VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SYSTÉM PRO CHARAKTERIZACI POLOVODIČOVÝCH TOPNÝCH VRSTEV

SYSTEM FOR THE CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTOR HEATING LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Vladimír Mikluš

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Vladimír Mikluš ***ID:*** 240395

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Systém pro charakterizaci polovodičových topných vrstev

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je seznámit se s problematikou charakterizace polovodičových topných vrstev a sestavit dle zadání z dostupných komponent a přístrojů pracoviště, které bude umožňovat řízené napájení topných vzorků, měření jejich parametrů, bezkontaktní měření prostorově rozlišené teploty a jejího vývoje v čase. Součástí bude také systém pro referenční měření odporu polovodičových vrstev za studena. V rámci řešení je nutné zaměřit se nejen na hardwarovu stránku systému, ale i na softwarové řízení a vyhodnocení naměřených dat. K řízení systému a zpracování dat je přednostně preferován Python, případně Matlab či LabVIEW.

1. Prostudovat aktuální stav dané problematiky a seznámit se se stávajícím přístrojovým vybavením na UFYZ FEKT VUT v Brně.
2. Zprovoznit systém pro referenční měření odporu polovodičových vrstev za studena.
3. Navrhnout experimentální automatizované pracoviště pro charakterizaci topných vrstev.
4. Sestavit a zprovoznit experimentální automatizované pracoviště pro charakterizaci topných vrstev.
5. Vývoj software pro základní zpracování a vyhodnocení naměřených dat.
6. Funkčnost pracoviště demonstrovat na dodaných experimentálních vzorcích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JOHN, Park; STEVE, Mackay a EDWIN, Wright. Practical Data Communications for Instrumentation and Control. Elsevier, 2003. ISBN 978-0-7506-5797-6.

Termín zadání: 5.2.2024 ***Termín odevzdání:*** 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Konzultant: Ing. Tomáš Trčka, Ph.D.

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce se zabývá návrhem, sestavením a zprovozněním systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev. Postupně je zde řešena problematika obecné struktury navrženého systému, metodiky měření, parametrů použitých přístrojů, měřicích algoritmů, obecného hardwarového a softwarového řešení. Pomocí toho systému je možné získat potřebná data sloužící k posouzení potenciální degradace nanášených topných vrstev, nedokonalostí technologického procesu výroby včetně celkového designu vyráběných vzorků.

Klíčová slova

Polovodičové topné vrstvy, GPIB, SCPI, Python, prostorově rozlišená teplota

Abstract

The bachelor thesis deals with the design, preparation and operation of a system for the characterization of semiconductor heating layers. The general structure of the designed system, measurement methodology, parameters of the used instruments, measurement algorithms, general hardware and software solutions are addressed. With this system it is possible to obtain the necessary data used to assess the potential degradation of the deposited heating layers, imperfections of the technological process of production including the overall design of the produced samples.

Keywords

Semiconductor heating layers, GPIB, SCPI, Python, spatially resolved temperature

Bibliografická citace

MIKLUŠ, Vladimír. *Systém pro charakterizaci polovodičových topných vrstev*. Brno, 2024. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159386. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	*Vladimír Mikluš*
VUT ID studenta:	*240395*
Typ práce:	*Bakalářská práce*
Akademický rok:	*2023/24*
Téma závěrečné práce:	*Systém pro charakterizaci polovodičových topných vrstev*

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: 22. května 2024 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soni Šedivé Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Trčkovi Ph.D. za cenné rady a účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 22. května 2024 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **8**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. VZORKY POLOVODIČOVÝCH TOPNÝCH VRSTEV **12**

1.1 DESIGN VZORKŮ 12
1.2 VÝROBA VZORKŮ 14
1.3 CHARAKTERIZACE VZORKŮ 15

2. SYSTÉM PRO CHARAKTERIZACI TOPNÝCH VRSTEV **16**

2.1 SBĚRNICE GPIB 17
2.2 STANDARD SCPI 18
2.3 PROGRAMOVACÍ JAZYK PYTHON 18
2.3.1 Moduly jazyka Python *19*
2.3.2 Knihovny a balíky jazyka Python *19*

3. PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ ODPORU **21**

3.1 NÁVRH PRACOVIŠTĚ 21
3.2 METODIKA MĚŘENÍ 21
3.3 HARDWARE 22
3.3.1 Přístroj Keithley 2420 ..... *22*
3.3.2 Příslušenství *23*
3.4 MĚŘICÍ ALGORITMUS 24
3.5 POPIS REALIZACE PRACOVIŠTĚ 25
3.5.1 Software *25*
3.5.2 Související problematika *28*

4. PRACOVIŠTĚ PRO TEPLOTNÍ CHARAKTERIZACI **30**

4.1 NÁVRH PRACOVIŠTĚ 30
4.2 METODIKA MĚŘENÍ 31
4.3 HARDWARE 33
4.3.1 Použité Přístroje *33*
4.3.2 Příslušenství *36*
4.4 MĚŘICÍ ALGORITMUS 39
4.5 POPIS REALIZACE PRACOVIŠTĚ 41
4.5.1 Software *42*
4.5.2 Související problematika *47*

5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT **49**

5.1 APLIKACE PRO AUTOMATICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT 49
5.2 MĚŘENÍ DODANÝCH VZORKŮ 54

6. ZÁVĚR **57**

LITERATURA **58**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **61**

SEZNAM PŘÍLOH **62**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Původní design vzorku a jeho rozměry v mm 12
1.2 První design vzorku a jeho rozměry v mm 13
1.3 Druhý design vzorku a jeho rozměry v mm 13
1.4 Fotodokumentace z výroby; (a) plazmatický žárový nástřik oxidu hlinitého, (b) vysokorychlostní nástřik měděných elektrod, (c, d) plazmatický nástřik oxidu titaničitého 14
2.1 Fotografie USB-GPIB redukce 17
3.1 Blokové schéma pracoviště pro měření odporu 21
3.2 Obvod čtyřvodičové metody měření elektrického obvodu [12] 22
3.3 Čelní panel měřicí zdrojové jednotky Keithley 2420 23
3.4 Fotografie připojení vzorku na pracovišti pro měření odporu 24
3.5 Měřicí algoritmus pro AV charakteristiku 24
3.6 Měřicí algoritmus pro čtyřvodičovou metodu 25
3.7 Blokové schéma struktury aplikace pracoviště pro měření odporu 26
3.8 GUI aplikace pracoviště pro měření odporu s ukázkou naměřené AV charakteristiky 27
3.9 Vyskakovací okno pro potvrzení vypnutí aplikace 28
3.10 Fotografie vzorku po navaření přívodních vodičů (vlevo), vzorek po odloupnutí vrstev (vlevo) 29
4.1 Blokové schéma pracoviště pro teplotní charakterizaci 30
4.2 Schéma zapojení přístrojů k měřenému vzorku na daném pracovišti 32
4.3 Čelní panel zdroje BK Precision 1902 33
4.4 Čelní panel multimetrů Agilent 34410A/11A 34
4.5 Fotografie proudového snímače s modulem ACS712 35
4.6 Čelní panel zdroje Agilent E3649A 35
4.7 Fotografie termokamery TIM 450 s objektivy 36
4.8 Fotografie připojení vzorku na pracovišti pro teplotní charakterizaci 37
4.9 Kotouč s nanesenou polovodičovou topnou vrstvou, průměr 20 cm, hmotnost 7 kg 37
4.10 Model systému tepelné distribuce s příslušenstvím a termokamerou na pracovišti pro teplotní charakterizaci 38
4.11 Měřicí algoritmus pro pracoviště pro teplotní charakterizaci 39
4.12 Realizované pracoviště teplotní charakterizace 41
4.13 Detail realizovaného systému teplotní distribuce 41
4.14 Blokové schéma struktury aplikace pracoviště pro teplotní charakterizace 43
4.15 Okno pro ověření připojení přístrojů (vlevo), okno pro zadání názvu vzorku (vpravo) 44
4.16 Hlavní okno aplikace pracoviště pro teplotní charakterizaci 45
5.1 Blokové schéma struktury aplikace pro zpracování dat 49
5.2 Okno pro výběr zájmové oblasti 50
5.3 Hlavní okno aplikace pro zpracování dat 51
5.4 Příklad grafu závislosti průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření 52
5.5 Příklad grafu závislosti odporu na průměrné teplotě 52
5.6 Příklad grafu závislosti min., max. a průměrné teploty na čase měření 53
5.7 Výřez z videa během čtvrtého teplotního cyklu 55
5.8 Snímek z video záznamu č. 1, vzorek X4 56
5.9 Snímek z video záznamu č. 2, vzorek X4 56
6.1 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření 65
6.2 Závislost odporu na průměrné teplotě 65
6.3 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření 66
6.4 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření 66

6.5 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů 67
6.6 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření 68
6.7 Závislost odporu na průměrné teplotě 68
6.8 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření 69
6.9 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření 69
6.10 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů 70
6.11 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření 71
6.12 Závislost odporu na průměrné teplotě 71
6.13 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření 72
6.14 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření 72
6.15 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů 73
6.16 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření 74
6.17 Závislost odporu na průměrné teplotě 74
6.18 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření 75
6.19 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření 75
6.20 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů 76

SEZNAM TABULEK

1.1 Specifikace nanášených vrstev a jejich tloušťka 13
3.1 Měření elektrického odporu po postupném odstranění vzniklých oxidů 29
4.1 Tabulka komponentů systému tepelné distribuce 38
4.2 Experimentálně zjištěné hodnoty emisivity topné vrstvy 47
5.1 Naměřené hodnoty elektrického odporu po teplotních cyklech s označením umístění grafických průběhů cyklů v přílohách 54

Úvod

Bakalářská práce se zabývá návrhem, sestavením a zprovozněním systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev. Tyto vrstvy jsou vyvíjeny ve výzkumném vědeckém centru CEITEC (Central European Institute of Technology) v rámci specifického projektu s přesahem do plánovaných průmyslových aplikací. Vyrobené vzorky jsou v rámci vzájemné spolupráce částečně měřeny a charakterizovány na Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně.

Charakterizace spočívá v měření referenčního elektrického odporu polovodičových vrstev za studena, následně se průchodem elektrického proudu vrstvy zahřívají v širokém rozsahu teplot (až vyšší stovky °C) a termokamerou se zaznamenává šíření prostorové teploty daných vrstev. Na základě těchto měření lze získat a vykreslit řadu zajímavých průběhů z prováděných cyklických experimentů, které poskytují zpětnou vazbu pro další vývoj a technologickou přípravu topných vrstev včetně použitých materiálů. Cílem je dosáhnout takového technologického postupu při přípravě vzorků, aby výsledná topná vrstva vykazovala stabilní a opakovatelné charakteristiky, což by do budoucna umožnilo plynulou regulaci dodávaného výkonu do vrstev dle požadavků průmyslových aplikací, ve kterých by byly vyvíjené topné vrstvy použity. Dále se zjišťuje, jak se mění referenční elektrický odpor vzorku za studena po jednom či více teplotních cyklech, jelikož výrazná odchylka těchto měření může mít souvislost s degradací topné vrstvy po opakovaném teplotním zatěžování.

Tato práce reaguje na současný trend rozmachu použití programovacího jazyku Python mezi odbornými kruhy, z toho vyplývá snaha použít tento programovací jazyk co možná v nejhojnější míře. V této práci je použit k napsání třech aplikací, ze kterých jsou dvě určeny k měření a jedna ke zpracování naměřených dat.

Struktura bakalářské práce je členěna do šesti kapitol. První kapitola se zabývá popisem měřených vzorků, jejich výrobou a charakterizací. Strukturou, návrhem a realizací systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev se zabývají kapitoly dvě až čtyři. Kapitola pátá se zabývá zpracováním naměřených dat a demonstrací funkčnosti tohoto systému.

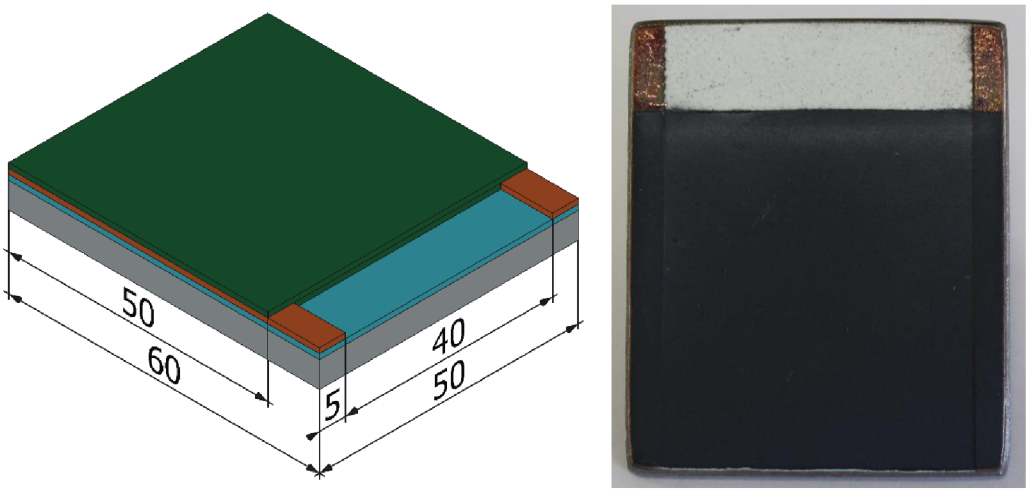
1. VZORKY POLOVODIČOVÝCH TOPNÝCH VRSTEV

V nadcházející kapitole bude blíže přiblížen design, výroba a způsob charakterizace dodávaných vzorků polovodičových topných vrstev. Tyto vzorky slouží k testování polovodičových topných vrstev, jejichž použití je plánováno do průmyslových aplikací.

1.1 Design vzorků

Na UFYZ (Ústav fyziky FEKT VUT v Brně) bylo postupně dodáno několik designů vzorků. Vzorky se skládají z vrstvy substrátu, která je vysoká 5 mm. Z jedné strany vrstvy substrátu se nacházejí nanesené vrstvy a z druhé strany vyčnívá navařený šroub pro lepší uchycení vzorku při výrobě.

Původního design vzorku, který je znázorněn na obrázku 1.1, se ukázal jako nevyhovující, neboť topná vrstva na rozhraní s elektrodami popraskala při relativně nízkých teplotách. Tato skutečnost byla zmapována před začátkem této práce, tudíž tento design vzorku není v rámci této práce měřen. Proto následný vývoj přinesl další designy vzorků.



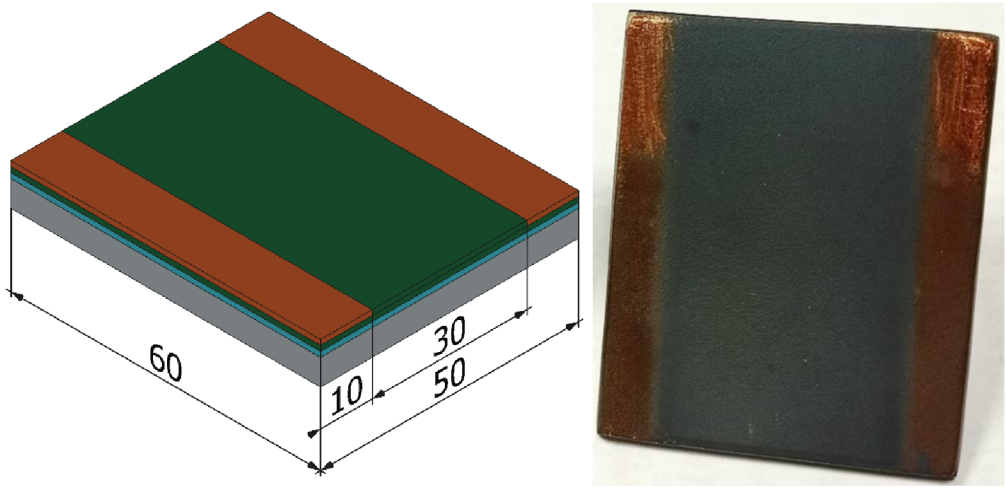
Obr. 1.1 Původní design vzorku a jeho rozměry v mm

Podrobné informace o tloušťkách vrstev a použitých materiálech jsou dostupné pouze u původního designu vzorku. Tloušťku a materiál nanášených vrstev původního vzorku dokumentuje tabulka 1.1. U ostatních vzorků je známo pouze to, že elektrody jsou z mědi, výška vrstvy substrátu je 5 mm a topná vrstva je sloučenina na bázi oxidu titaničitého.

Tab. 1.1 Specifikace nanášených vrstev a jejich tloušťka

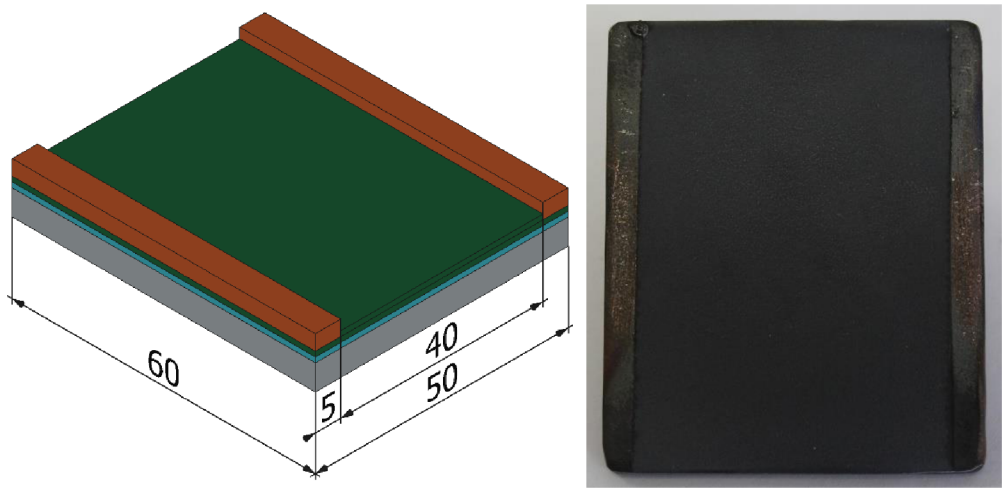
Nanášená vrstva	**Tloušťky vrstvy [µm]**	**Funkce**	**Barva na obr.** 1.1
Al_2O_3	~250	Elektrický izolátor	Modrá
Cu	~130	Elektrody – vodič	Hnědá
TiO_2	~150, 250, 600	Topný povlak	Zelená

První design vzorku znázorněný na obrázku 1.2 se od původního vzorku odlišuje rozložením nanesených vrstev. Konkrétně měděné elektrody se nacházejí na topné vrstvě.



Obr. 1.2 První design vzorku a jeho rozměry v mm

Druhý dodaný vzorek znázorněný na obrázku 1.3 je z hlediska rozložení vrstev stejný jako předchozí vzorek, avšak má užší a vyšší elektrody.

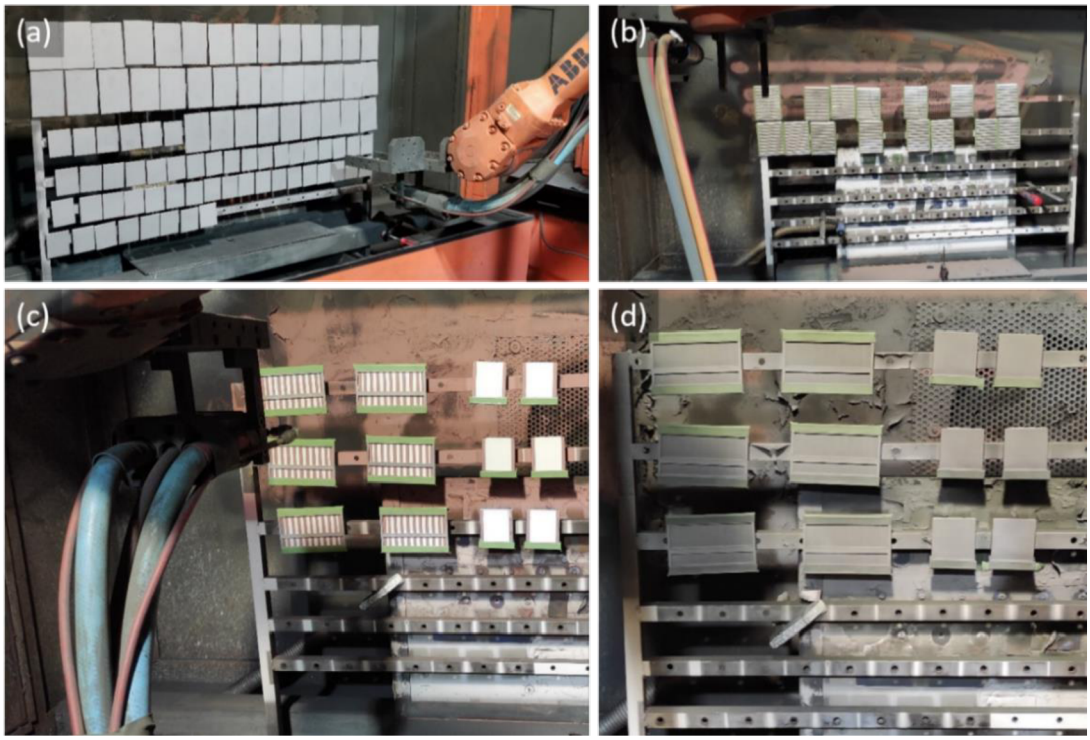


Obr. 1.3 Druhý design vzorku a jeho rozměry v mm

1.2 Výroba vzorků

Na základě konzultace s pracovníky CEITEC výroba vzorků probíhá následovně.

Substráty pro vzorky jsou upraveny do požadovaných tvarů, včetně obroušení hran. Následně je na zadní stranu navařen šroub pro uchycení a manipulaci se vzorkem. Nanášení vrstev probíhá postupně v několika krocích. Jako první se nanáší elektrický izolátor v podobě vrstvy oxidu hlinitého pomocí žárového nástřiku plazmatronem. Následně se pomocí technologie vysokorychlostního nástřiku nanese druhá měděná vrstva, která tvoří elektrody pro přísun elektrického proudu do poslední vrstvy. Poslední vrstva je tvořena topným povlakem z oxidu titaničitého naneseného stejně jako první vrstva, tedy pomocí žárového plazmatronu. Tato vrstva je sama o sobě elektricky vodivá a představuje odporovou (topnou) vrstvu. Fotodokumentace mapující nanášení vrstev je na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 Fotodokumentace z výroby; (a) plazmatický žárový nástřik oxidu hlinitého, (b) vysokorychlostní nástřik měděných elektrod, (c, d) plazmatický nástřik oxidu titaničitého

1.3 Charakterizace vzorků

Pro ověření vhodnosti návrhu polovodičových topných vrstev je klíčová vhodná charakterizace. Z tohoto důvodu je měřeno několik závislostí.

Cílem je nasimulovat provozní stav daných vrstev. Jelikož se jedná o topné vrstvy, tak oblastí zájmu je změna prostorově rozložené teploty v čase a závislost elektrického odporu na teplotě. Daná měření spočívají v přivádění elektrického proudu do vzorku, který se tímto zahřívá. Postupné zahřívání vzorku trvá, dokud vzorek nedosáhne předem určené teploty. Na této teplotě se vzorek nechá po předem stanovenou dobu. Následně se proud vzorkem snižuje a sleduje se průběh chladnutí. V průběhu tohoto měření termokamera zaznamenává snímky měřeného vzorku několikrát za sekundu. Dále v práci jsou uvedeny detailní hodnoty.

Další klíčovou informací je změna elektrického odporu topné vrstvy. Obvyklá hodnota je okolo 4 Ω. Díky tomu může být zjištěno, zdali daná vrstva nedegradovala, což by se projevilo zvýšením elektrického odporu. U vrstev, kde došlo k degradaci, obvykle dojde k několikanásobnému zvýšení elektrického odporu. Elektrický odpor je proto měřen před i po měření prostorové teploty v čase, a to za účelem získání diference elektrického odporu.

2. SYSTÉM PRO CHARAKTERIZACI TOPNÝCH VRSTEV

V této kapitole je nastíněna struktura systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev.

V rámci tohoto systému je potřeba provádět měření do vysokých teplot (až vyšší stovky °C) a také je potřeba měřit elektrický odpor před a po teplotním cyklování. Pro měření elektrického odporu je důležité, aby vzorek měl přibližně stejnou teplotu, aby se do měření elektrického odporu nezanášela chyba vlivem teploty. Potřebu měřit elektrický odpor při přibližně stejné teplotě je možné řešit několika způsoby.

Jeden způsob je rozdělit prostor daného systému do více částí, a to na prostor pro měření odporu a prostor pro měření prostorově rozlišené teploty v čase. Dalším možným způsobem je omezení vlivu teploty na měření odporu pomocí metodiky měření. Konkrétně je možné měřit elektrický odpor pomocí přístrojů v rámci pracoviště pro měření prostorově rozlišené teploty v čase. V tomto případě je vhodné zajistit, aby teplota v okolí tohoto pracoviště zásadně neovlivnila měření elektrického odporu. Toto je možné zajistit například změřením teploty vzorku, pracoviště a porovnat ji s teplotou předchozích měření elektrického odporu. Pokud rozdíl těchto teplot je v rozmezí 3 °C, tak vliv teploty je možné zanedbat. Vzhledem k tomu, že se jedná o náročnější proces, tak bylo rozhodnuto, že systém pro charakterizaci polovodičových topných vrstev se rozdělí na dvě oddělená pracoviště, tj. na pracoviště pro měření elektrického odporu dále jen pracoviště pro měření odporu a na pracoviště pro měření prostorově rozlišené teploty v čase dále jen pracoviště pro teplotní charakterizaci.

Před začátkem řešení této bakalářské práce nebylo navrženo ani sestaveno žádné z výše uvedených pracovišť. Dostupná byla pouze termokamera pro měření prostorově rozlišené teploty a řada běžně dostupných laboratorních přístrojů a ostatního vybavení.

Hlavními požadavky kladenými na pracoviště je použití dostupného přístrojového vybavení viz kapitoly 3.3.1 a 4.3.1, rozhraní GPIB (*General Purpose Interface Bus*) a programovacího jazyka Python. Mezi další požadavky patří: vytvoření aplikace pro měření elektrického odporu, aplikace pro měření prostorově rozlišené teploty a aplikace pro zpracování naměřených dat získaných z pracoviště pro teplotní charakterizaci.

Pracoviště jsou navržena s ohledem na postupně se zavádějící koncept v UFYZ laboratořích. Koncept spočívá v omezení množství lehce nepřenositelné výpočetní techniky u měřicích pracovišť. Z toho vyplývá snaha, aby operátor měření měl v ideálním případě pouze laptop s potřebným softwarovým vybavením a měřicími aplikacemi. Pro provedení požadovaného měření pak stačí pouze propojit daný laptop s GPIB rozhraním u daného pracoviště. Skládá-li se pracoviště z více měřicích přístrojů, tak jsou mezi sebou propojeny sběrnicí GPIB. Laptop obvykle obsahuje rozhraní USB (*Universal Serial Bus*).

Z toho vyplývá, že laptop a měřicí pracoviště jsou spojeny redukcí USB-GPIB, jež je vyobrazena na obrázku 2.1.

Obr. 2.1 Fotografie USB-GPIB redukce

S tímto konceptem souvisí i volba skriptovacího jazyka Python, který se stává populárnějším v odborných kruzích a umožňuje snadnější vytváření rozsáhlejších měřicích systémů. Další výhodou jazyka Python, případně jeho vývojových prostředí (např. PyCharm [1]), je podstatně nižší paměťová náročnost oproti prostředím Matlab či LabView. Mezi klíčové faktory výběru tohoto jazyka patří skutečnost, že jazyk Python je dostupný zdarma, tedy není potřeba žádných placených licencí. V rámci tohoto konceptu je žádoucí mít programová řešení sjednocena v jazyku Python. V laboratořích UFYZ se stále nachází mnoho skriptů psaných v prostředí Matlab. Tyto skripty je možné poměrně jednoduše přetransformovat do jazyku Python po přidání vhodných knihoven.

2.1 Sběrnice GPIB

General Purpose Interface Bus je komunikační rozhraní původně vyvinuto firmou Hewlett-Packard v roku 1965 za účelem propojení vícero měřicích zařízení. Postupem času rozhraní začalo používat více firem, což vedlo ke standardizaci v roce 1975 jako IEEE-488 standard, později také známý jako IEC-625. V roku 1987 byl standard revidován do IEEE 488.1 standardu, téhož roku také vyšel IEEE 488.2 standard, který upřesňuje mimo jiné protokoly posílaných zpráv, formát přenášených informací a definuje základní příkazovou sadu pro ovládání zařízení. [2]

Rozhraní umožňuje paralelní komunikaci, což znamená, že je možné přenášet informace po více vodičích v jednom časovém okamžiku. Dále lze určit GPIB sběrnici za poloduplex, což označuje obousměrnou komunikaci umožňující v jednom časovém okamžiku přenášet informace jen jedním směrem. Rozhraní umožňuje připojení a komunikaci až patnácti zařízením. Maximální rychlost je určena jedním MBps. Komunikační rychlost je závislá na délce kabelu mezi jednotlivými zařízeními a celkovou délkou kabelů propojující tato zařízení. Celková délka kabelů jednoho systému nesmí přesáhnout dvacet metrů. [2]

2.2 Standard SCPI

Původně každý výrobce používal svoji sadu příkazů pro komunikaci mezi zařízeními. Firma Hewlett-Packard začala vyvíjet komunikační jazyk TMSL, také známý jako TML. Tento komunikační jazyk se stal oblíbený u vícero tehdejších velkých firem, a tak v roku 1990 byl vytvořen standard SCPI (*Standard Commands for Programmable Instrument)*, který stojí na tomto jazyce. [3]

Snahou toho standardu je snížit počet používaných příkazů, což vede nejen ke zkrácení potřebného času vývoje aplikace, ale i k snadnější programové přenositelnosti. [3]

Díky standardizaci je možné použít ke komunikaci různé typy sběrnic a různé druhy fyzických vrstev. Tato skutečnost umožňuje vytvořit mimo jiné adaptér USB-GPIB, který mimo jiné umožňuje připojit měřicí přístroj do osobního počítače. Adaptér je zobrazen na obrázku 2.1.

2.3 Programovací jazyk Python

Python je programovací a skriptovací jazyk vytvořený na počátku devadesátých let dvacátého století nizozemským programátorem Guidem van Rossumem. Python patří mezi vyšší programovací jazyky, díky tomu se programování blíží lidskému pohledu na problematiku, což umožňuje snadnější programování pro lidi s menším množstvím programátorských zkušeností. [2]

I přes to, že Python může být pomalejší nežli jiné programovací jazyky, tak nabízí i několik výhod, dále jsou uvedeny některé z nich. Kód psaný v Pythonu má velice podobnou jazykovou skladbu jako anglický jazyk. Obvykle je možné napsat daný program na méně řádků, než by bylo možné v jiných programovacích jazycích. Jazyk Python je dostupný zdarma a má k dispozici velké množství knihoven, které jsou lehce dostupné. Python je objektově orientovaný, což usnadňuje práci při práci na větších projektech. Pomocí Pythonu se poměrně jednoduše dá vytvořit grafické uživatelské prostředí s velkým množstvím funkcí. Díky svým výhodám se lze naučit programovat v Pythonu rychleji než v jiných programovacích jazycích. Silnou stránkou je také rozsáhlá *open-source* komunita Pythonu, která poskytuje velké množství knihoven a frameworků.

Následně jsou přiblíženy obecné pojmy modul, knihovna a balík v jazyku Python. Konkrétně požité moduly, knihovny a balíky jsou uvedeny v příslušných kapitolách o realizacích daných pracovišť.

2.3.1 Moduly jazyka Python

Máme-li rozsáhlý program a chceme jej zpřehlednit, jedna z vhodných variant je umístit části kódu do jiných souborů, jinak řečeno modulů. Následně je vložit do hlavního souboru programu. Pro moduly je typické, že mají příponu *.py*.

Moduly se vkládají klíčovým slovem import. Některé moduly mají delší názvy, v těchto případech je možné a vhodné použít alias, pomocí klíčového slova *as*. Chceme-li přistoupit k funkcím či proměnným v modulu, použijeme operátor tečka.

Ve Standardní knihovně jazyka Python (*The Python Standard Library*) se nachází základní předdefinované moduly. Tyto moduly není třeba dodatečně instalovat. Mezi základní moduly patří např.: modul základních konstant, funkcí, Booleovské operátory a základní datové typy. [4]

2.3.2 Knihovny a balíky jazyka Python

Knihovna je označení pro shluk vícero modulů na jednom místě. Příkladem takové knihovny je Standardní knihovna jazyka Python z přechozí kapitoly. Chceme-li použít moduly nebo balíky (*packages*) v nějaké knihovně, je nutné je dodatečně stáhnout prostřednictvím instalačního balíku pro Python (*pip – package installer for Python*). Pojmem balík se tedy označuje vícero modulů v adresářové struktuře. [4; 5]

Použité knihovny

V této kapitole jsou blíže přiblíženy knihovny (neobsažené ve Standardní knihovně jazyka Python) použité v softwarových řešeních této práce.

Knihovna *NumPy* rozšiřuje datové struktury a jejich funkce. Nejpoužívanější je vícedimenzionální pole (ndarray) a matice. Výhodou použití této knihovny je mino jiné rychlejší práce s vícedimenzionálními poli, nežli s datovou strukturou typu Python list. Pomocí této knihovny je také možné ukládat data do souborů různých formátů, mezi které patří např. komprimovaný binární soubor s koncovkou *.npz*. Použitá verze knihovny je 1.26.1. [6]

Knihovna *SciPy* je nástavbou předchozí knihovny *NumPy*. Představuje rozšíření o pokročilé matematickými algoritmy, funkce a konstanty. V této práci je použito rozšíření statistiky pro výpočet regresní křivky, konkrétně lineární regrese, která využívá metodu nejmenších čtverců. Použitá verze knihovny je 1.11.3. [7]

Knihovna *Matplotlib* nabízí možnost vytvářet nejen statické, ale i dynamické a interaktivní grafické zobrazení dat. Knihovna se snaží navázat na matematický procesor Matlab. Mezi často používané grafy z této knihovny patří: spojnicové, bodové a trojrozměrné grafy. Také je možné pro menší projekty ke grafům vytvořit tlačítka s naprogramovatelnými funkcemi. Pro větší projekty je spíše vhodné použít graf z této

knihovny a vložit ho do GUI, které je vytvořeno pomocí specializovaných knihoven, jako je následně uvedená knihovna *PySide6*. Použitá verze knihovny je 3.8.0. [8]

Knihovna *PySide6* umožňuje použít framework *Qt* v prostředí Python. Framework *Qt* je označení pro sadu nástrojů a knihoven, které zjednodušují tvorbu GUI. Tato knihovna obsahuje mnoho různorodých grafických prvků a funkcí. V knihovně se nacházejí funkce pro využití více vláken, což je mimo jiné použito v této práci. Použitá verze knihovny je 6.6.0. [9]

Knihovna *PyVISA* byla vytvořena z důvodu usnadnění programovaní aplikací obsahujících laboratorní přístroje a měřicí systémy. Měřicí přístroje mohou používat různé komunikační protokoly a rozhraní, tudíž by bylo potřeba sehnat vhodné ovladače pro zařízení a používané sběrnice, což představuje vysokou časovou náročnost pro realizaci rozsáhlých měřicích systémů. Z těchto důvodů byla vyvinuta *VISA* (Virtual Instrument Software Architecture), která podstatně zjednodušila práci s přístroji. Použitá verze knihovny je 1.13.0. [10]

Knihovna *OpenCV* má mnoho způsobu využití. Vyniká zejména v oblastech zpracování obrazu a strojového vidění. V této práci je použita ke zpracování obrazu konkrétně k vytváření videa z naměřených dat. Použitá verze knihovny je 4.9.0.80. [11]

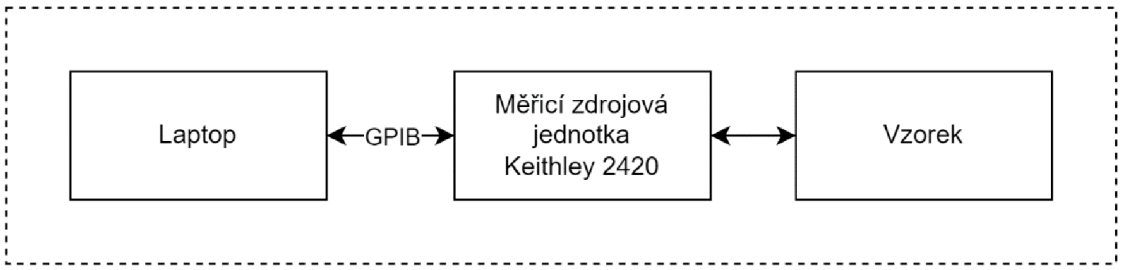
3. PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ ODPORU

V této kapitole bude rozebrán návrh pracoviště tedy pracoviště pro měření elektrického odporu. Cílem tohoto pracoviště je poskytnout zpětnou vazbu o degradaci topné vrstvy vzorku, díky změně elektrického odporu topné vrstvy před a po teplotním cyklování vzorku.

3.1 Návrh pracoviště

Pracoviště se skládá ze tří částí (viz obrázek 3.1). Z laptopu operátora měření, měřicí zdrojové jednotky Keithley 2420, měřeného vzorku a propojovacích vodičů.

Z měřicí jednotky jsou vyvedeny dva vodiče, každý ukončený jednopólovou zástrčkou (banánkem). Na každý konec těchto vodičů byla umístěna krokosvorkami měřicí přístroj je s laptopem propojen pomocí USB – GPIB redukce.



Obr. 3.1 Blokové schéma pracoviště pro měření odporu

3.2 Metodika měření

V následující kapitole jsou přiblíženy možné metodiky měření elektrického odporu pomocí měřicí zdrojové jednotky Keithley 2420. Uvedený přístroj byl vybrán z důvodu schopnosti proměření AV (ampérvoltové) charakteristiky (požadavek konzultanta), kromě jiných standardních metod: dvouvodičová a čtyřvodičová metoda.

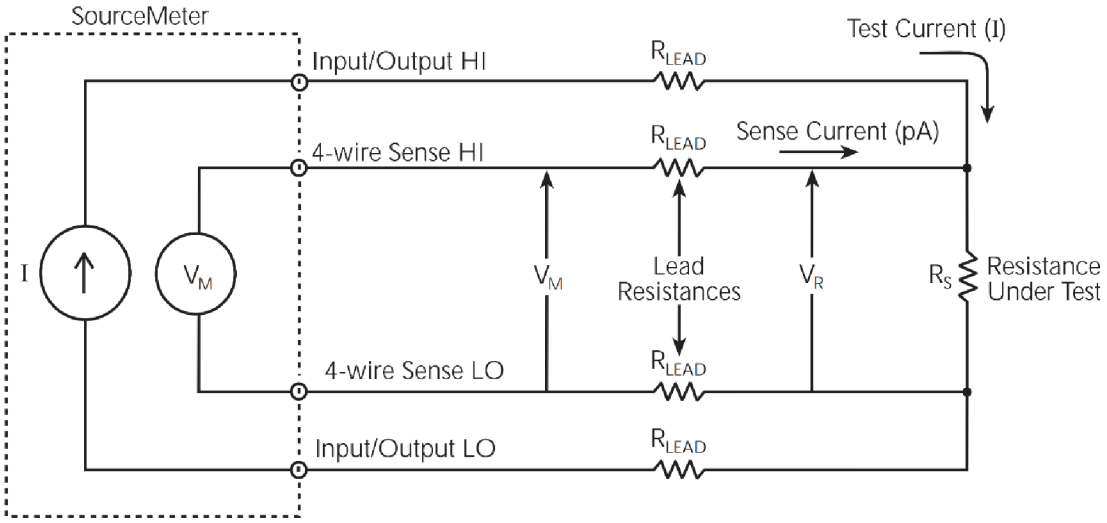
Elektrický odpor dodávaných vzorků se obvykle pohybuje okolo 4 Ω. Konzultantem byl stanoven požadavek na přesnost měření elektrického odporu v řádu desetin ohmů Ω.

Dalším požadavkem konzultanta byla možnost měřit AV charakteristiku, což obnáší změřit závislost elektrického proudu na elektrickém napětí v definovaném rozsahu 0.1 V až 1 V. Následně metodou lineární regrese proložit naměřená data přímkou. Směrnice této přímky v AV charakteristice odpovídá elektrické vodivosti, z níž je vypočten elektrický odpor.

V manuálu k měřicí zdrojové jednotce Keithley 2420 výrobce udává, že dvouvodičové měření odporu silně nedoporučuje v případě, kdy měřený odporový člen

nedosahuje hodnoty elektrického odporu alespoň 1 kΩ [12]. Na požadavek konzultanta byla tato možnost měření zohledněna v měřicí aplikaci.

Pro případnou potřebu přesnějšího měření byla vybrána možnost čtyřvodičového měření elektrického odporu. Čtyřvodičová metoda spočívá v minimalizaci proudu (*Sence Current*) napěťovou smyčkou, čímž se dosáhne minimalizace úbytku napětí na přívodním vedení téže smyčky (jak dokumentuje schéma na obrázku 3.2).



Obr. 3.2 Obvod čtyřvodičové metody měření elektrického obvodu [12]

3.3 Hardware

V této kapitole jsou uvedeny bližší informace o použitém přístroji Keithley 2420 a dodatečném hardwaru využitého při měření.

3.3.1 Přístroj Keithley 2420

Pro měření elektrického odporu byla zvolena zdrojová měřicí jednotka Keithley 2420 (viz obrázek 3.3), která sama o sobě umožňuje měření elektrického odporu nejen čtyřvodičovou metodou, ale i z AV charakteristiky. [12]

Přístroj je jednokanálový, což značí schopnost měřit pouze jeden signál v jednom okamžiku. Dále se jedná o čtyř-kvadrantový přístroj, to umožňuje v zdrojovém módu dodávat i záporné elektrické napětí nebo záporný elektrický proud. V měřicím módu přístroj dokáže měřit jak kladné, tak záporné elektrické napětí či proud.

Výrobce udává maximální napěťový rozsah 60 V, proudový rozsah 3 A, výkonový rozsah 60 W. Je možné nastavit limitaci dodávaného napětí na ± 63 V a dodávaného proudu na ± 3,15 A.

Přístroj je možné ovládat manuálně či vzdáleně. Pro vzdálenou správu je možné využít dvou rozhraní, IEEE-488 (GPIB) nebo RS-232. Nelze používat obě rozhraní

současně. V případě použití GPIB je nutné nastavit unikátní adresu, z výroby je nastavena na 24.

Rozhodujícím faktorem pro výběr GPIB byla snadná dostupnost redukce GPIB-USB.

Obr. 3.3 Čelní panel měřicí zdrojové jednotky Keithley 2420

V případě potřeby je také možné elektrický odpor změřit pomocí laboratorních přístrojů z druhého pracoviště. Jedná se o přístroje Agilent 34410A a Agilent 34411A. I přes to, že pro měření s těmito přístroji není primárně počítáno, je tato možnost zohledněna ve výsledném softwarovém řešení.

3.3.2 Příslušenství

Na základě experimentů bylo zjištěno, že připojení běžně používaných nízko výkonových krokosvorek (s cca 3 mm rozevřením čelistí) k měděným elektrodám na výšku vzorku (cca 5 mm) není vhodné. Důvodem je snadné sklouznutí krokosvorek z měděných elektrod. Proto byly použity krokosvorky s větším rozevřením čelistí (30 mm). Dále je potřeba elektricky odizolovat krokosvorky od vrstvy substrátu, aby nedošlo k vzájemnému elektrickému propojení krokosvorek. Z tohoto důvodu jsou mezi substrát a krokosvorky vloženy elektricky nevodivé podložky z tepelně odolné keramiky.

Dalším komponentem pracoviště jsou dva duté pravidelné čtyřboké komolé jehlany o obdélníkové podstavě (bez plochy podstavy) z elektricky nevodivé a teplotně odolné keramiky, které jsou použity z důvodu zamezení pohybu vzorku během měření.

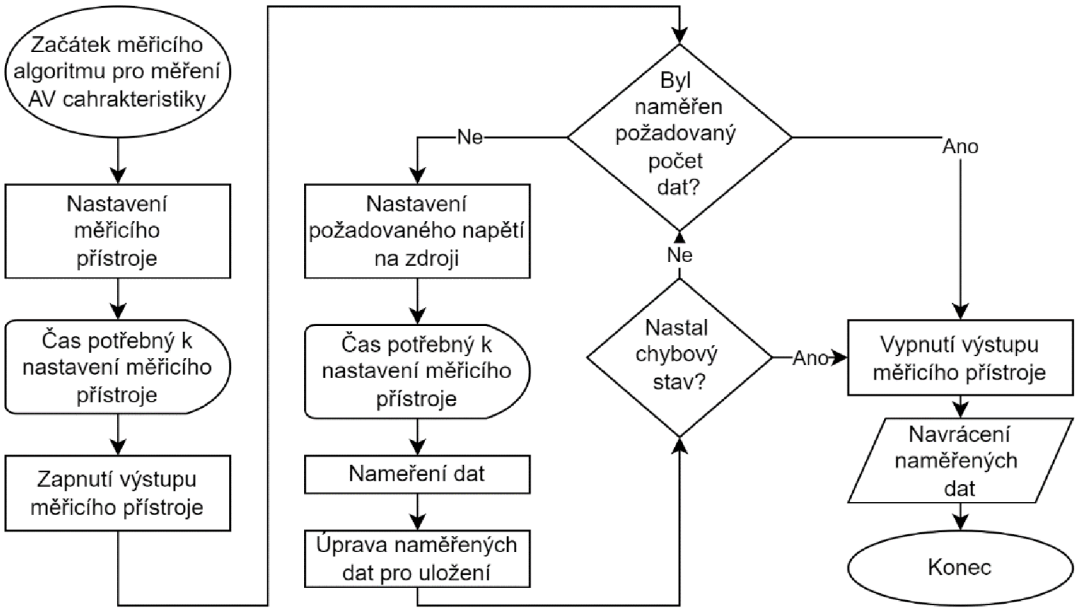
Popsané řešení způsobu kontaktování vzorku je znázorněno na obrázku 3.4.

Obr. 3.4 Fotografie připojení vzorku na pracovišti pro měření odporu

3.4 Měřicí algoritmus

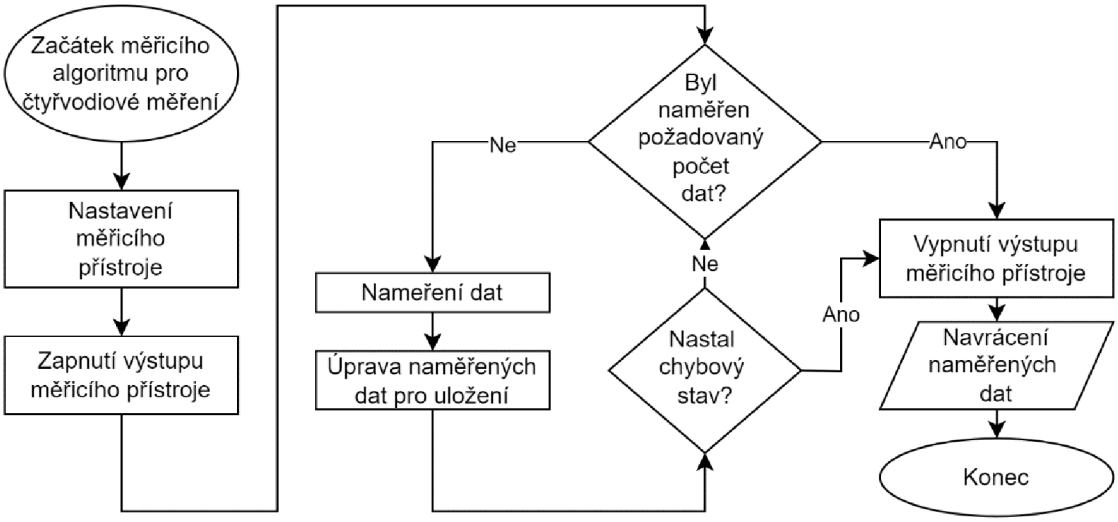
Navržený měřicí algoritmus spočívá v nastavení daného přístroje, naměření potřebných dat a vyhodnocení/zobrazení výsledků. Před začátkem provádění měřicího algoritmu je dle zadaných parametrů o druhu požadovaného měření a použitého měřicího přístroje vybrán příslušný předpřipravený algoritmus.

Vývojový diagram měřicího algoritmu pro AV charakteristiku je znázorněn na obrázku 3.5. Přístroje Keithley 2420 se v režimu měření AV charakteristiky chová jako napěťový zdroj při současném měření elektrického napětí a proud v automatického rozsahu. Jednotka je nastavena do módu kompenzace offsetu, proudová ochrana je nastavena na 1 A a je určen pevný počet měření na 15 od 0.1 V do 1 V.



Obr. 3.5 Měřicí algoritmus pro AV charakteristiku

Pro metodu čtyřvodičového měření elektrického odporu je algoritmus znázorněn na obrázku 3.6. V tomto režimu je zvolen typ měření elektrického odporu s automatickým rozsahem (jednotka je nastavena do režimu čtyřvodičového měření). I v tomto režimu je výstupní hodnota elektrického odporu získána zprůměrováním 30 opakovaně naměřených hodnot.



Obr. 3.6 Měřicí algoritmus pro čtyřvodičovou metodu

3.5 Popis realizace pracoviště

Pracoviště bylo úspěšně sestaveno a zprovozněno dle výše popsaného návrhu. Následuje popis softwarového řešení, zjištěná realizační problematiky včetně jejího řešení.

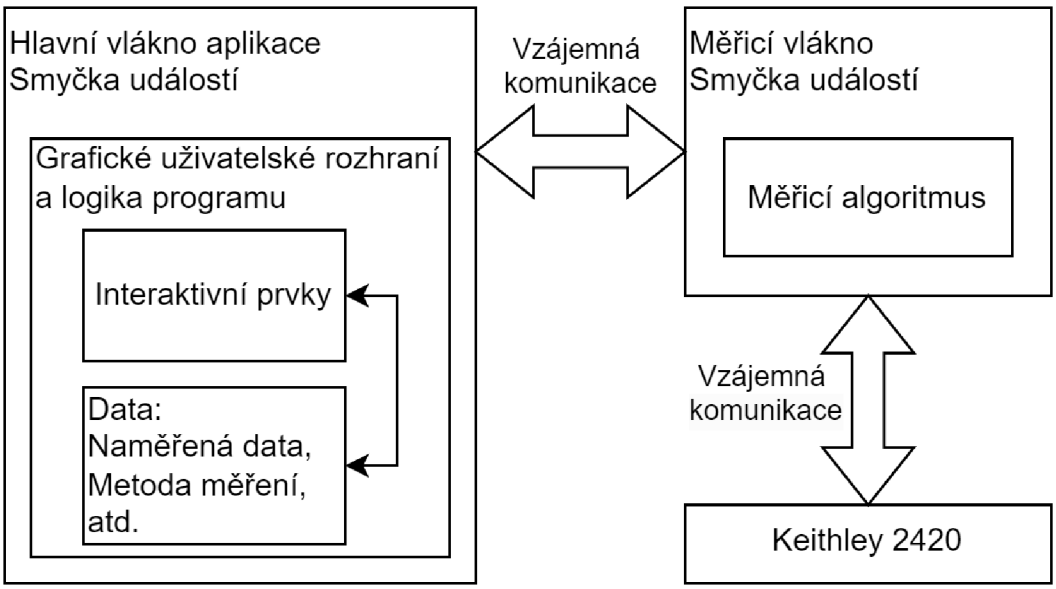
3.5.1 Software

V této části bude podrobněji popsána struktura vytvořené aplikace, grafické uživatelské rozhraní a použité knihovny.

Cílem realizované aplikace bylo naměřit požadovaná data a následně je přehledně zobrazit. Na aplikaci jsou kladeny tyto nároky: uživatelsky přívětivé grafické rozhraní, přehledné zobrazení naměřených dat, výběr metody měření, možnost uložení naměřených dat ve formě obrázku a souboru s daty.

Struktura aplikace

Pro spuštění a běh aplikace, tedy pro chod procesu, je potřeba nejméně jedno vlákno. Pod pojmem vlákno je možné si představit pracovní jednotku, která dokáže provádět úkony samostatně, tedy nezávisle na ostatních vláknech. Struktura aplikace je znázorněna na obrázku č. 3.7. [13]



Obr. 3.7 Blokové schéma struktury aplikace pracoviště pro měření odporu

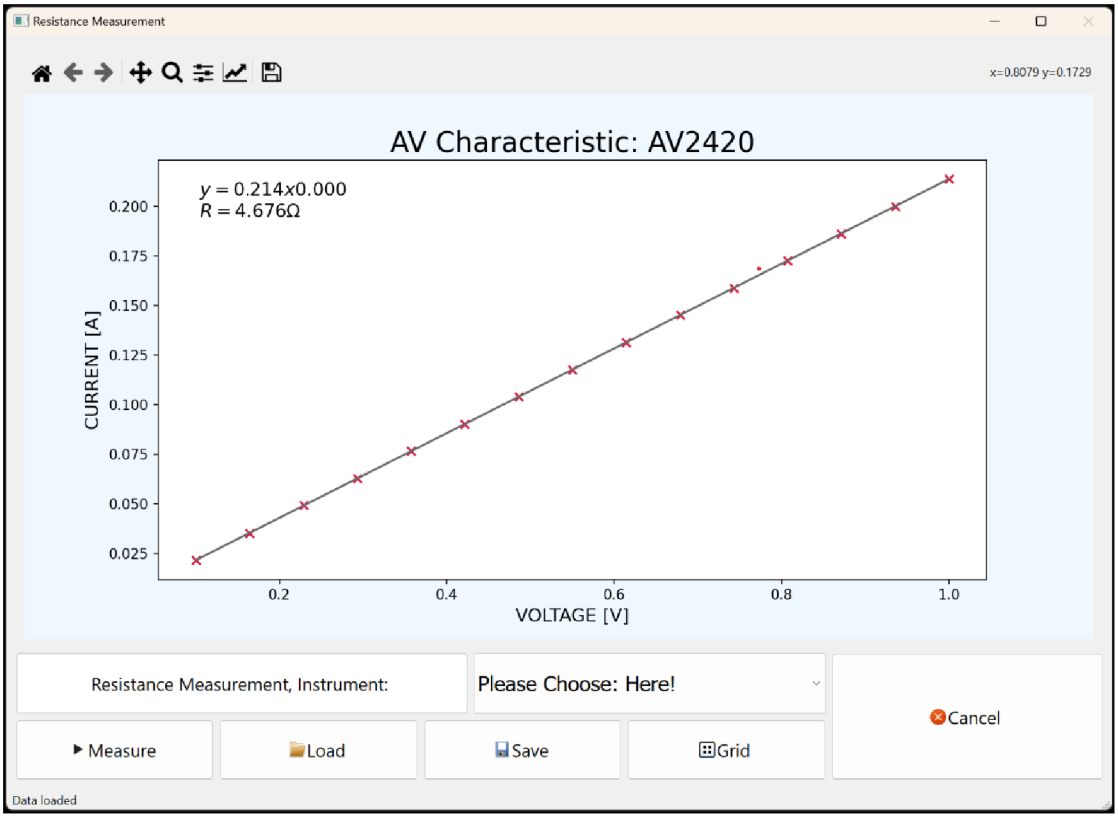
Aplikace se po stránce procesu skládá ze dvou vláken. V hlavním vláknu běží stěžejní část programu, tedy smyčka událostí. Smyslem smyčky událostí je zachytávat a patřičně obsluhovat vzniklé události. Typickým příkladem události je stisknutí tlačítka v rámci grafického uživatelského rozhraní. V druhém vláknu se provádí měřicí algoritmus.

Použití druhého vlákna souvisí pouze s měřicím algoritmem. V případě, kdyby měřicí algoritmus nebyl v samostatném vlákně, tak by došlo k znatelnému prodloužení odezvy grafického uživatelského rozhraní na zásah uživatele (zamrznutí obrazovky).

Aplikace se skládá ze čtyř modulů. Prvním modulem je *StartApp.py* přes který je spouštěn hlavní funkční soubor *GUI.py*. Zmíněné oddělení spouštěcího kódu od funkčního je čistě z důvodu přehlednosti. V modulu *GUI.py* se nachází kód nejen pro grafické uživatelské rozhraní, ale i kód pro požadovanou a správnou funkci aplikace. Z důvodu zkrácení nutného počtu řádků kódu v modulu *GUI.py* a udržení stejného stylu pro použité interaktivní prvky, jako jsou tlačítka, rozbalovací seznamy atd., byl vytvořen modul *MakeWidget.py*, který obsahuje třídy nejpoužívanějších interaktivních komponent. Modul *CDevice.py* byl vytvořen čistě z důvodu zpřehlednění kódu. Tímto modulem byl oddělen kód pro práci s měřicím přístrojem. Příkazy pro ovládání měření je možné najít v manuálu k danému měřicímu přístroji. Obvykle se skládají ze zkratek anglických termínů. Těchto zkratek je mnoho, kvůli zlepšení čitelnosti a zjednodušení psaní kódu, byly nejpoužívanější funkce uzavřeny do funkcí. V rámci tohoto modulu se nachází funkce např. *MeasureAVCharacteristic()*, v níž je obsažen vlastní algoritmus měření AV charakteristiky popsaný vývojovým diagramem na obrázku 3.5.

Grafické uživatelské rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní aplikace (GUI) pro měření elektrického odporu je znázorněno na obrázku 3.8. Je zde také vidět přehledné zobrazení naměřených dat AV charakteristiky.



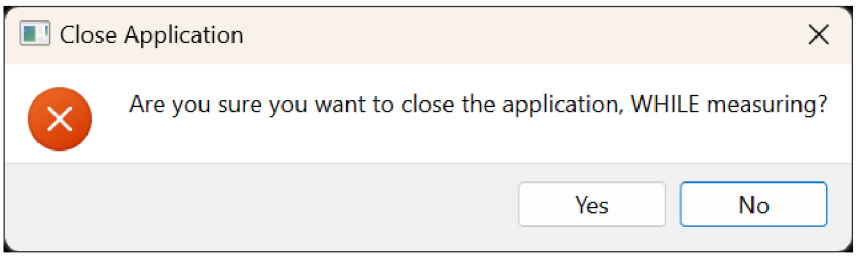
Obr. 3.8 GUI aplikace pracoviště pro měření odporu s ukázkou naměřené AV charakteristiky

Ústředním bodem GUI je interaktivní graf sloužící ke grafické interpretaci naměřených dat. Tento graf je vytvořen pomoci knihovny *matplotlib*, která se snaží transformovat grafy z prostředí Matlab do prostředí Pythonu. S tím souvisí nástrojová sada v levém horním rohu. Neobsahuje všechny nástroje jako v prostředí Matlab, ale obsahuje funkce jako jsou např. posun, přiblížení, uložení plátna a změna velikosti a barvy čar. Také je možné si na obrázku 3.8 povšimnout, že se v pravém horním rohu se interaktivně zobrazují souřadnice polohy kurzoru myši v grafu.

Dále se v grafickém uživatelském rozhraní nachází rozbalovací seznam, ze kterého je možné vybrat o jaký typ měření se bude jednat, tj. o měření AV charakteristiky, dvouvodičového nebo čtyřvodičového měření. Primárně je měření nachystáno pro měření pomocí Keithley 2420, ale aplikace umožňuje i použití jiných dostupných přístrojů (Agilent 34410A a Agilent 34411A).

V posledním řádku se nachází tlačítko „Measure“, které spouští měření. Bližšímu popisu měření se věnuje kapitola 3.4.

Po stisknutí tlačítka „Close“ dojde k řízenému ukončení aplikace. Aby bylo možné pokaždé dosáhnout řízeného ukončení aplikace, bylo uživateli znemožněno stisknutí vypínacího tlačítka v pravém horním rohu obrazovky. V případě, že probíhá měření a uživatel se rozhodne ukončit aplikaci, tak se objeví vyskakovací okno, jež je znázorněno na obrázku 3.9. V případě potvrzení vypnutí aplikace dojde k zastavení měření, ukončení měřicího vlákna a k následnému vypnutí aplikace.



Obr. 3.9 Vyskakovací okno pro potvrzení vypnutí aplikace

Dalším tlačítkem je tlačítko „Grid“, které v interaktivním grafu zobrazí/vypne mřížku.

Ve vytvořeném GUI se také nachází tlačítka „Save“ a „Load“. Tato tlačítka spolu úzce souvisí. Tlačítko „Save“ uloží aktuálně provedené měření, jehož data jsou zobrazena v interaktivním grafu, do komprimovaného binárního souboru. Soubor je uložen na vybrané místo pomocí vyskakovacího výběrového okna. Do tohoto souboru se také ukládají informace o typu měření, počtu změřených hodnot, získané hodnoty elektrického proudu, elektrického napětí anebo elektrického odporu. Po stisku tlačítka „Load“ a následném vybrání komprimovaného binárního souboru pomocí dialogového okna dojde k načtení vybraného souboru a zobrazení naměřených hodnot v interaktivním grafu.

3.5.2 Související problematika

V rámci provedených měření byla zjištěna skutečnost, že po teplotním cyklování se na měděných elektrodách vytváří oxidy mědi. Tyto oxidy zvyšují elektrický odpor měděných elektrod, což má vliv na měření elektrického odporu. Jako nejjednodušší řešení se ukázalo opatrné seškrabání těchto oxidů v předem určené oblasti pomocí keramické podložky využívané k elektrické izolaci substrátu vzorků od použitých krokosvorek. Vzhledem k pórovitosti měděných elektrod není možné plně odstranit tuto oxidovou vrstvu, ale je možné odstranit dostatečné množství na to, aby výsledný vliv na měření odporu byl zanedbatelný. Tento fakt byl testován postupným oškrabáváním, drobným posunem krokosvorek a následným změřením elektrického odporu. Tloušťka vrstvy oxidů je úměrná maximální teplotě, na kterou byl vzorek nažhaven. Zmíněné testování

mapuje tabulka 3.1, která uvádí hodnoty změřeného elektrického odporu po postupném odstranění vzniklých oxidů po rozehřátí vzorku na 350 °C.

Tab. 3.1 Měření elektrického odporu po postupném odstranění vzniklých oxidů

Číslo měření [-]	1	2	3	4	5	6	7
Hodnota el. odporu R [Ω]	4,968	4,861	4,793	4,765	4,764	4,764	4,764

V rámci návrhů možných řešení proběhla konzultace s pracovníky CEITEC. Na základě provedené konzultace byla představena možnost pokusit se navařit přívodní vodič přímo na měděnou elektrodu. Díky tomuto řešení by bylo nejen možné minimalizovat riziko poškození měděných elektrod oškrabáváním oxidů, ale i možnost dodávat elektrický výkon do topné vrstvy jiným způsobem nežli za pomocí krokosvorek.

Pravá část obrázku 3.10 mapuje vzorek po navaření přívodních vodičů. Jak je možné si povšimnout, tak v rámci technologického procesu navařování došlo nejen k nánosu sazí na vzorek, ale k i destrukci nanesených vrstev. Po orientačním zahřátí tohoto vzorku na průměrnou teplotu topné vrstvy 100 °C došlo k mechanické deformaci v některých oblastech vzorku. Po vychladnutí vzorku po časovém úseku tří dnů došlo ke spontánnímu odloupnutí vrstev v některých oblastech. Tuto skutečnost dokumentuje pravá část obrázku 3.10.

Na základě provedeného experimentu s navařením přívodních vodičů bylo jednoznačně prokázáno, že ubírat se tímto směrem není prozatím možné. Tudíž výsledným řešením je tudíž opatrné seškrabávání oxidů pomocí keramické podložky.

Obr. 3.10 Fotografie vzorku po navaření přívodních vodičů (vlevo), vzorek po odloupnutí vrstev (vlevo)

4. PRACOVIŠTĚ PRO TEPLOTNÍ CHARAKTERIZACI

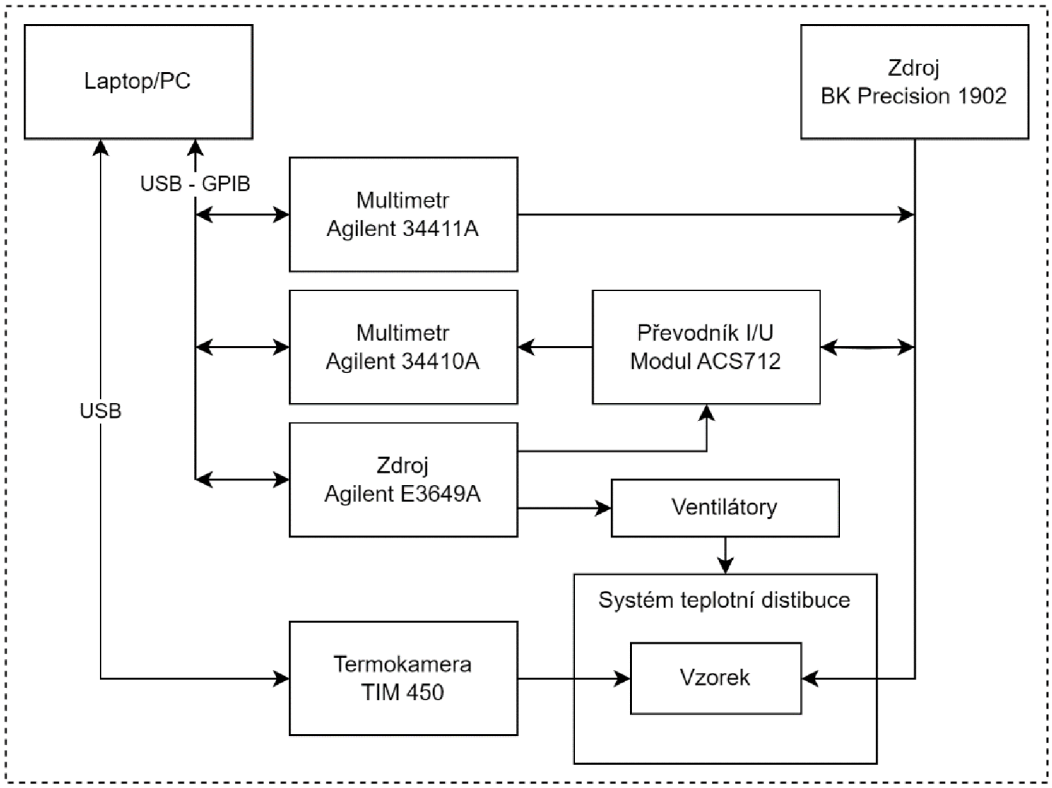
V této kapitole bude rozebrán návrh pracoviště pro teplotní charakterizaci vzorků, tedy pracoviště pro měření prostorově rozlišené teploty v čase. Cílem tohoto pracoviště je ověřit, zdali polovodičová topná vrstva na vzorku vydrží předpokládanou opakovanou specifikovanou zátěž, tedy částečně nasimulovat provozní podmínky topných vrstev.

Ze získaných dat by mělo být možné posoudit vhodnost designu vzorků a chemického složení topných vrstev.

Mezi požadavky kladené na toto pracoviště patří možnost rozehřívat vzorky až do 500 °C, rozehřívat i vzorky o větších rozměrech (více v kapitole 4.3.2), měřit průběh prostorově rozlišené teploty (jedná se o přibližnou hodnotu teploty) a měřit elektrický proud a napětí na vzorku během procesu zahřívání.

4.1 Návrh pracoviště

Navržené pracoviště se skládá z desíti částí, blokové schéma je na obrázku 4.1. V dalším textu bude stručně vysvětlen princip jednotlivých částí.



Obr. 4.1 Blokové schéma pracoviště pro teplotní charakterizaci

Výpočetní jednotkou může být laptop nebo osobní počítač. Na žádost konzultanta byla do tohoto pracoviště zvolena varianta počítačové sestavy s integrovaným

monitorem. Do tohoto zařízení vstupují nejen standardní uživatelské periferie, ale také dostupná termokamera přes USB rozhraní a síť vzájemně propojených laboratorních přístrojů přes USB-GPIB redukci.

Zdrojem dodávaného výkonu potřebného k dostatečnému ohřevu vzorku je přístroj BK Precision 1902 [14]. Multimetr Agilent 34411A je určen k měření elektrického napětí na vzorku [15]. Převodník transformuje pomocí modulu ACS712 elektrický proud na elektrické napětí, které je posléze měřeno multimetrem Agilent 34410A [15]. Agilent E3649A je zdrojem elektrické energie sloužící k napájení převodníku, případně je ho možné využít také k napájení ventilátorů [16; 17].

Systém tepelné distribuce slouží nejen k teplotní izolaci okolí od zahřívaného vzorku, ale i k rozprostření teploty do většího objemu a plochy za účelem rychlejšího pasivního odvodu tepla po měření.

4.2 Metodika měření

Navržená metodika spočívá v zahřívání vzorku elektrickým výkonem přes krokosvorky, které jsou znázorněny na obrázku 4.8. S rostoucím dodávaným výkonem roste teplota vzorku a mění se prostorově rozlišená teplota. Vzorek se postupně zahřívá do předem určených teplot, konkrétně jde o tyto teploty: 150 °C, 250 °C, 350 °C, 500 °C. Průběh zahřívání spočívá ve skokových změnách elektrického proudu (zdroj elektrické energie pracuje v režimu konstantního proudu). V blízkém okolí požadované teploty se zastaví proces postupného zvyšování dodávaného elektrického výkonu. Následně se po předem stanovenou dobu drží konstantní dodávaný proud, což simuluje provozní stav topné vrstvy. Po uplynutí této doby začíná proces skokového snižování dodávaného výkonu obdobně jako je tomu během zahřívání. Samotné měření končí ve chvíli, když se s dodávaným elektrickým proudem dojde na nejnižší možnou nastavitelnou hodnotu zdroje, což je 0,1 A.

Skokové změny dodávaného výkonu jsou nastavovány operátorem ručně na čelním panelu příslušného zdroje. Ruční ovládaní bylo zvoleno z důvodu velkého množství předem neočekávaných poruchových událostí během měření. Vzhledem k tomuto množství není možné předem specifikovat měřicí algoritmus, který by byl schopen bezpečně reagovat na všechny možné děje. Díky ručnímu ovládání je zajištěna neustálá přítomnost a dohled operátora na probíhající měření, což zároveň zvyšuje obecnou bezpečnost pracoviště (elektrotechnickou, požární atd.).

Měření elektrického napětí na vzorku probíhá prostřednictvím připojených krokosvorek. Maximální měřitelné napětí je 60 V, což je dáno limitem zdroje elektrické energie.

Měření elektrického proudu probíhá přes převodník, důvody této volby jsou uvedeny v kapitole 4.3.1. Maximální měřitelný proud je 15 A, opět se jedná o limitaci daného zdroje.

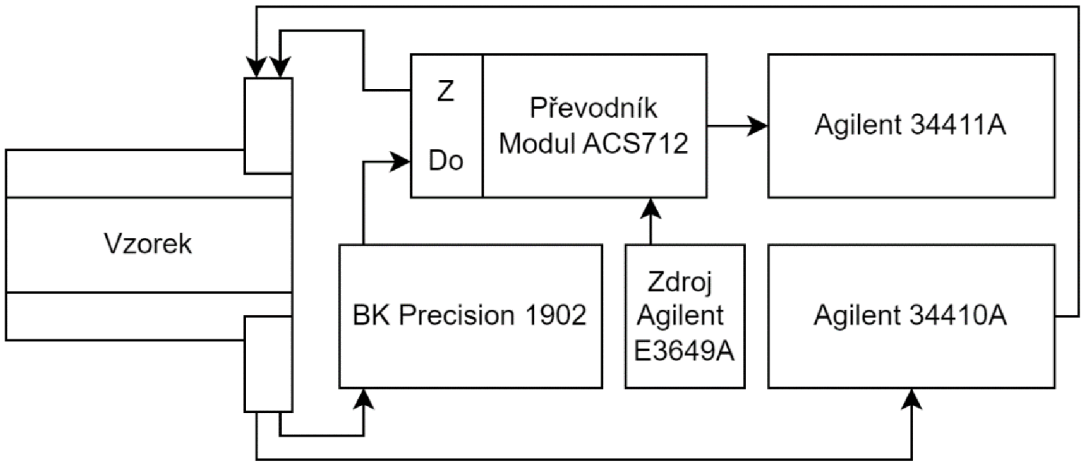
Hlavním cílem pracoviště je zaznamenat šíření prostorově rozlišené teploty topné vrstvy, k čemuž je využívána dodaná termokamera. Není tedy nutné se specificky zabývat problematikou měření přesné reálné teploty. V případě potřeby měřit reálné teploty je možné použít specializovaného příslušenství s definovanou emisivitou viz kapitola 4.5.2.

V rámci metodiky měření jsou ukládána naměřená data jednotlivých pořizovaných snímků z termokamery, které jsou spolu s dalšími doplňkovými daty průběžně ukládány s požadovanou periodou okolo 100 ms ve specificky navrženém výstupním formátu. O následném zpracování naměřených dat pojednává kapitola 7.

Hodnoty elektrického napětí a proudu jsou aktualizovány s požadovaným časovým rozestupem cca 150 ms, snímky z termokamery s žádanou frekvencí 10 snímků za sekundu.

Výsledná délka měření je závislá na předem zvolených parametrech, jako je časový interval skokové změny řízeného elektrického proudu a doba setrvání na požadované teplotě. Obvyklá doba měření se pohybuje ve vyšších desítkách minut. Časový interval skokové změny proudu při zahřívání je plánován na 60 s a při řízeném ochlazování 90 s. Velikost skokové změny dodávaného proudu je předběžně plánována na 0,3 A. Doba setrvání na maximální požadované teplotě bude v rozsahu 10 minut až 20 minut.

Na obrázku 4.2 je vidět schéma zapojení přístrojů k měřenému vzorku.



Obr. 4.2 Schéma zapojení přístrojů k měřenému vzorku na daném pracovišti

4.3 Hardware

Následuje podrobnější specifikace použitého přístrojového vybavení včetně potřebného příslušenství.

4.3.1 Použité Přístroje

Jako zdroj dodávaného elektrického výkonu byl vybrán spínaný zdroj BK Precision 1902 viz obrázek 4.3. Byl vybrán z důvodu schopnosti dodávat největší možný výkon z dostupného přístrojového vybavení laboratoří UFYZ. Tento zdroj disponuje napěťovým rozsahem 1 až 60 V a proudovým rozsahem 0 až 15 A. Z uvedených rozsahů je možné odvodit maximální hodnotu dodávaného výkonu, která činí 900 W. Dvěma knoflíky se zvlášť nastavuje hodnota elektrického napětí a proudu. Pro vzdálenou správu je možné využít analogového rozhraní, tento přístroj neumožňuje využít rozhraní GPIB. Přístroj disponuje několika ochranami. [14]

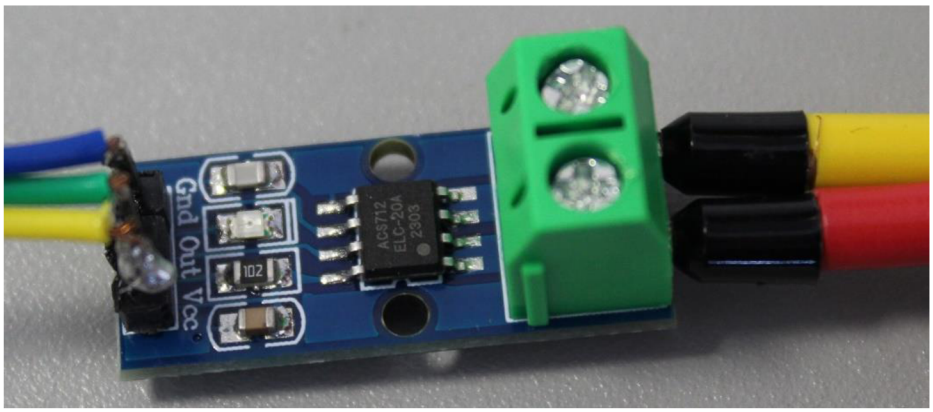
Obr. 4.3 Čelní panel zdroje BK Precision 1902

Pro měření elektrického napětí na vzorku byl vybrán multimetr Agilent 34410A, pro měření elektrického proudu přes převodník byl zvolen multimetr Agilent 34411A. Oba přístroje jsou zobrazeny na obrázku 4.4. Klíčovým faktorem při výběru výše uvedených multimetrů byla možnost vzdálené správy pomocí rozhraní GPIB. Rozdíl mezi multimetry Agilent 34411A a Agilent 34410A je zejména v maximálním množství měření (odečtů) za sekundu a velikosti paměti. [15]

Obr. 4.4 Čelní panel multimetrů Agilent 34410A/11A

Z důvodu nedostatečného proudového rozsahu (max 3 A) u výše uvedených měřicích přístrojů Agilent 34410A/11A byly prozkoumány další možnosti měření stejnosměrného proudu. Na základě vlastního průzkumu a konzultace s pracovníky UAMT (Ústav automatizace a měřicí techniky na FEKT VUT v Brně) bylo vybráno řešení pomocí převodníku s modulem ACS712 (konkrétní součástka má označení ACS712ELCTR-20A-T). Převodník je zobrazen na obrázku 4.5. Mezi hlavní výhody patří mimo jiné: bezkontaktní měření stejnosměrného proudu pomocí Hallovy sondy, široký rozsah hodnot měřitelných proudů (± 20 A) a nízké pořizovací náklady. Převodní poměr je 100 mV/A. Na výstupu převodníku se nachází polovina napájecího napětí (2,5 V) v případě, kdy je měřený proud roven 0 A. [18; 19]

Alternativou ke zmíněnému proudovému senzoru z dostupného vybavení na UFYZ byl klešťový adaptér PeakTech3400. Po podrobné analýze byl tento přístroj prohlášen za nevyhovující, kvůli příliš velké chybě měření na nejmenším rozsahu (400 A). Další možností bylo použít přesnější, ale zároveň dražší převodník proudu na napětí, jako je např. LEM HX 05-P/SP2. Nicméně při volbě tohoto převodníku by bylo potřeba jej umístit na vhodnou desku plošných spojů (nutnost dodatečného návrhu a výroby). Vzhledem k možnosti zakoupit již hotový modul s plně dostačujícími vlastnostmi byl zvolen převodník s modulem ACS712.



Obr. 4.5 Fotografie proudového snímače s modulem ACS712

Pro napájení zvoleného převodníku a napájení ventilátorů byl zvolen zdroj Agilent E3649A viz obrázek 4.6. Byl vybrán z důvodu plně dostačujících vlastností a lehké dostupnosti. Tento zdroj má dva nezávislé výstupy. První je použit pro napájení ventilátorů, druhý pro napájení převodníku. Každý výstup může pracovat v jednom ze dvou rozsahů. První rozsah umožňuje dodávat až 35 V a 1,4 A, druhý rozsah až 60 V a 0,8 A. Pro vzdálenou správu je možné použít opět rozhraní GPIB. [16]

Obr. 4.6 Čelní panel zdroje Agilent E3649A

Pro bezkontaktní měření prostorově rozlišené teploty a jejího vývoje v čase byla určena termokamera TIM 450, která je zobrazena spolu se stojanem a vyměnitelnými objektivy na obrázku 4.7. Dodaný stojan dosahuje výšky cca 283 mm. Jedná se

infračervenou termokameru snímající vlnové délky v rozsahu 7,5 až 13 µm. Termokamera dosahuje rozlišení 382 na 288 pixelů. Celkový rozsah měřitelných teplot je -20 °C až 900 °C. Tento rozsah se dělí do tří dílčích měřicích rozsahů: (-20 až 100) °C, (0 až 250) °C, (150 až 900) °C. Nejvyšší možná snímkovací frekvence je 80 Hz. Napájení a přenos informací zprostředkovává rozhraní USB. K termokameře je dodáván software *TIM Connect* s mnoha specifickými funkcemi. Tento software umožňuje mimo jiné konfigurovat kameru, sledovat snímky z termokamery v reálném čase, nahrávat videa atd. Vzhledem k velikosti nejběžněji dodávaných vzorků a požadavku na minimální rozlišitelný detail vzorku byl jednoznačně vybrán objektiv se zorným polem 38 °. [20]

Obr. 4.7 Fotografie termokamery TIM 450 s objektivy

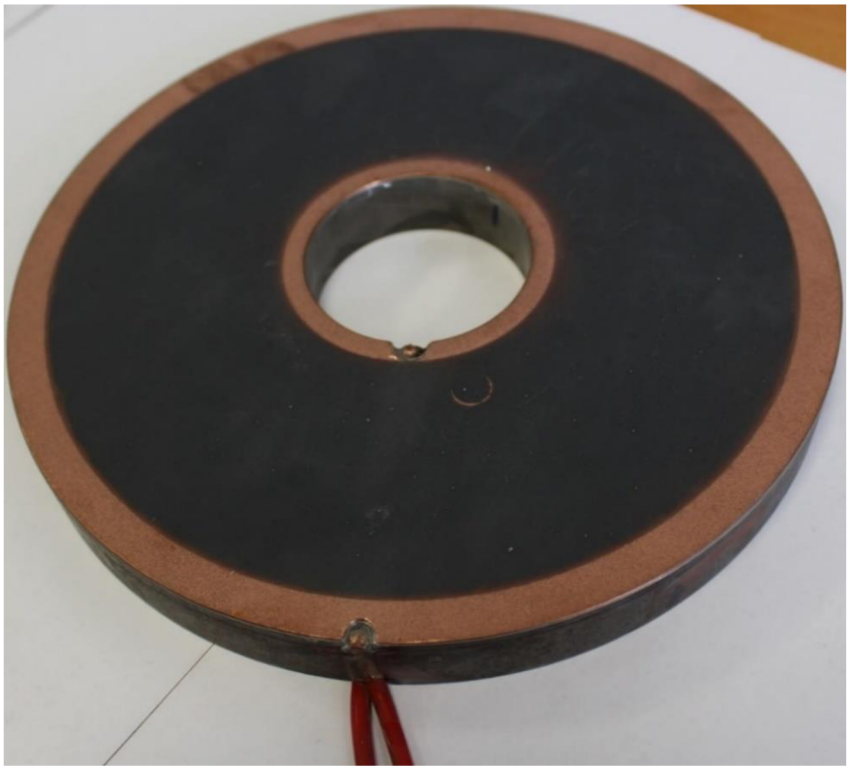
4.3.2 Příslušenství

Mezi další příslušenství patří dva duté pravidelné čtyřboké komolé jehlany o obdélníkové podstavě (bez plochy podstavy) z elektricky nevodivé a teplotně odolné keramiky, které jsou taktéž využity v pracovišti pro měření odporu. Z tohoto pracoviště byly také použity elektricky nevodivé podložky z tepelně odolné keramiky.

Na tomto pracovišti jsou dále použity krokosvorky schopné působit větší silou stisku viz obrázek 4.8. Pro vedení elektrické energie je použit izolovaný silový vodič s lanovým jádrem o průřezu 1,5 mm^2.

Obr. 4.8 Fotografie připojení vzorku na pracovišti pro teplotní charakterizaci

Kvůli potřebě měřit po delší časové úseky (vyšší desítky minut) a měřit i vzorky různých tvarů a velikostí viz obrázek 4.9, byl navrhnut systém tepelné distribuce. Model tohoto systému je na obrázku 4.10. Pro sestavení modelu byl použit software SOLIDWORKS 2023 [21].



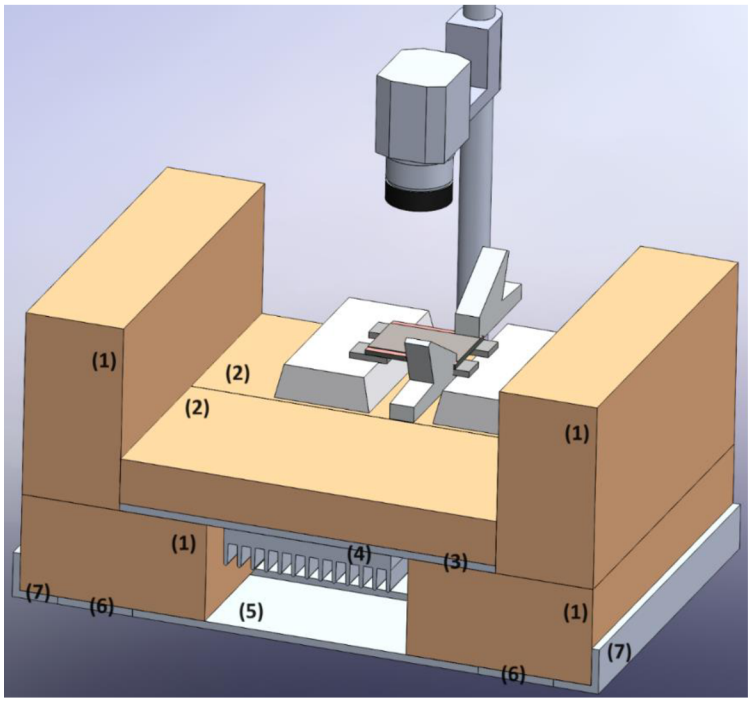
Obr. 4.9 Kotouč s nanesenou polovodičovou topnou vrstvou, průměr 20 cm, hmotnost 7 kg

Systém tepelné distribuce je navržen z dostupných i zakoupených komponentů UFYZ pro účely této práce. Tato struktura je sestavena z komponentů uvedených v tabulce 4.1. Celkové rozměry daného systému jsou (390x193x250) mm viz Příloha C -.

Systém tepelné distribuce se skládá ze dvou oblastí. První oblast se nachází na šamotových deskách (2), kde je umístěno příslušenství s měřeným vzorkem. Tato oblast je dostatečně velká k tomu, aby umožnila i měření rozměrného kotouče z obrázku 4.9. Druhou částí je oblast představující tunel pod hliníkovým chladičem, která je na jedné straně zakončena ventilátory pro potřebu rychlého odvodu tepla. Hliníková deska (3) a hliníkový chladič (4) jsou spolu spojeny šesti šrouby M4 o délce 40 mm s příslušnými matkami a podložkami.

Tab. 4.1 Tabulka komponentů systému tepelné distribuce

Komponent [-]	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Počet kusů [-]
Šamotová cihla (1)	250	123	65	4
Šamotová deska (2)	250	125	30	2
Hliníková deska (3)	250	200	5	1
Hliníkový chladič (4)	200	111	25	1
Hliníková deska (5)	230	80	5	1
Hliníková deska (6)	250	50	5	1
Hliníkový L profil (7)	30	30	5	1



Obr. 4.10 Model systému tepelné distribuce s příslušenstvím a termokamerou na pracovišti pro teplotní charakterizaci

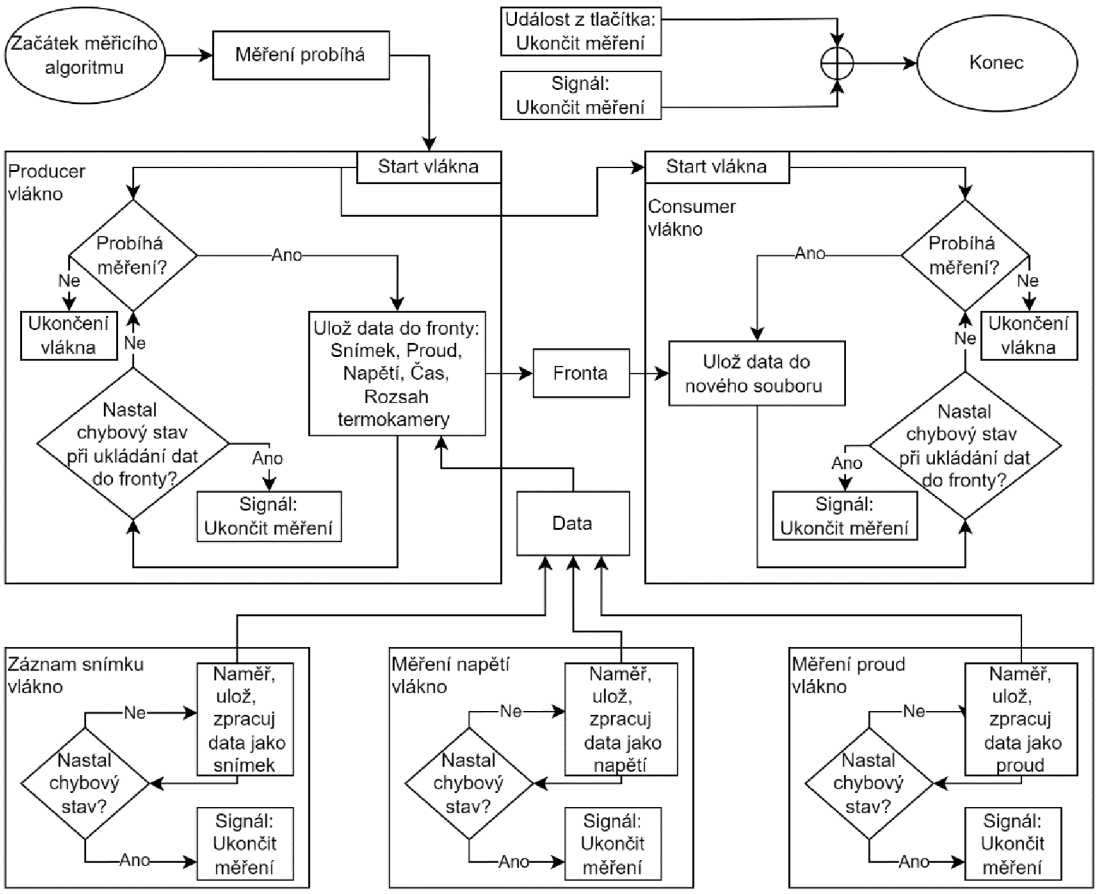
Díky návrhu systému tepelné distribuce bylo nutné sestavit nový stojan pro termokameru, jelikož s termokamerou původně dodávaný stojan je příliš nízký. Pro nový stojan byla použita hliníková deska o rozměrech (230x200x5) mm a hliníková tyč o průměru 20 mm a výšce 500 mm. Hliníková deska s tyčí spojena šroubem M4 o délce 50 mm.

Ventilátory jsou umístěny mezi šamotovou (2) a hliníkovou deskou, které je součástí stojanu termokamery.

Během prováděných měření vzorků byla změřena (termočlánkem K) maximálních teplota keramických mnohostěnů (84 °C) a šamotových desek v blízkosti těchto mnohostěnů (59 °C). Vzhledem k nedokonalosti teplotního spojení termočlánku a měřených komponentů je pravděpodobné, že reálné teploty jsou o něco vyšší.

4.4 Měřicí algoritmus

Navržený měřicí algoritmus viz obrázek 4.11 je ovlivněn strukturou aplikace, která je blíže popsána v kapitole 4.5.1. Pořízení snímků termokamerou, měření napětí a měření proudu přes převodník je umístěno do oddělených vláken kvůli struktuře aplikace.



Obr. 4.11 Měřicí algoritmus pro pracoviště pro teplotní charakterizaci

Multimetr Agilent 34411A měří napětí s požadovanou periodou 100 ms při nastaveném napěťovém rozsahu 100V. Přístroj pracuje v módu kompenzace offsetu.

Přístroj Agilent 34410A měří napětí z převodníku s žádanou periodou 100 ms. Přístroj má nastaven napěťový rozsah 10 V, protože maximální měřitelné napětí je 5 V. Také je nastavena delší doba (dvě periody síťového napětí) integrace A/D převodníku z důvodu nepředvídatelného a občasného změření nečekaně malé hodnoty napětí. Přístroj opět pracuje v módu kompenzace offsetu. Kvůli převodníku je nutné provést přepočet udávaným výrobcem, dle vztahu (4.1).

$$I = (U - offset) \cdot 10, \tag{4.1}$$

kde I představuje hodnotu skutečného proudu v A, U představuje změřené výstupní napětí převodníku ve V, offset představuje hodnotu napětí, při které je měřený proud roven 0 A. Offset je změřen po spuštění aplikace zprůměrováním deseti naměřených hodnot napětí.

Snímky termokamerou jsou měřeny v podobě 2D matice hodnot o velikosti 382 na 288 prvků. Tuto matici je nutné přepočíst dle vztahu udávaného výrobcem viz (4.2). Frekvence záznamu snímků je 10 Hz.

$$M = (N - 1000)/10\ , \tag{4.2}$$

kde M představuje přepočítanou matici hodnot, N představuje naměřenou matici hodnot.

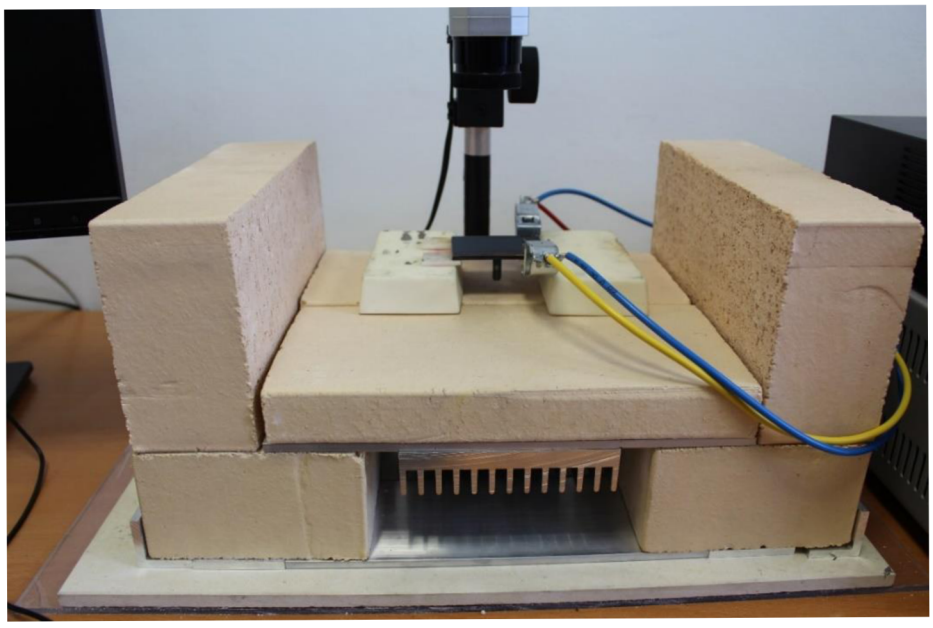
Mezi základní parametry nastavení termokamery při spuštění patří: počáteční rozsah, počet snímků za sekundu, použitý objektiv. Dále je možné nastavit několik funkcí, např. korekci teplotního driftu detektoru, korekci radiálního zkreslení atd. O dalších funkcích a parametrech je možné se dočíst v dokumentaci. [22; 23]

Zdrojová jednotka Agilent E3649A pro kanál určený k napájení převodníku má nastaveno výstupní napětí 5 V a 18 mA (dle požadavků převodníku).

4.5 Popis realizace pracoviště

Pracoviště bylo úspěšně sestaveno a zprovozněno (viz obrázky 4.12 a 4.13) dle výše popsaného návrhu. Následuje popis softwarového řešení, zjištěná realizační problematiky včetně jejího řešení.

Obr. 4.12 Realizované pracoviště teplotní charakterizace



Obr. 4.13 Detail realizovaného systému teplotní distribuce

4.5.1 Software

V této části bude podrobněji popsána struktura vytvořené aplikace, grafické uživatelské rozhraní a použité knihovny.

Cílem realizované aplikace bylo vytvořit GUI, které bude zobrazovat měřená data a umožní jejich záznam. Na aplikaci jsou kladeny tyto nároky: uživatelsky přívětivé grafické rozhraní, zobrazení měřených dat v reálném čase, uložení naměřených dat, uložení aktuálně zaznamenaného snímku z termokamery.

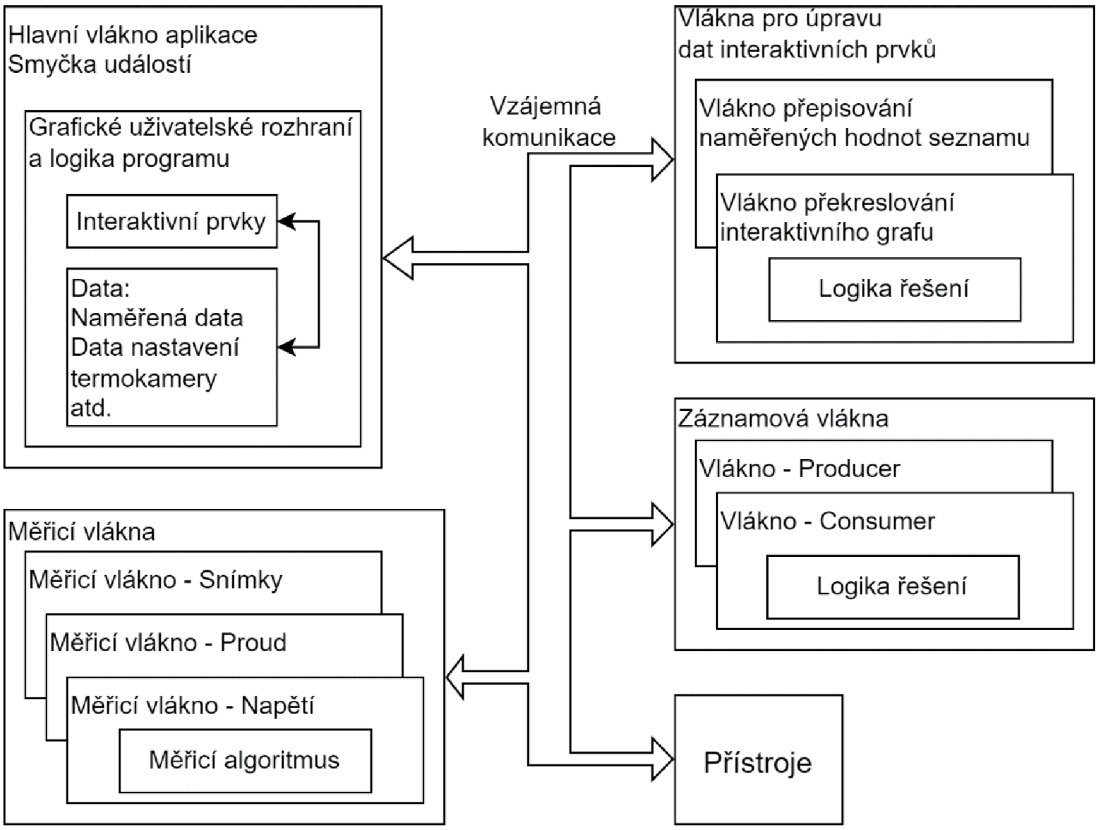
Struktura aplikace

Aplikace svou strukturou připomíná aplikaci z pracoviště pro měření odporu, neboť obsahuje hlavní vlákno s GUI a odděleným měřicím algoritmem (do jiných vláken). Měření požadovaných veličin začíná spuštěním aplikace a je rozděleno do různých vláken, čímž jsou zajištěny požadované periody měření a nezamrznutí GUI.

Po spuštění aplikace se začínají měřit požadované veličiny a zobrazovat snímky z termokamery, což umožňuje nastavení/konfiguraci termokamery, vzorků.

Po stisku tlačítka „Start Measure“ dochází k periodickému ukládání naměřených dat pomocí struktury *producer-consumer*. Důvodem zvolení této struktury bylo zajištění uložení všech dat s požadovanou periodou.

Procesy pro úpravu dat interaktivních prvků (aktualizace zobrazovaného snímku termokamery a výčtu aktuálních hodnot měřených elektrických parametrů) jsou od hlavního vlákna odděleny kvůli nezanedbatelné výpočetní náročnosti.



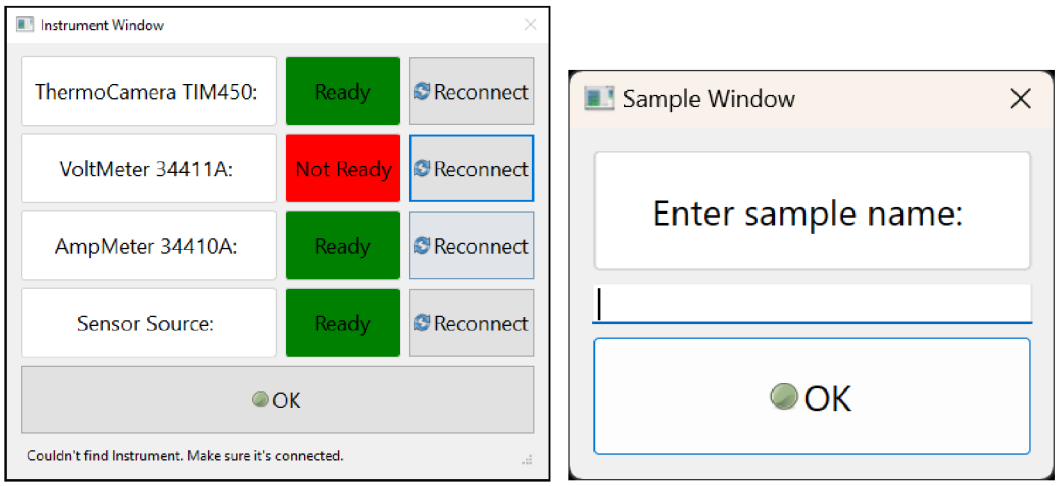
Obr. 4.14 Blokové schéma struktury aplikace pracoviště pro teplotní charakterizace

Aplikace se skládá ze šesti modulů a tří souborů. První čtyři moduly jsou principiálně totožné jako u aplikace pro měření odporu (*StartApp.py, GUI.py, MakeWidget.py a CDevice.py*). Pátý modul *CArea.py* je věnován implementaci zájmových oblastí (níže rozebrány). Šestý modul *CCameraIR.py* obsahuje funkce pro práci s termokamerou. Tyto funkce jsou navázány na Easy API (*Application programming reference*), které podporuje jazyk Python [23]. Tento modul byl inspirován projekty na GitHub [24; 25]. Prvním souborem je *generic.xml*, díky kterému se nastavují základní parametry termokamery při spuštění [23]. Druhým souborem je *Formats.def* obsahující základní parametry termokamery (nesmí být pozměněny), dodané výrobcem. Posledním třetím souborem je *libirimager.dll* dynamická knihovna obsahující jednotlivé funkce pro práci s termokamerou.

Další nezbytnou součástí jsou kalibrační soubory termokamery a objektivu, obsahující zejména kalibrační konstanty. Tyto soubory není možné samostatně stáhnou. Po stáhnutí a spuštění oficiální aplikace *TIM Connect* dojde ke zjištění typu připojené termokamery a následnému stažení potřebných kalibračních souborů [22]. Při použití Easy API dojde k automatickému vyhledání těchto souborů a ke kalibraci používaných komponent.

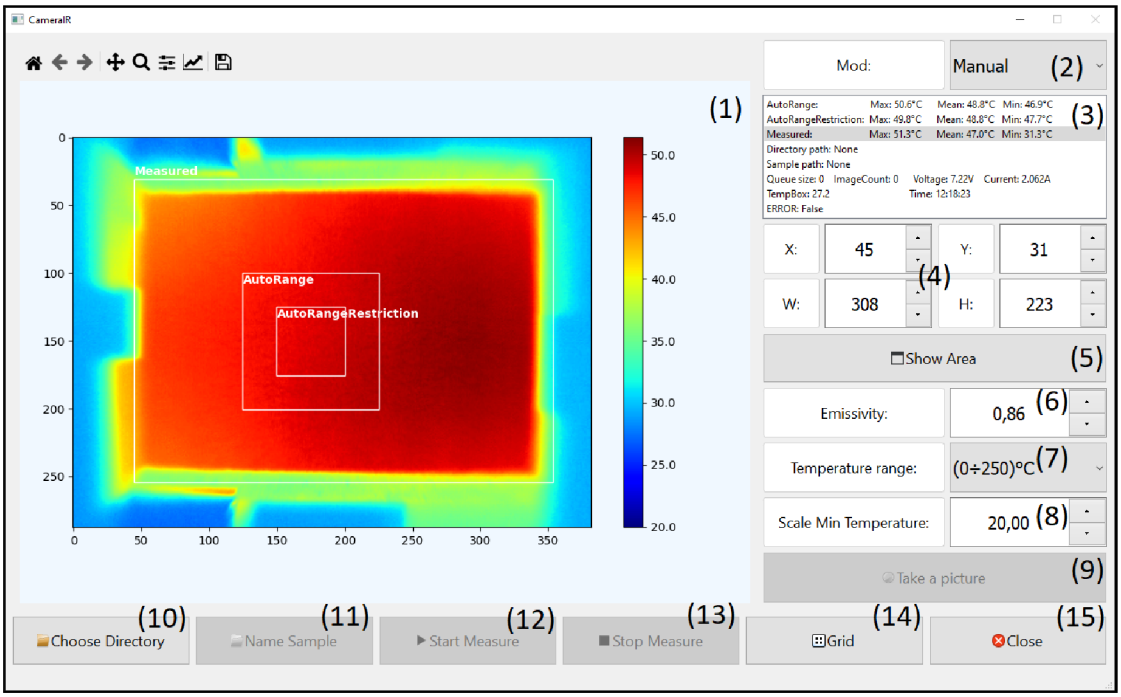
Grafické uživatelské rozhraní

Po spuštění aplikace dochází k zobrazení okna pro ověření funkční komunikace přístrojů prostřednictvím rozhraní GPIB viz obrázek 4.15. V případě problémů je možné pomocí tlačítek „Reconnect“ se pokusit o znovu navázání vzájemné komunikace. Po úspěšném navázání vzájemné komunikace dochází k patřičnému nastavení přístrojového vybavení. Hlavním účelem tohoto okna je zdůraznit funkční komunikaci mezi přístroji a aplikací. Po potvrzení tlačítkem „OK“ dochází k uzavření tohoto okna a následnému zobrazení hlavního okna měřicí aplikace.



Obr. 4.15 Okno pro ověření připojení přístrojů (vlevo), okno pro zadání názvu vzorku (vpravo)

Po přechodu do hlavního okna měřicí aplikace (viz obrázek 4.16) začíná proces měření. Mimo jiné dochází ke změření offsetu převodníku (viz kapitola 4.4), proto je kritické mít nastaven nulový dodávaný elektrický proud zdrojem BK Precision 1902.



Obr. 4.16 Hlavní okno aplikace pracoviště pro teplotní charakterizaci

Ústředním bodem hlavního okna aplikace je interaktivní graf (1) sloužící k zobrazení zaznamenaných snímků termokamerou. Tento graf je vytvořen pomocí knihovny *matplotlib*. Kvůli vhodnému zobrazení naměřených dat jsou snímky obarveny pomocí palety barev „jet“. Tato paleta byla zvolena zejména z důvodu větší barevné rozlišitelnosti ve vyšších oblastech stupnice oproti jiným dostupným paletám. Napravo od zobrazeného snímku z termokamery je zobrazena barevná škála. Také se zde nachází nástrojová sada a ukazatel hodnoty grafu na místě, na které ukazuje kurzor myši.

V pravé horní části se nachází rozsáhlý seznam (3), ve kterém jsou zobrazovány podstatné údaje. Mezi tyto údaje patří: teploty zájmových oblastí, absolutní adresa zvoleného adresáře a adresáře měřeného vzorku, množství prvků ve frontě (*producer-consumer*), číslo aktuálně ukládaného souboru, teplota uvnitř termokamery, aktuální čas, indikace chybového stavu, naměřené napětí a proud.

Do interaktivního grafu jsou implementovány tři zájmové oblasti. Každá oblast je určena polohou počátečního bodu, šířkou a výškou. Cílem první oblasti „Measured“ je zamezit ukládání zbytečných dat během měření. Vnitřkem této oblasti je určena ukládaná část snímaného obrazu. Se zbývajícími oblastmi je spojena implementovaná funkce automatické změny rozsahu termokamery. Pro aktivaci této funkce je nutné z rozbalovacího seznamu (7) vybrat možnost „AUTO“. Druhou oblastí „AutoRange“ se vymezuje ta část snímaného obrazu na základě, které je rozhodnuto o automatické změně rozsahu. Třetí oblastí „AutoRangeRestriction“ je určena případná část obrazu, podle které naopak není rozhodováno o změně rozsahu (má větší váhu nežli oblast „AutoRange“).

Každou z výše uvedených zájmových oblastí je možné v grafu skrýt/zobrazit. Dosažení požadovaného stavu oblasti lze docílit kliknutím na řádek seznamu příslušné oblasti a stisknout tlačítko „Show Area“. Skrytí oblasti „Measured“ nemá vliv na ukládanou část snímku (ukládá se úplná matice hodnot). Skrytí oblasti „AutoRange“ v režimu automatické změny rozsahu termokamery nemá jiný nežli vizuální vliv. Je-li oblast „AutoRangeRestriction“ skryta v režimu automatické změny rozsahu termokamery, tak tato oblast nebude mít žádný vliv na automatickou změnu rozsahu. V případě zájmu je možné tyto oblasti využít pro monitorování teploty v uživatelem nastavených oblastech.

Na žádost konzultanta bylo přidáno oddělení pracovních režimů/módů aplikace. Nastavení daného režimu dovoluje rozbalovací seznam (2). Nachází-li se aplikace v režimu „Manual“ je znemožněno stisknutí tlačítek „StartMeasure“ (12) a „StopMeasure“ (13). V tomto režimu je možné zaznamenat aktuálně zobrazený snímek pomocí tlačítka „Take a picture“ (9). Dále je možné nastavit emisivitu (6), teplotní rozsah termokamery (7), minimální hodnota zobrazované škály (8) a rozměry zvolených oblastí (4). Režim „Automatic“ je věnován automatickému měření a ukládání dat. V tomto režimu je znemožněno měnit rozměry oblastí (4), minimální hodnotu škály (8), emisivitu (7) a zobrazení oblastí (5). V daném režimu je možné spustit/zastavit ukládání dat.

Tlačítko „Grid“ (14) umožňuje zobrazit/skrýt mřížku v interaktivním grafu, což ulehčuje nastavení rozměrů výše uvedených zájmových oblastí.

Je-li aplikace v režimu „Automatic“, tak tlačítky „StartMeasure“ (12) a „StopMeasure“ (13) se zahajuje/ukončuje ukládání dat ve formě komprimovaného binárního souboru.

Navržená adresářová struktura spočívá v několik hlavních adresářích s názvy měření, ve kterých jsou podadresáře jednotlivých vzorků. Tlačítkem „Choose directory“ (10) se vybírá hlavní adresář. Podadresáře jsou vytvářeny po stisku „Name Sample“ (11) prostřednictvím dialogového okna viz obrázek 4.15. Během zadávání názvu vzorku jsou patřičně řešeny běžné stavy: již existujícího názvu, platné vesty atd.

Tlačítko „Take a picture“ (9) ukládá právě zobrazený snímek interaktivním grafem ve formátu *.png* do zvoleného hlavního adresáře. Pokud tento adresář není zvolen, tak není možné stisknout dané tlačítko.

Tlačítko „Close“ (15) řízeně ukončuje aplikaci, aby to bylo možné je uživateli znemožněno stisknutí vypínacího tlačítko v pravém horním rohu. Při požadavku na vypnutí aplikace během ukládání dat (měření) dojde k zobrazení dialogového okna viz obrázek 3.9. V případě potvrzení vypnutí aplikace dojde k zastavení ukládání dat, ukončení podružných vláken a k následnému kontrolovanému vypnutí aplikace.

4.5.2 Související problematika

V rámci metodiky měření je nutné určit, kdy se teplota topné vrstvy blíží k požadované maximální teplotě měřeného teplotního cyklu. Zvažovanými možnostmi bylo: bezkontaktní měření používanou termokamerou (TIM 450), bezkontaktní měření teploměrem Fluke 561 HVACPro [26], kontaktní měření termočlánkem K (teploměr TM-2000 [27]), využití nálepek s definovanou emisivitou (pouze do 300 °C) [28], použití barvy s konstantní emisivitou (nebyla k dispozici). Při výběru bezkontaktního měření by bylo nutné získat co možná nejpřesnější hodnotu emisivity vrstvy a při kontaktním měření by bylo nutné zajistit co nejlepší kontakt termočlánku s topnou vrstvou [29; 30; 31; 31]. Během měření s referenčním teploměrem (termočlánkem) by docházelo k nežádoucímu zakrytí zájmové oblasti topné vrstvy. Na základě vlastního průzkumu, provedených experimentů a konzultace s pracovníky UAMT bylo vybráno řešení v podobě experimentálního odhadu emisivity.

Jeden vzorek z dodané sady byl vyčleněn na tento experiment. Princip experimentu spočíval v připevnění termočlánku (typu K) k topné vrstvě vzorku pomocí kamnářského tmelu (pro lepší teplotní kontakt). Následně byly nastaveny potřebné parametry termokamery (konzultace s výrobcem). Propustnost prostředí byla nastavena na hodnotu jedna, neboť je prostředím vzduch (s propustností optiky je počítáno při výrobě a kalibraci). Pomocí objektivu bylo zaostřeno a danou vrstvu. Vzorek byl postupně pomalu rozehříván dodávaným elektrickým výkonem. Během rozehřívání docházelo k ručnímu nastavování emisivity termokamery, tak aby teplota bodu v blízkém okolí termočlánku (tmelu) byla, pokud možno stejná jako teplota udávaná termočlánkem. Tímto způsobem byl vzorek přiveden na maximální požadovanou teplotu určenou na 500 °C. Po tomto experimentu bylo den vyčkáno na vychladnutí a byl proveden podobný experiment, ale s rozdílným referenčním prvkem, a to s nálepkou o definované emisivitě (výrobce udává 0,95). Nyní byla na termokameře nastavena emisivita 0,95 a poté byl vzorek zahříván. Pokud teplota na nálepce byla shodná s referenční teplotou (z minulého experimentu), tak teplota vedle nálepky byla měněna na referenční teplotu (změnou emisivity). Při shodě teplot nastavená emisivita odpovídá emisivitě topné vrstvy. Zaznamenané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2. Pro potřeby experimentu byla použita výše uvedená oficiální aplikace *TIM Connect*.

Tab. 4.2 Experimentálně zjištěné hodnoty emisivity topné vrstvy

Referenční teplota t [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Emisivita ε [-]	0,95	0,88	0,87	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,86	0,85
Emisivita z nálepek ε_n [-]	0,95	0,90	0,86	0,85	0,85	-	-	-	-	-

Výrobce použitých nálepek udává, že jsou vhodné pro měření do 300 °C. Při 280 °C nálepka začala viditelně měnit barvu do žluta za současného mírného vydávání kouře. Nálepky s definovanou emisivitou nejsou vhodné pro měření prostorově rozlišené teploty topných vrstev, jelikož díky svým rozměrům a tepelné kapacitě zakryjí detail této teploty.

Vzhledem k přesnosti termokamery (± 2 °C v rozsahu teplot do 100 °C nebo ± 2 % z měřené hodnoty v rozsahu teplot nad 100 °C) je emisivita v tabulce 4.2 pouze orientační.

Na základě předchozího experimentu byl určen odhad emisivity pro určení maximální požadované teploty při teplotním cyklování. Opět je nutné zmínit, že požadavkem nebylo měřit přesnou hodnotu teploty, ale průběh prostorově rozlišené teploty. Pro měření prostorově rozlišené teploty byla nastavena emisivita na hodnotu 0,86. Tato hodnota je nastavena při všech teplotních cyklech z důvodu porovnatelnosti jednotlivých vzorků.

Během výše uvedeného experimentu byla stanovena chyba odhadu emisivity při nejvyšší teplotě 500 °C. Při této teplotě odpovídá změna emisivity o jednu setinu přibližně změně teploty o 19 °C. Konzultant byl seznámen s velikostí chyby způsobené nepřesným nastavením emisivity a prohlásil danou chybu za přijatelnou pro účely těchto měření. V případě potřeby měření přesnějších teplot je vhodné využít barvu pro termografické aplikace s definovanou konstantní hodnotou emisivity.

V rámci provedených měření nedošlo k viditelným změnám na objektivu vlivem vysoké teploty při vzdálenosti 30 cm od měřeného vzorku.

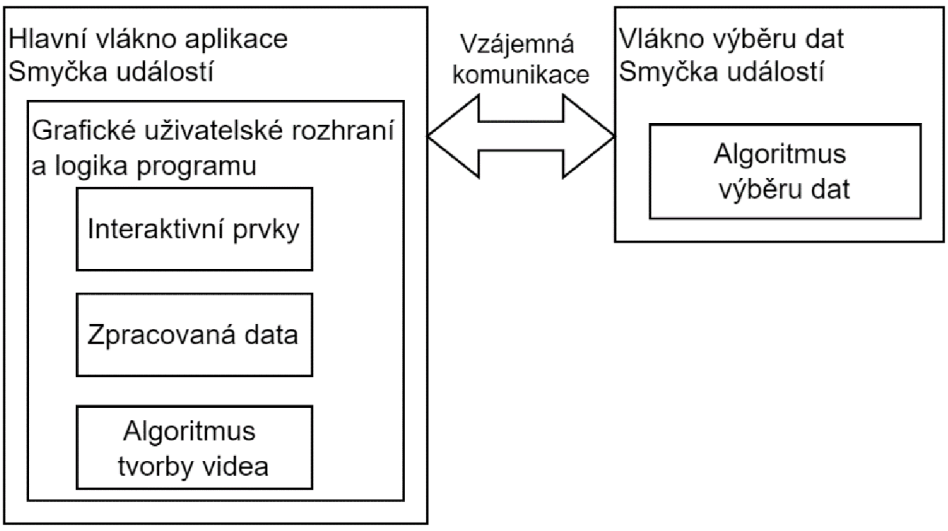
5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V této kapitole bude rozebrána aplikace pro základní zpracování, vyhodnocení naměřených dat a demonstrace funkčnosti experimentálního pracoviště na dodaných vzorcích.

Hlavním požadavkem na aplikaci je zpracování naměřených dat (nižší jednotky GB a vyšší tisíce souborů) z pracoviště pro teplotní charakterizaci do vhodné formy pro vykreslení konzultantem definovaných grafů. Prvním grafem je závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření viz obrázek 5.4. Druhým grafem je závislost vypočteného odporu na průměrné teplotě během celého měření viz obrázek 5.5. Třetím grafem je závislost minimální, maximální a průměrné teploty na čase měření viz obrázek 5.6. S těmito grafy souvisí další požadavek na možnost výběru oblasti zájmu zaznamenaných snímků, pro kterou jsou výše uvedené teploty zobrazeny v grafech. Posledním požadavkem je možnost vytvoření videa z naměřených snímků uživatelem vybrané oblasti zájmu.

5.1 Aplikace pro automatické zpracování dat

Obdobně jako v předchozích aplikacích došlo k rozdělení do více vláken viz obrázek 5.1. Algoritmus výběru dat bylo možné přesunout do dalšího vlákna. Algoritmus tvorby videa nebylo možné z implementačních důvodů přesunout z hlavního vlákna aplikace.

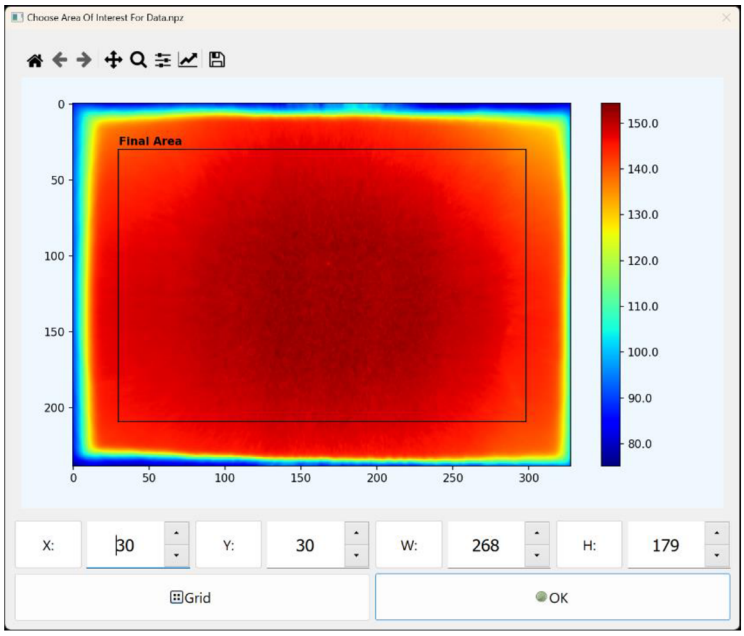


Obr. 5.1 Blokové schéma struktury aplikace pro zpracování dat

Aplikace se skládá ze čtyř modulů, které jsou principiálně totožné jako u aplikace pro teplotní charakterizaci (*StartApp.py, GUI.py, MakeWidget.py a CArea.py*).

Algoritmus výběru dat začíná výběrem zájmové oblasti („Chosen Area“) pomocí dialogového okna (viz obrázek 5.2). Na to navazuje postupné procházení všech souborů

s naměřenými daty a ukládání dat využitelných pro tvorbu grafů do vnitřní paměti programu. Následně jsou tato data uložena do komprimovaného binárního souboru *Data.npz*. Mezi využitelná data pro tvorbu grafů patří nejen napětí, proud, čas, ale i minimální, průměrná a maximální teplota vybrané zájmové oblasti.



Obr. 5.2 Okno pro výběr zájmové oblasti

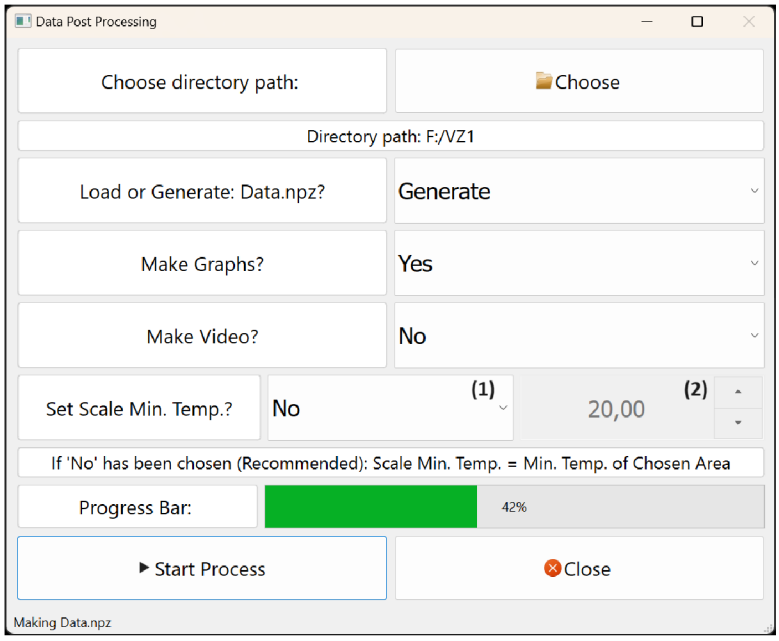
Algoritmus pro tvorbu videa také začíná výběrem zájmové oblasti jako u předchozího algoritmu. Následně dochází k načtení dat ze souboru s naměřenými daty. Z tohoto souboru se vezmou potřebné informace vhodné k zobrazení v rámci videa (proud, napětí a čas). Následně je vytvořen graf s přidanými popisky, který je vzápětí uložen ve formátu *.png*. Tento soubor je následně načten a sekvenčně zpracován do takto vytvářeného videa. Jedná se o poměrně zdlouhavý proces, na který není kladen žádný požadavek na časovou náročnost.

Z naměřených hodnot elektrického napětí a proudu jsou vypočteny hodnoty elektrického odporu a výkonu. Při výpočtu odporu dochází ke vzniku impulzů (viz obrázek 6.3) v místech skokových změn proudu. Z důvodu lepší přehlednosti jsou hodnoty odporu zprůměrovány pomocí konvolučního filtru viz obrázek 5.5. Při změně rozsahu termokamery dochází k znehodnocení měřených snímků po proměnlivý časový úsek (obvykle 4 s až 35 s). Z hlediska zpracování dat po změně rozsahu dochází k odstranění hodnot teploty následujících 60 s (s rezervou) a následnému spojení navazujících dat úsečkou (žádost konzultanta) viz obrázek 5.6. Průběh závislosti odporu na průměrné teplotě je složen ze dvou částí. Tyto části jsou rozděleny začátkem procesu skokového snižování dodávaného výkonu z důvodu přehlednosti. Uživatel může vytvořit požadované grafy pro různé oblasti (definováno oblastí zájmu viz obrázek 5.2)

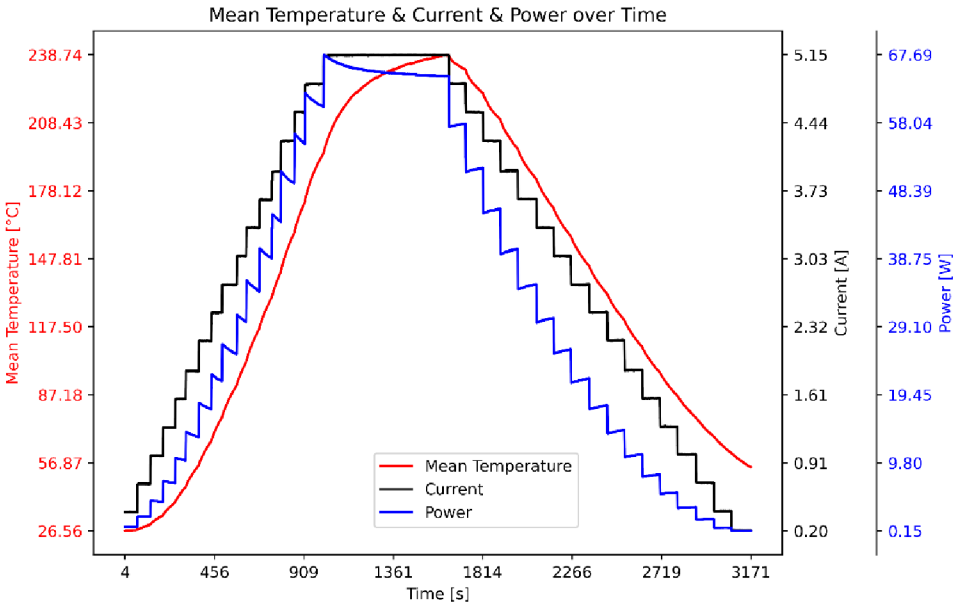
zaznamenaných snímků, proto je nanejvýš vhodné uvádět společně s těmito grafy i vybranou oblast viz obrázek 6.5.

Grafické uživatelské rozhraní

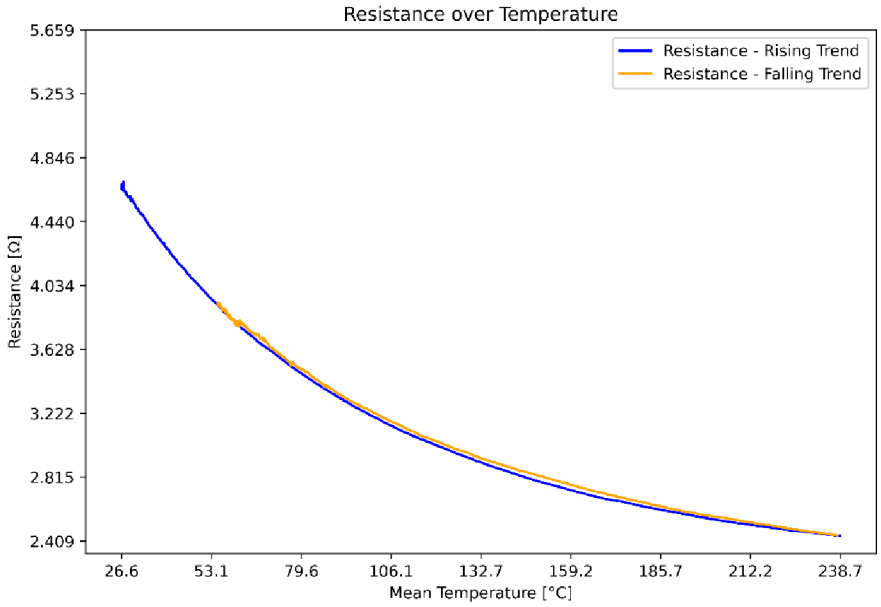
Hlavní okno aplikace je znázorněno na obrázku 5.3. GUI obsahuje mnoho interaktivních prvků. Mnoho z těchto prvků jsou na první pohled intuitivní, takže budou blíže rozebrány jen některé. V případě požadavku na vytvoření videa je vhodné věnovat pozornost rozbalovacímu seznamu (1). Tento seznam rozhoduje, zdali uživatel nastaví pomocí číselníku (2) vlastní spodní hranici barevné škály snímků ve videu. Tlačítkem „Start Process“ se zahajuje provádění zadaných úkonů. Tlačítko „Close“ funguje obdobně jako v předchozích aplikacích.



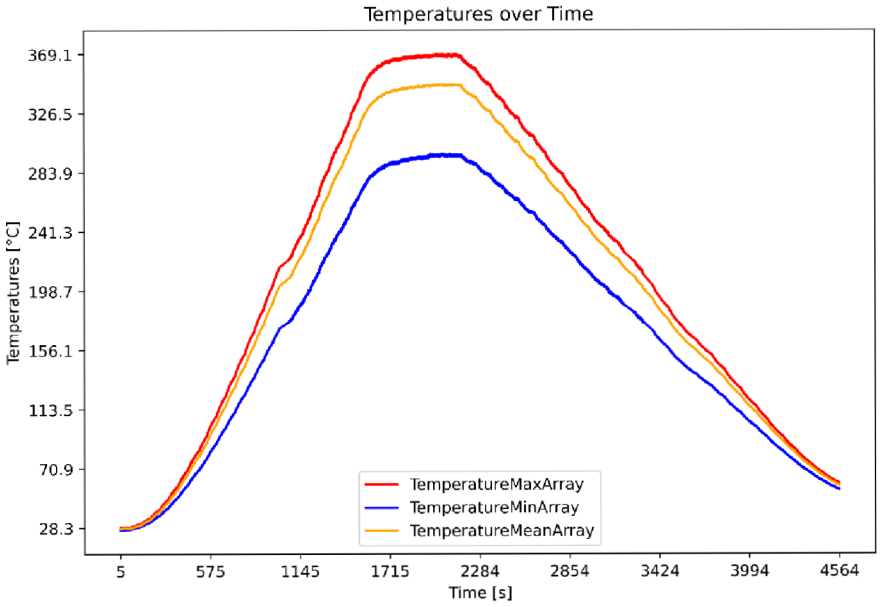
Obr. 5.3 Hlavní okno aplikace pro zpracování dat



Obr. 5.4 Příklad grafu závislosti průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření



Obr. 5.5 Příklad grafu závislosti odporu na průměrné teplotě



Obr. 5.6 Příklad grafu závislosti min., max. a průměrné teploty na čase měření

5.2 Měření dodaných vzorků

Během vypracování této práce byly změřeny nízké jednotky vzorků druhého designu. Na UFYZ bylo dodána sada čtyř vzorků. Jeden vzorek byl použit pro experiment odhadu emisivity a další dva vzorky musely být změřeny před konečnou formou pracoviště pro teplotní charakterizaci. Z těchto důvodů funkčnost systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev bylo možné kompletně demonstrovat pouze na jednom vzorku X4. Výsledky demonstračního měření jsou prezentovány v této kapitole a v přílohách udávaných tabulkou 5.1.

Vzorek X4 je znázorněn na obrázku 1.3 (vpravo). Měření se skládalo ze čtyř teplotních cyklů. V tabulce 5.1 jsou uvedeny hodnoty elektrického odporu po teplotním cyklování. Z téže tabulky je na první pohled patrné, že po čtvrtém teplotním cyklu došlo ke znatelnému nárustu elektrického odporu topné vrstvy. V oblasti požadované maximální teploty čtvrtého teplotního cyklu došlo k neočekávanému zvýšení teplot viz Příloha F -, které bylo ukončeno rozptylem mnoha jisker. Reakcí na tento jev bylo urychlené snížení dodávaného výkonu. Vzhledem k tomu, že byl dodávaný proud roven 0 A, tak výpočet elektrického odporu v příslušných grafech není spočitatelný (Ohmův zákon; při zpracování dat nahrazeno hodnotou 0,1 A), což se projevuje globálním minimem viz obrázek 6.17. Po krátké době byl dodávaný proud zvýšen z důvodu spočítatelnosti odporu.

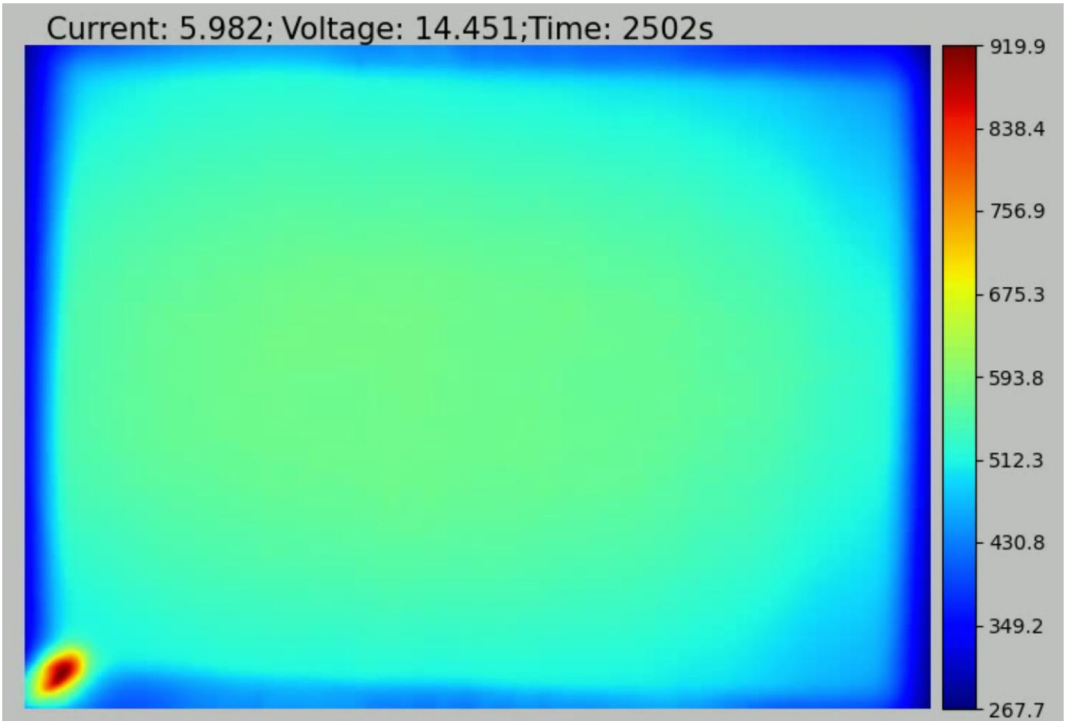
Neočekávané zvýšení teploty bylo způsobeno lokálním průrazem na pomezí topné vrstvy a měděné elektrody, což dokumentují obrázky 1.3, 5.7. Na obrázku 5.7 je patrné, že termokamera zaznamenala maximální teplotu 919,9 °C ve středu lokálního průrazu. Tato teplota neodpovídá realitě z důvodu schopnosti termokamery měřit pouze od 900 °C. Celý průběh měření mapuje video viz Příloha G -.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty elektrického odporu po teplotních cyklech s označením umístění grafických průběhů cyklů v přílohách

Poznámka [-]	R [Ω]	Teplota prostředí [°C]	Grafy v příloze [-]
Referenční hodnota	4,49	25,1	-
Po 1. cyklu (do 150 °C)	4,55	24,5	Příloha C -
Po 2. cyklu (do 250 °C)	4,53	24,8	Příloha D -
Po 3. cyklu (do 350 °C)	4,76	25,6	Příloha E -
Po 4. cyklu (do 500 °C)	20,12	24,2	Příloha F -

Teplota prostředí byla určena při měření eklektického odporu pomocí teploměru TFA 45.2027, který se běžně nachází v laboratořích UFYZ.

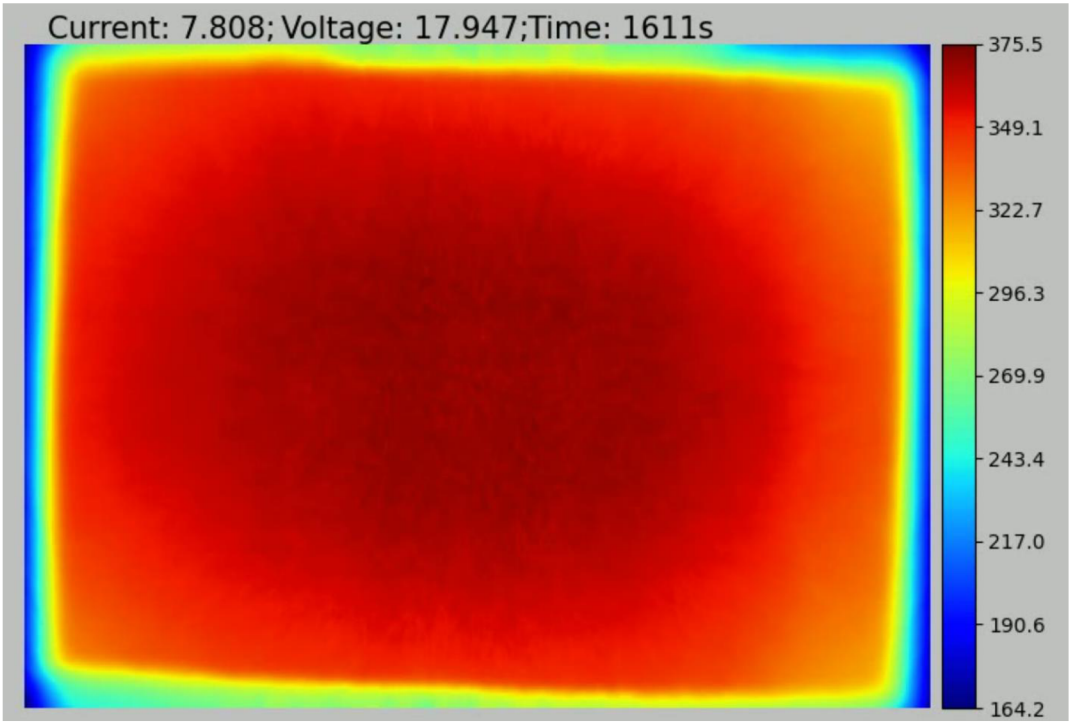
Na obrázku 6.12 je patrná hysterezní smyčka závislosti elektrického odporu na průměrné teplotě. Na základě průběhů stejné závislosti u ostatních teplotních cyklů se zdá, že tato hystereze souvisí s různou rychlostí odvodu teplota ze substrátu vzorku.



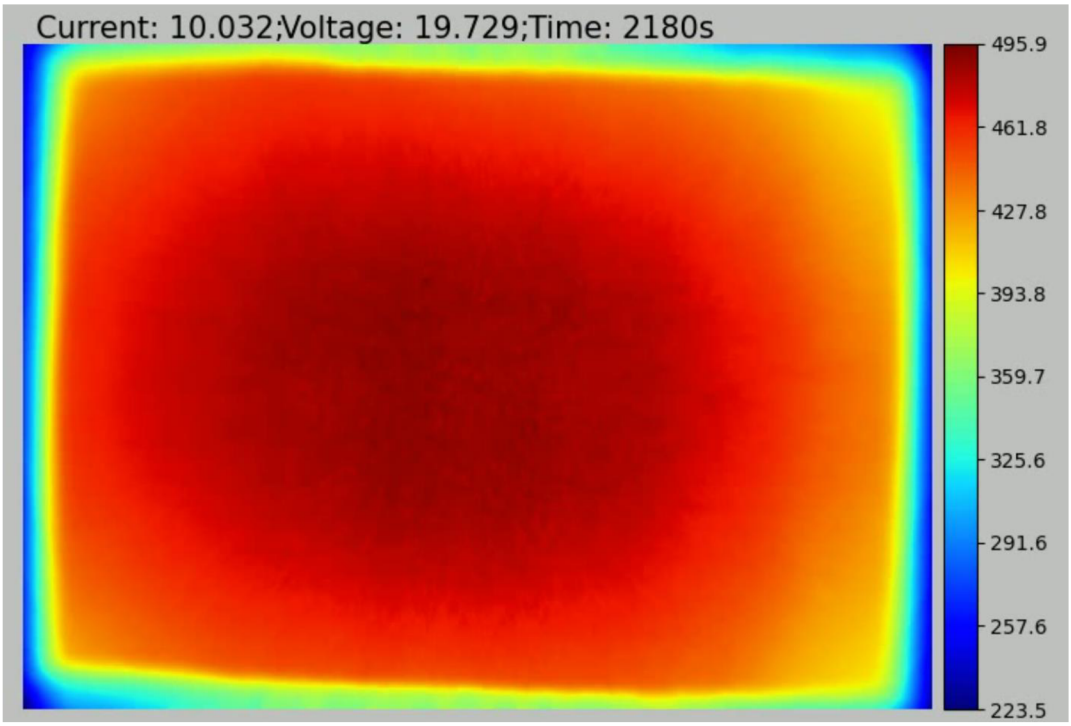
Obr. 5.7 Výřez z videa během čtvrtého teplotního cyklu

Jedním z podstatných výstupů prováděných měření je možnost výběru jakéhokoli zaznamenaného snímku prostorově rozlišené teploty. Tato možnost je výhodná pro pracovníky CEITEC, kteří mohou tyto snímky využít jako referenci k vytvářeným modelům chování daných vrstev pro používané designy vzorků. Na níže uvedených snímcích (viz obrázky 5.8 a 5.9) je možné si povšimnout, že nedochází k rovnoměrnému ohřevu celé topné vrstvy.

Na základě snímků prostorově rozlišené teploty je možné usuzovat na nedokonalosti nanášených topných vrstev, technologického procesu výroby a designu vzorků. Pro lepší znázornění procesu šíření prostorově rozlišené teploty během jednotlivých teplotních cyklů je možné sestavit z naměřených dat vizualizaci ve formě video záznamu. Ukázka video záznamu čtvrtého teplotního cyklu vzorku X4 je v Příloha G -.



Obr. 5.8 Snímek z video záznamu č. 1, vzorek X4



Obr. 5.9 Snímek z video záznamu č. 2, vzorek X4

6. ZÁVĚR

Předkládaná práce se zaměřuje na návrh, sestavení a zprovoznění systému pro charakterizaci polovodičových topných vrstev. Na základě navrženého řešení se tento systém skládá ze dvou samostatných částí. První částí je systém pro referenční měření odporu polovodičových vrstev za studena, který je realizován pracovištěm pro měření odporu viz kapitola 3. Druhou částí je pracoviště pro teplotní charakterizaci vrstev sloužící k jejich cyklickému zatěžování viz kapitola 4. Postup návrhu a realizace jednotlivých pracovišť je možné rozdělit do dvou obecných oblastí, tj. hardwarového a softwarového řešení.

Hardwarové řešení vychází z navržené metodiky měření a dostupného přístrojové vybavení v laboratořích UFYZ. Pozornost byla také věnována specifickým realizačním problematikám, mezi které patří vliv oxidových vrstev vznikajících během teplotního cyklování na měření odporu a způsob měření maximálních požadovaných teplot během cyklického zatěžování (problematika související se stanovením odhadu emisivity povrchu topných vrstev).

Pro jednotlivá pracoviště byly vyvinuty specifické softwarové aplikace, do kterých byly implementovány předem navržené měřicí algoritmy. Aplikace vynikají uživatelsky přívětivým grafickým prostředím a přehledným zobrazením měřených dat. Tyto aplikace jsou naprogramovány v požadovaném jazyku Python, a to z důvodu nově zaváděného konceptu v laboratořích UFYZ. Pro komunikaci aplikací s použitým přístrojovým vybavením bylo využito rozhraní GPIB a USB.

Samostatnou součástí řešení byla problematika automatizovaného zpracování naměřených dat získaných během teplotního cyklování vzorků. Z důvodu velkého objemu naměřených výstupních dat (nižší jednotky GB a vyšší tisíce souborů) během každého teplotního cyklu byla vytvořena samostatná aplikace řešící danou problematiku viz kapitola 5. Výstupem aplikace jsou nejen požadované grafické výstupy, ale i vizualizace průběhu šíření prostorově rozlišené teploty v podobě video záznamu.

Posledním bodem zadání bylo demonstrovat funkčnost realizovaného systému na dodaných vzorcích včetně procesu automatického zpracování naměřených dat. Tento bod byl realizován formou ukázkového měření viz kapitola 5 a příslušné přílohy. Tímto měřením byla ověřena časová stabilita automatizovaného měřicího procesu a funkčnost všech použitých algoritmů realizovaného systému.

Z hodnot naměřeného elektrického odporu mezi teplotními cykly je možné usuzovat na potenciální degradaci topných vrstev. Pomocí zaznamenaných snímků rozehřívané topné vrstvy obsahující vizuální informaci o průběhu šíření prostorově rozlišené teploty je možné usuzovat na nedokonalosti nanášených topných vrstev, technologického procesu výroby a designu vzorků. Získané informace mohou být použity také k validaci modelů chování polovodičových topných vrstev.

LITERATURA

[1] *PyCharm The Python IDE for data science and web development*. Online. JetBrains: Essential tools for software developers and teams. 2002. Dostupné z: https://www.jetbrains.com/pycharm/. [cit. 2024-05-20].

[2] JOHN, Park; STEVE, Mackay a EDWIN, Wright. *Practical Data Communications for Instrumentation and Control*. Online. Elsevier, 2003. ISBN 978-0-7506-5797-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPDCIC001/practical-data-communications/practical-data-communications. [cit. 2024-05-21].

[3] MALHOTRA, Dheeraj a MALHOTRA, Neha. *Data Structures and Program Design Using Python - A Self-Teaching Introduction*. Online. Mercury Learning and Information, 2021. ISBN 978-1-68392-639-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDSPDUPA8/data-structures-program/data-structures-program. [cit. 2024-05-21].

[4] *The Python Standard Library*. Online. Python. 1997. Dostupné z: https://docs.python.org/3/library/index.html. [cit. 2023-12-27].

[5] *What is a Python module? How is it different from libraries?* Online. Tutorialspoint. 2007. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/what-is-a-python-module-how-is-it-different-from-libraries. [cit. 2023-12-27].

[6] *What is NumPy?* Online. NumPy. 2020. Dostupné z: https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html. [cit. 2023-12-28].

[7] *SciPy User Guide*. Online. SciPy documentation. 2021. Dostupné z: https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/index.html#user-guide. [cit. 2023-12-28].

[8] *Matplotlib 3.8.2 documentation*. Online. Matplotlib: Visualization with Python. 2012. Dostupné z: https://matplotlib.org/stable/. [cit. 2023-12-28].

[9] *Qt for Python*. Online. 2021. Dostupné z: https://doc.qt.io/qtforpython-6/index.html#. [cit. 2023-12-28].

[10] *PyVISA: Control your instruments with Python*. Online. 2016. Dostupné z: https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/. [cit. 2023-12-28].

[11] *OpenCV - Open Computer Vision Library*. Online. 2002. Dostupné z: https://opencv.org/. [cit. 2024-05-20].

[12] *Manual Keithley 2420*. Online. Tektronix. 2021. Dostupné z: https://download.tek.com/manual/2400S-900-01_K-Sep2011_User.pdf. [cit. 2024-01-02].

[13] PARK, John; MACKAY, Steve a WRIGHT, Edwin. *Advanced Python Programming*. Online. Packt Publishing, 2019. ISBN 978-1-83855-121-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPP00001/advanced-python-programming/advanced-python-programming. [cit. 2024-05-20].

[14] *Manual 1902 DC Power Supply*. Online. BK Precision. 1997. Dostupné z: https://bkpmedia.s3.amazonaws.com/downloads/manuals/en-us/1900_1901_1902_manual.pdf. [cit. 2024-01-02].

[15] *Manual Agilent 34410A/11A*. Online. ALLTEST. 2004. Dostupné z: https://docs.alltest.net/manual/Alltest-HP-Agilent-Keysight-34411A-Manual.pdf?_gl=1*2i1lv0*_ga*MTUzNTUzNjA5OS4xNzA0MjEzNjQz*_ga_M0W6P77MQW*MTcwNDI5NjU3Ny40LjEuMTcwNDI5NjU3OC4wLjAuMA.. [cit. 2024-01-02].

[16] *Agilent E364xA Dual Output DC Power Supplies*. Online. TME Electronic Components. 2008. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/9f3996689f24777703b84ff64b156944/E3646-90001.pdf. [cit. 2024-05-20].

[17] *Ventilátor*. Online. TME. 2008. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/ee60251s1-999-a/ventilatory-dc-12v/sunon/ee60251s1-1000u-999/. [cit. 2024-01-04].

[18] *Proudový senzor 20A modul ACS712*. Online. Drátek.cz. 2013. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1222-proudovy-senzor-20a-modul-acs712.html?_gl=1*j7c67t*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjw0YGyBhByEiwAQmBEWn5CuVK-Q8EokfDcoR2cLXwjQIzS_mEe7q4gaLASc1bkM8ovZeO2phoCEhwQAvD_BwE. [cit. 2024-05-20].

[19] *Manual ACS712*. Online. Drátek.cz. 2013. Dostupné z: https://dratek.cz/docs/produkty/1/1262/acs712_datasheet.pdf?_gl=1*1d3spjb*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjw0YGyBhByEiwAQmBEWn5CuVK-Q8EokfDcoR2cLXwjQIzS_mEe7q4gaLASc1bkM8ovZeO2phoCEhwQAvD_BwE. [cit. 2024-05-20].

[20] *Manual TIM 450*. Online. Instrumart. 2004. Dostupné z: https://www.instrumart.com/assets/MicroEpsilon-TIM-manual.pdf. [cit. 2024-05-20].

[21] *SOLIDWORKS*. Online. 1998. Dostupné z: https://www.solidworks.cz/. [cit. 2024-05-20].

[22] *Manual TIM Connect*. Online. Micro-Epsilon. 1998. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.com/fileadmin/download/manuals/man--thermoIMAGER-TIM-Connect--en.pdf. [cit. 2024-05-20].

[23] *IRImagerDirect SDK*. Online. Evocortex. 2013. Dostupné z: https://documentation.evocortex.com/libirimager2/html/index.html. [cit. 2024-05-20].

[24] *Pyoptris*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: https://github.com/siyka-au/pyoptris?tab=readme-ov-file. [cit. 2024-05-20].

[25] *PyOptris*. Online. GitHub. 2008. Dostupné z: https://github.com/FiloCara/pyOptris. [cit. 2024-05-20].

[26] *Manuál Fluke 561*. Online. Měřicí přístroje Fluke. 2018. Dostupné z: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/56x_____umcze0000.pdf. [cit. 2024-05-20].

[27] *Katalogový list TM-2000*. Online. Micronix.cz | Prodej měřicích... 1999. Dostupné z: https://old.micronix.cz/data/cz/att/002/663-1890.pdf. [cit. 2024-05-20].

[28] *Emissivity labels*. Online. Optris. 2007. Dostupné z: https://www.optris.com/en/product/infrared-thermometers/accessories/emissivity-labels-for-measurement-of-reflective-surfaces/. [cit. 2024-01-04].

[29] KREIDL, Marcel. *MĚŘENÍ TEPLOTY - senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.

[30] *Průvodce termografií*. Online. Termokamery Testo. 2020. Dostupné z: https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/. [cit. 2024-05-20].

[31] *Basics of non contact temperature measurement*. Online. Micro-Epsilon. 1998. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.com/fileadmin/download/products/dat--infrared-basics--en.pdf. [cit. 2024-05-20].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CEITEC	Central European Institute of Technology
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
GPIB	General Purpose Interface Bus
USB	Universal Serial Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commision
SCPI	Standard Commands for Programmable Instrument
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
AV	Ampérvoltová
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
A/D	Analogově-digitální
API	Application programming reference

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
R	*odpor*	(Ω)
P	*výkon*	(W)
M	*přepočtená matice hodnot*	*(-)*
N	*naměřená matice hodnot*	*(-)*

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝKRES A MODEL SYSTÉMU TEPELNÉ DISTRIBUCE SE NACHÁZÍ NA PŘILOŽENÉM FLASH DISKU 63

PŘÍLOHA B - ZDROJOVÉ KÓDY APLIKACÍ JSOU NA PŘILOŽENÉM FLASH DISKU 64

PŘÍLOHA C - GRAFY 1. CYKLU (DO 150 °C) 65

PŘÍLOHA D - GRAFY 2. CYKLU (DO 250 °C) 68

PŘÍLOHA E - GRAFY 3. CYKLU (DO 350 °C) 71

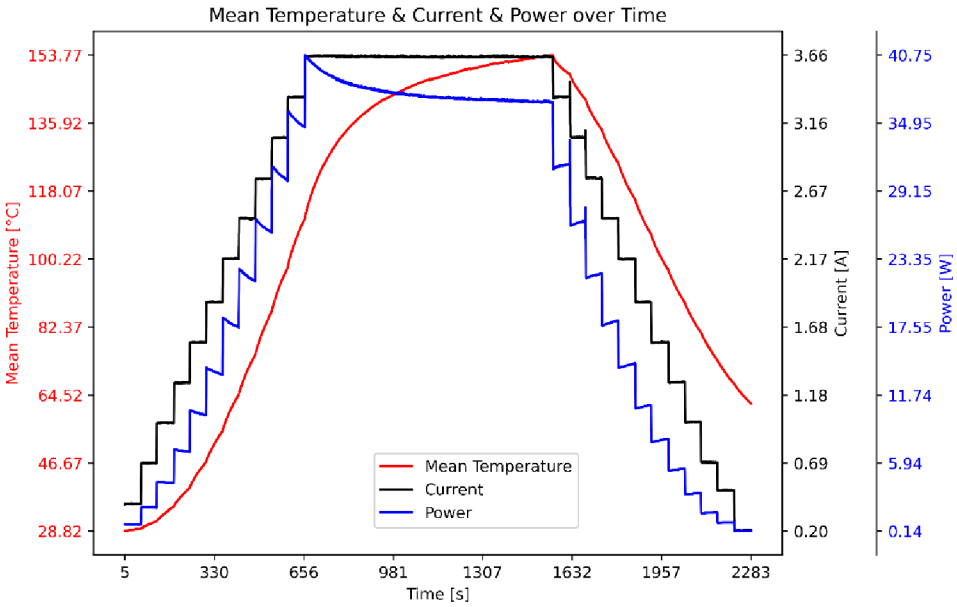
PŘÍLOHA F - GRAFY 4. CYKLU (DO 500 °C) 74

PŘÍLOHA G - VIDEO MAPUJÍCÍ PRŮBĚH MĚŘENÍ 4. TEPLOTNÍHO CYKLU SE NACHÁZÍ NA PŘILOŽENÉM FLASH DISKU 77

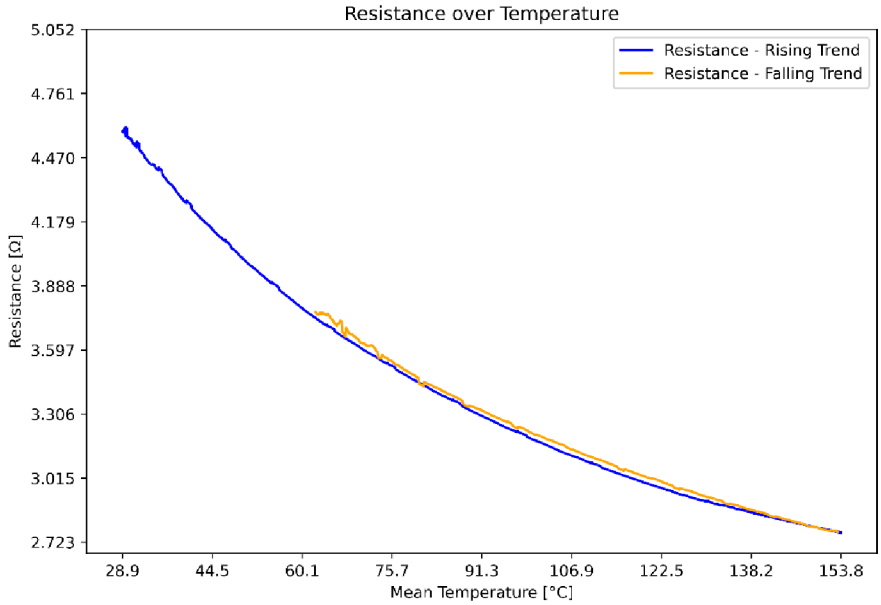
Příloha A - Výkres a model systému tepelné distribuce se nachází na přiloženém flash disku

Příloha B - Zdrojové kódy aplikací jsou na přiloženém flash disku

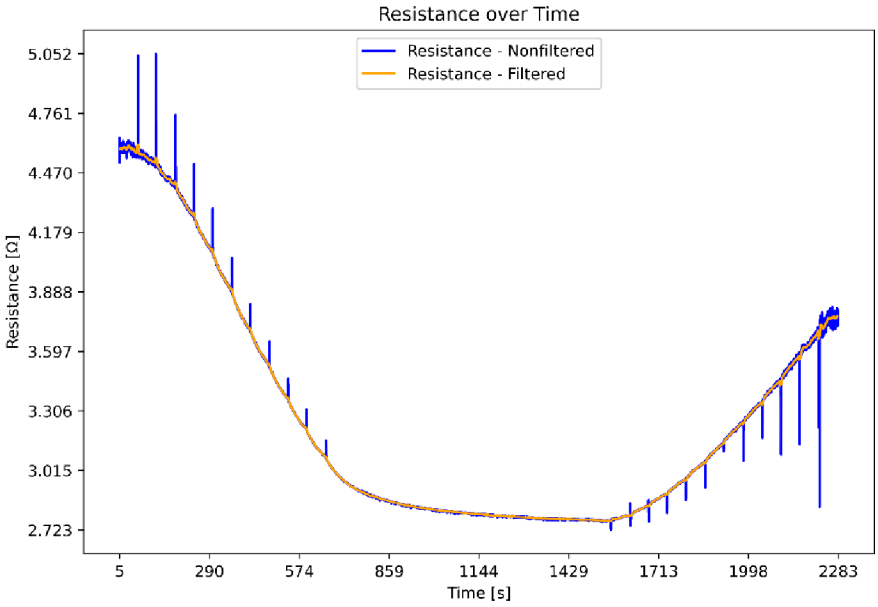
Příloha C - Grafy 1. cyklu (do 150 °C)



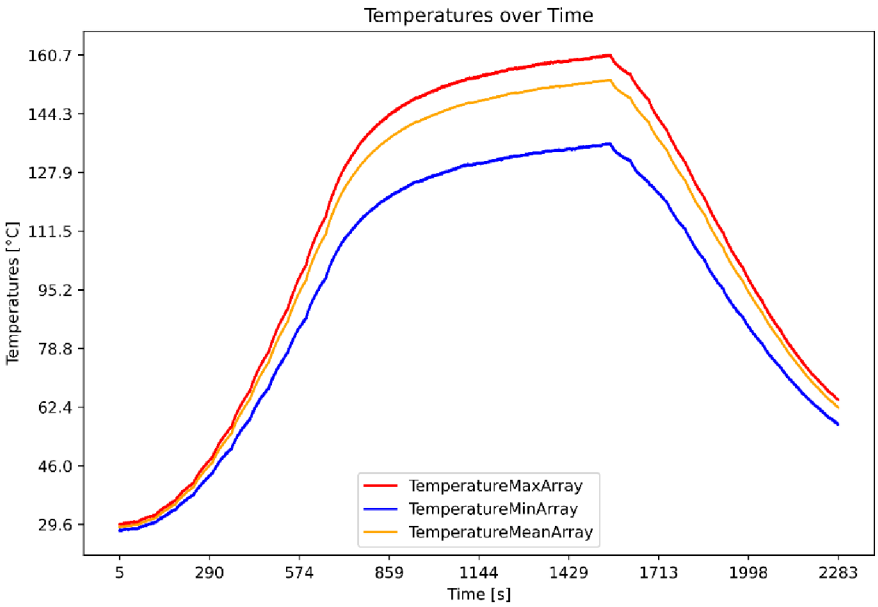
Obr. 6.1 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření



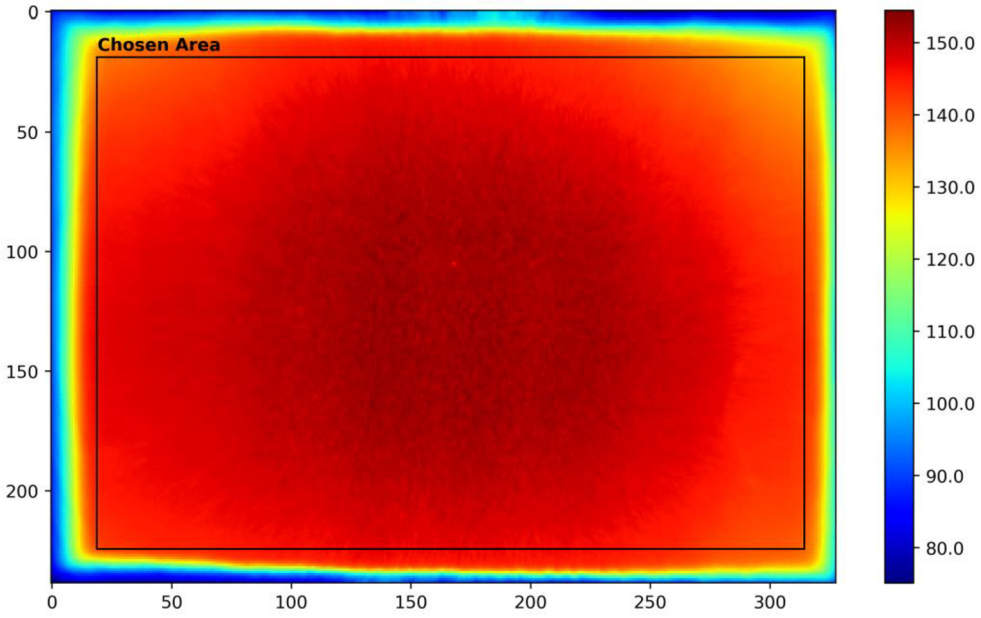
Obr. 6.2 Závislost odporu na průměrné teplotě



Obr. 6.3 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření

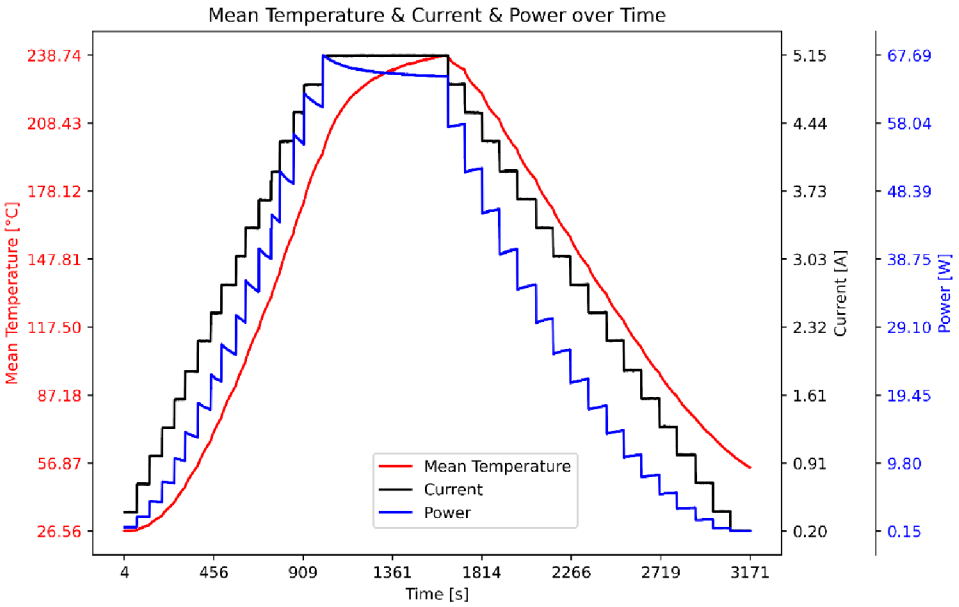


Obr. 6.4 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření

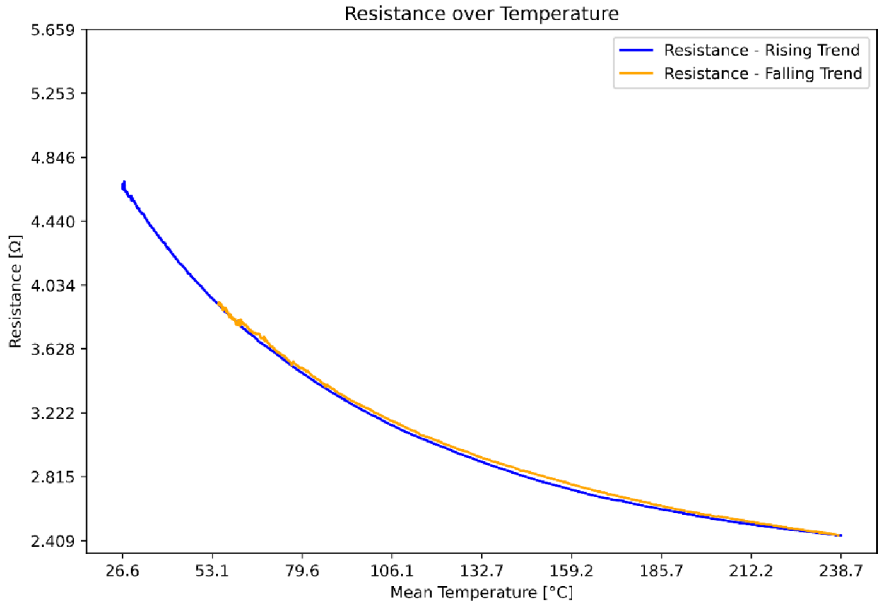


Obr. 6.5 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů

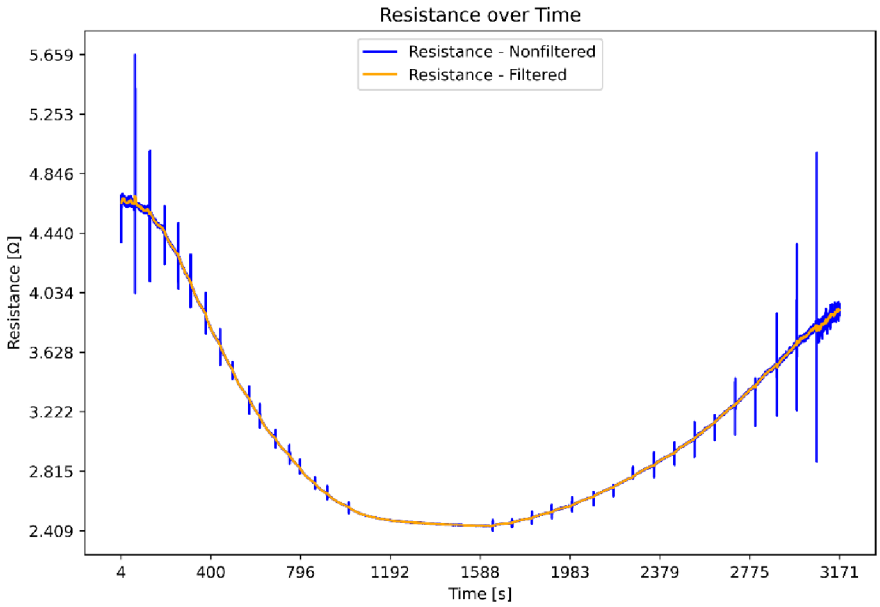
Příloha D - Grafy 2. cyklu (do 250 °C)



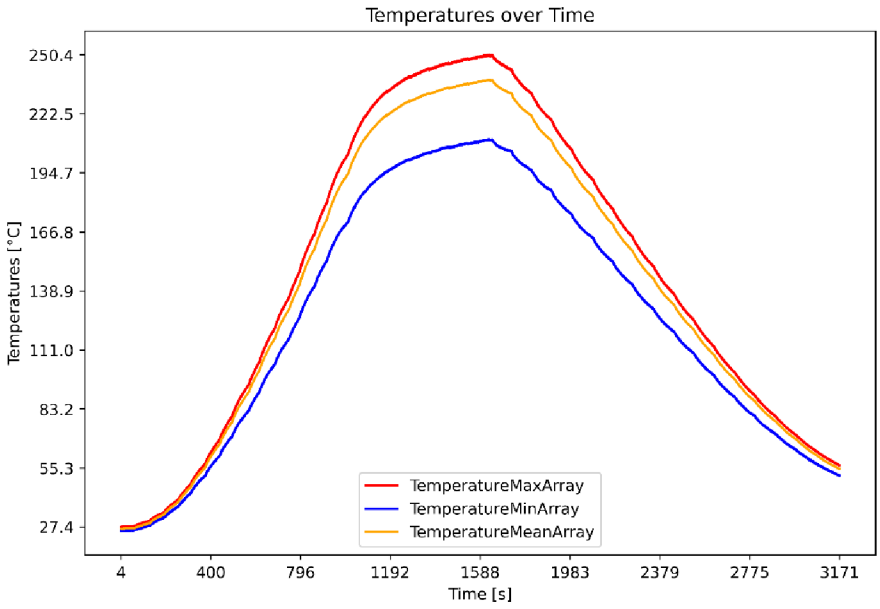
Obr. 6.6 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření



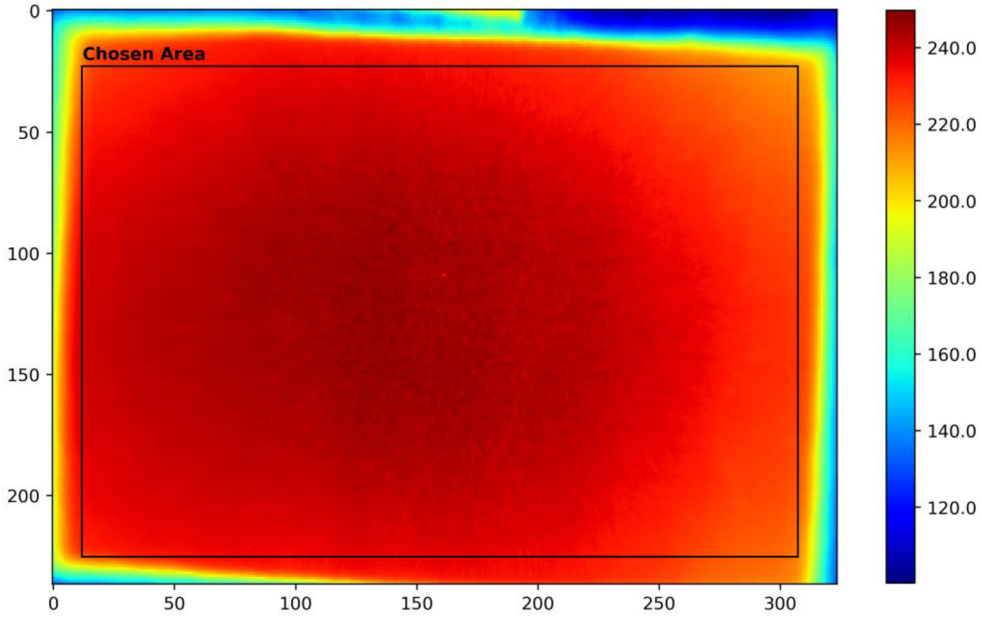
Obr. 6.7 Závislost odporu na průměrné teplotě



Obr. 6.8 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření

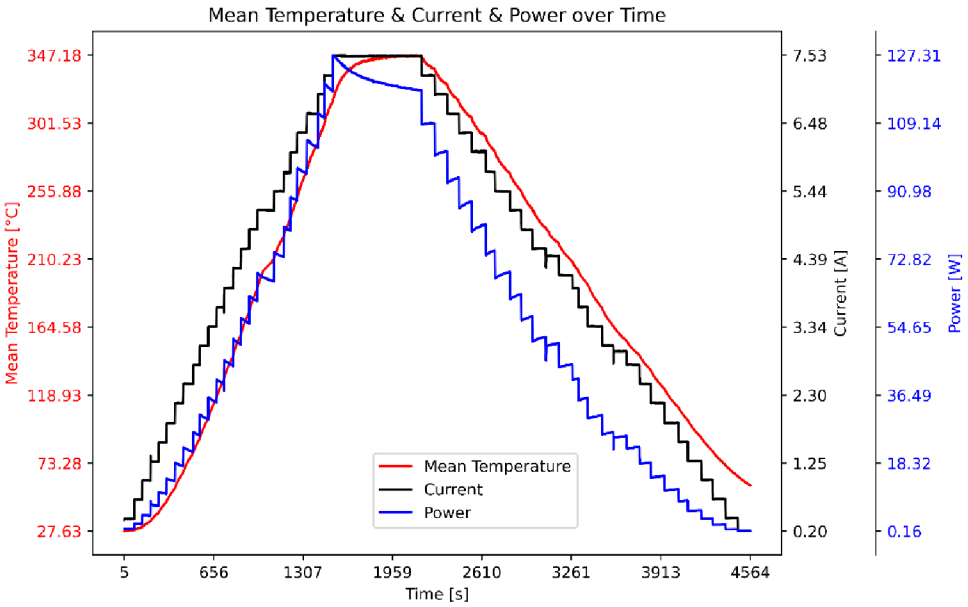


Obr. 6.9 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření

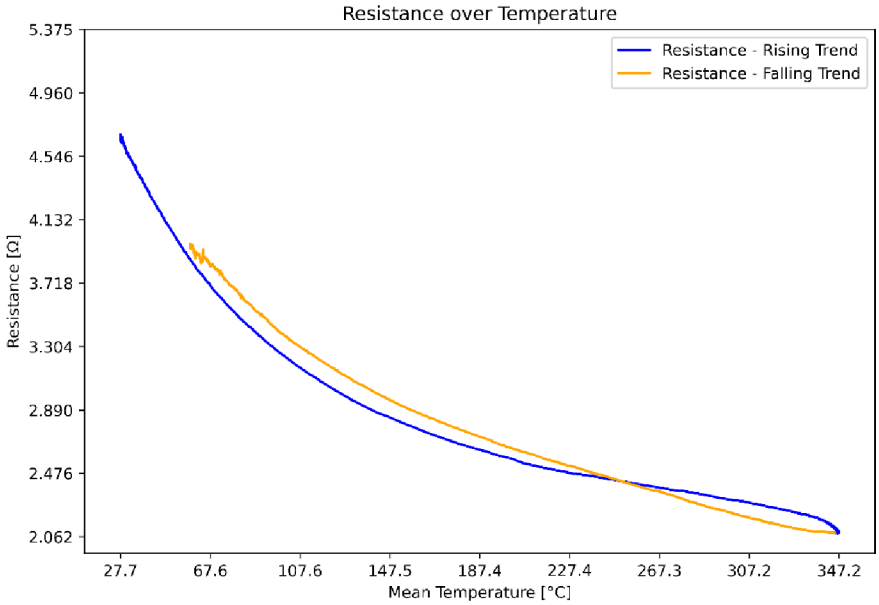


Obr. 6.10 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů

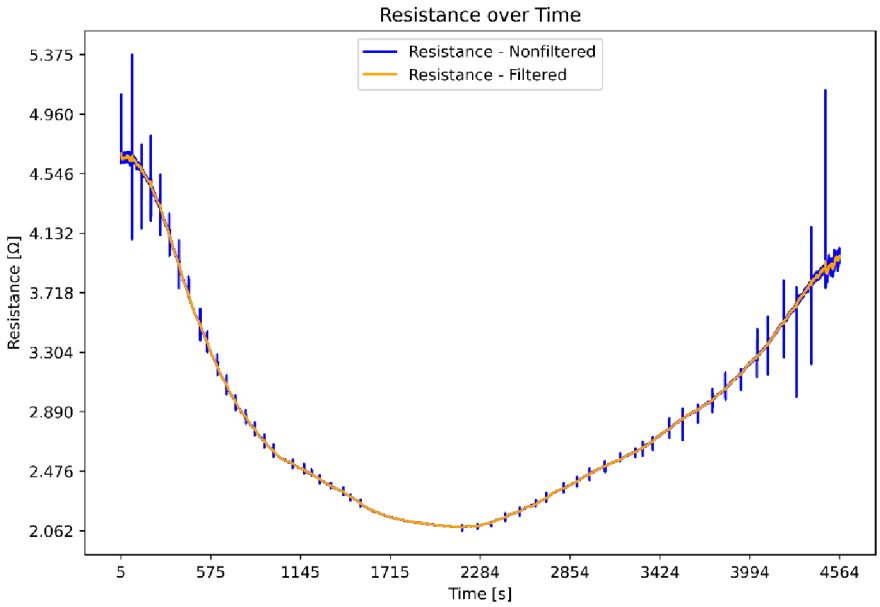
Příloha E - Grafy 3. cyklu (do 350 °C)



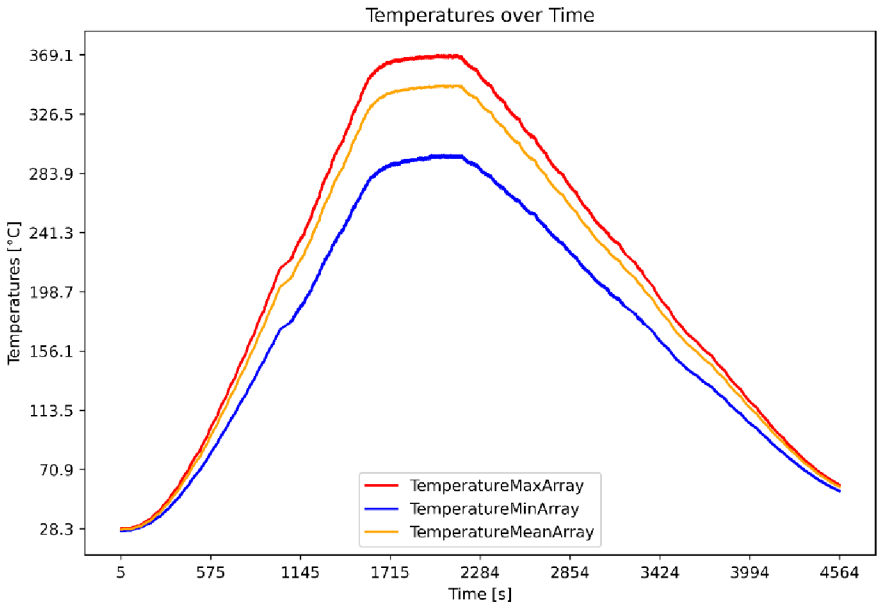
Obr. 6.11 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření



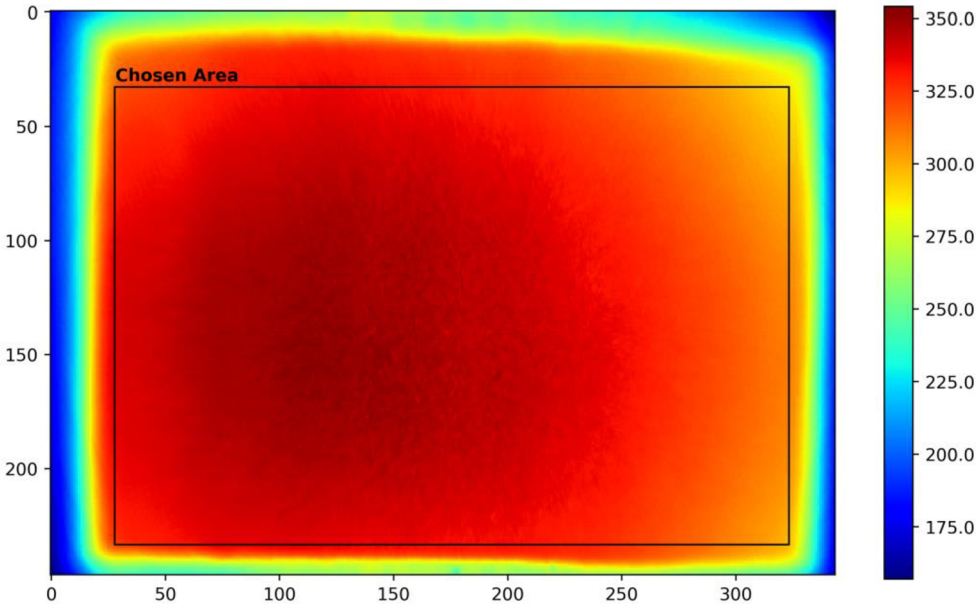
Obr. 6.12 Závislost odporu na průměrné teplotě



Obr. 6.13 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření

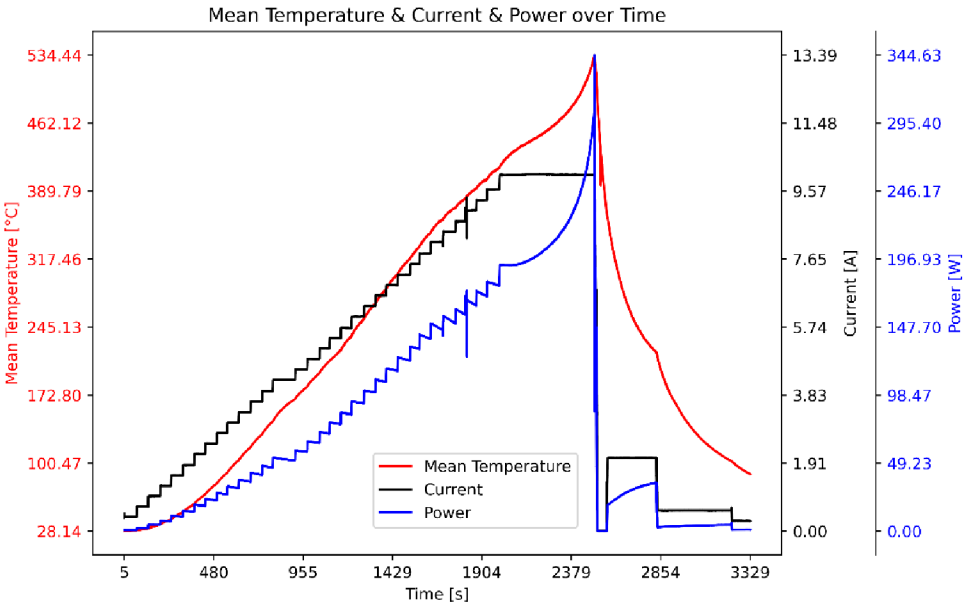


Obr. 6.14 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření

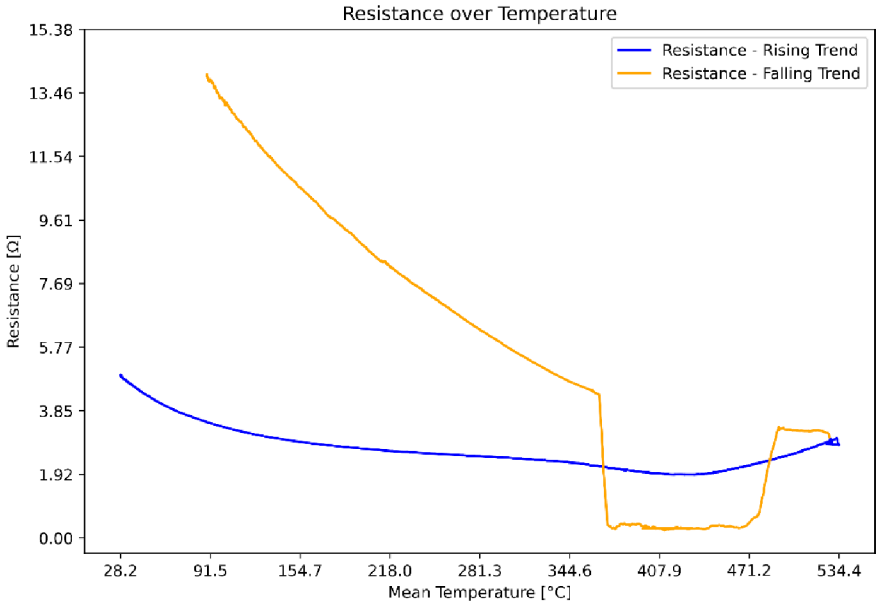


Obr. 6.15 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů

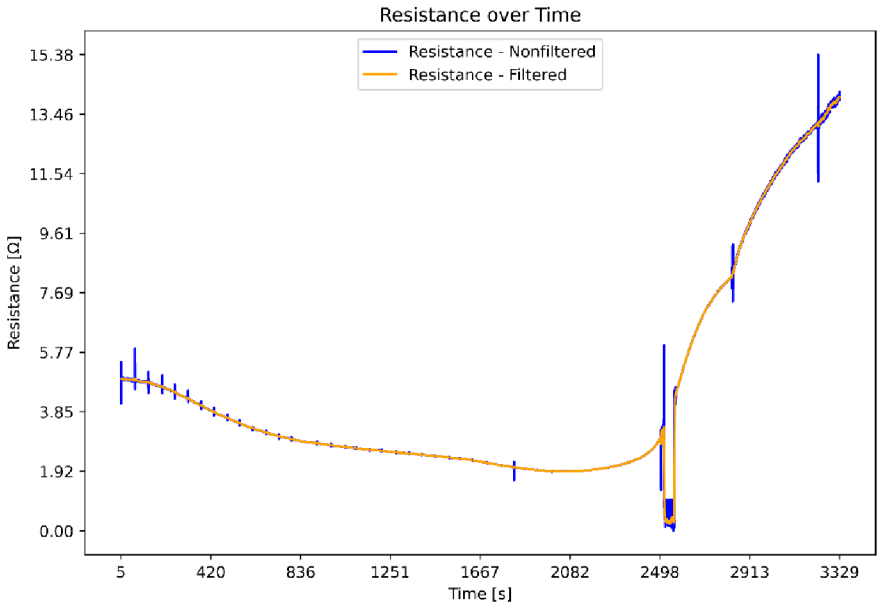
Příloha F - Grafy 4. cyklu (do 500 °C)



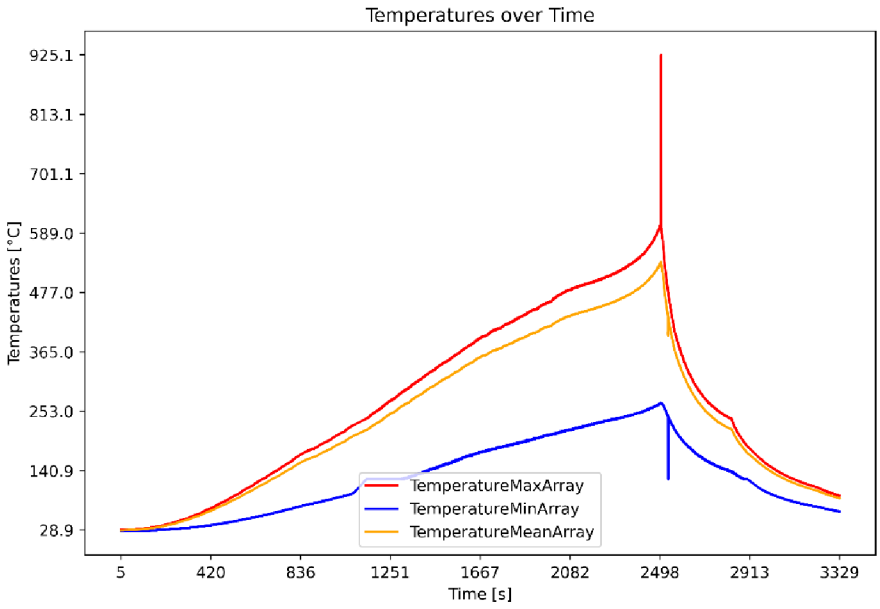
Obr. 6.16 Závislost průměrné teploty, proudu, výkonu na čase měření



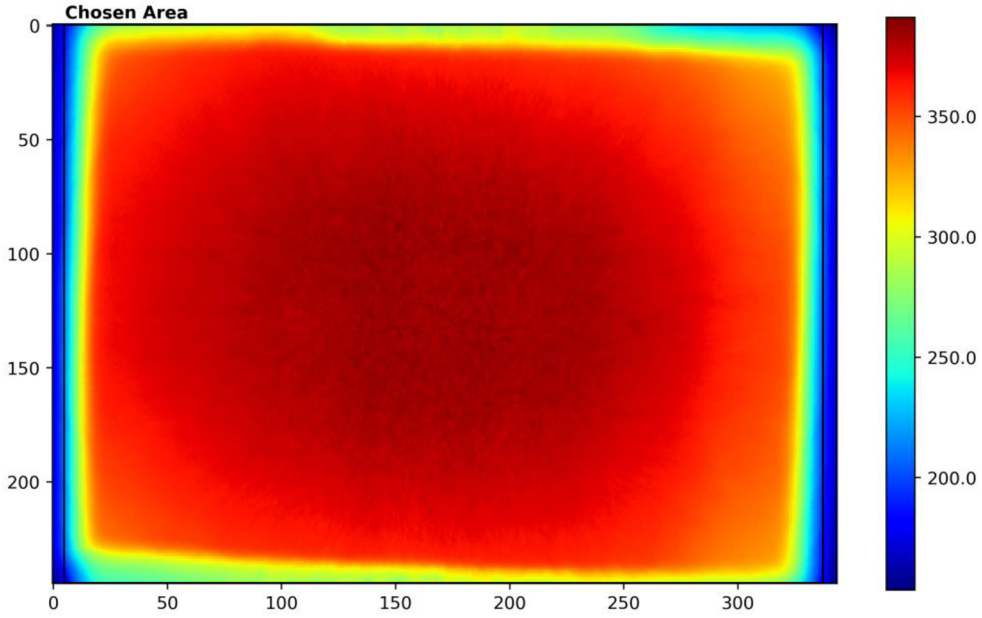
Obr. 6.17 Závislost odporu na průměrné teplotě



Obr. 6.18 Závislost vypočteného, vyfiltrovaného odporu na čase měření



Obr. 6.19 Závislost min., max. a průměrné teploty na čase měření



Obr. 6.20 Vybraná zájmová oblast pro tvorbu grafů

Příloha G - Video mapující průběh měření 4. teplotního cyklu se nachází na přiloženém flash disku