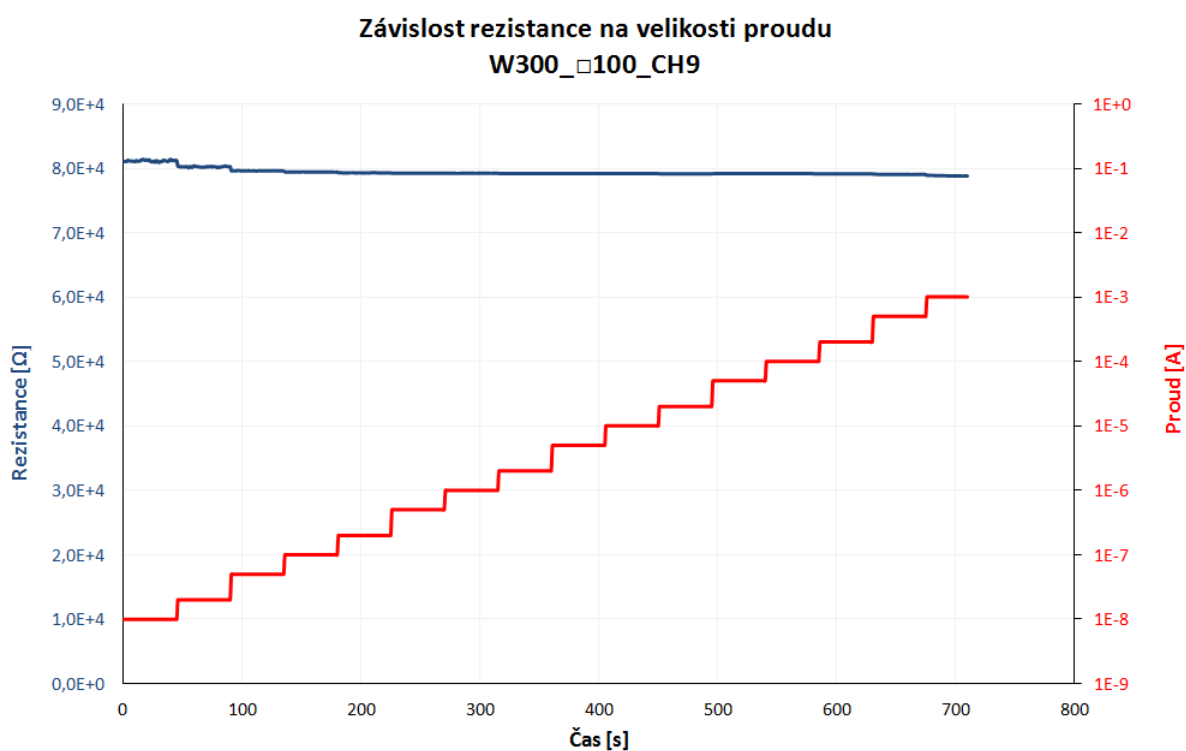
Obr. D.1: Teplotní závislost rezistance PEDOT1_W300_□100.



Obr. D.2: Procentuální diference teplotní závislosti rezistance PEDOT1_W300_□100.

Příloha E

Proudové zatěžování



Obr. E.1: Závislost celkové rezistance na velikosti proudu.