



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

**Parametry tlustých vrstev v závislosti na jejich
elektrickém zatěžení**

**The parameters of thick film layers depending
on their electrical stress**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, Energetika a Management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Jakub Kučera
Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kučera** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483620**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Parametry tlustých vrstev v závislosti na jejich elektrickém zatěžení

Název bakalářské práce anglicky:

The parameters of thick film layers depending on their electrical stress

Pokyny pro vypracování:

1. Stučně popište strukturu, vlastnosti a metody přípravy tlustých vrstev
2. Uveďte způsoby šíření tepla a diskutujte možnosti měření ohřevu vrstev
3. Připravte vzorky polymerních tlustovrstvých struktur na různých typech položky.
4. Změřte a vyhodnoťte chování tlustých vrstev v závislosti na podmínkách proudového zatěžení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kaltmeyer, J.: Proudové zatěžení polymerních tlustých vrstev [Diplomová práce], ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, 2020, dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/89848>
- [2] Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Vyd. 1. Brno: VUTIUUM, 2006. ISBN 9788021432925;8021432926;.
- [3] Panzini, Michael I.: Thick Films: Properties, Technology and Applications, Nova Science Publishers, 2012, ISBN 1614703841, 9781614703846

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne _____

Jakub Kučera

Poděkování

Rád bych poděkoval paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení této práce, cenné rady, vstřícnost a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Mlejnkovi, Ph.D. za cenné rady ohledně propojení LabVIEW s měřicími přístroji.

Abstrakt

Tato práce se zabývá chováním polymerních tlustých vrstev nanesených na různé typy podložek v závislosti na jejich proudovém zatěžování. Jsou zde uvedeny základní vlastnosti a technologie tlustých vrstev a podložky používané pro jejich realizaci. Zároveň jsou zde stručně popsány základní způsoby šíření tepla a senzory pro měření teploty. Dále je v práci popsán použitý měřicí obvod, který je propojen s počítačem využívající software LabVIEW. V poslední části práce jsou vyhodnocena získaná data z měření vytvořených vzorků.

Klíčová slova

Tlustá vrstva, podložky, senzory teploty, proudové zatěžování

Abstract

The bachelor thesis deals with the behaviour of polymer thick film layers applied to different types of substrate depending on their current loading. The second chapter contains basic characteristics and technologies of thick film layers and substrates used for their realisation. Basic methods of heat transfer and temperature sensors are described here as well. Furthermore, the bachelor thesis describes the used measuring circuit, that is connected to a computer using LabVIEW software. And the data obtained from the measurement of created sample is evaluated in the last chapter.

Key words

Thick film layer, substrate, temperature sensors, current loading

Obsah

1 Úvod	1
2 Struktura, vlastnosti a technologie tlustých vrstev	2
2.1 Podložky pro tlusté vrstvy	2
2.2 Pasty používané pro tlusté vrstvy	3
2.2.1 Anorganické pasty	3
2.2.2 Polymerní pasty	4
2.3 Základní vlastnosti tlustých vrstev	4
2.3.1 Odpor na čtverec	5
2.3.2 Teplotní závislost odporu	5
2.3.3 Proudová zatížitelnost	6
2.4 Technologie tlustých vrstev	6
2.4.1 Sítotisk	7
2.4.2 Šablonový tisk	8
2.4.3 Dispensing	9
2.4.4 Jetting	10
2.4.5 Výpal a vytvrzení nanesených past	10
3 Způsoby šíření tepla a měření teploty	11
3.1 Vedení tepla	11
3.2 Proudění tepla	12
3.3 Sálání tepla	12
3.4 Náhradní tepelný obvod	13
3.5 Metody měření teploty	15
3.5.1 Kovové odporové senzory teploty	16
3.5.2 Termistory	18
3.5.3 Termoelektrické články	19
3.5.4 Bezdotykové měření teploty	20
4 Příprava měření proudového zatěžování tlustých vrstev	22
4.1 Příprava tlustovrstvých struktur na různých typech podložek	22
4.2 Způsob měření proudového zatěžování tlustých vrstev	23
4.2.1 Schéma zapojení pro měření ohřevu tlustých vrstev	23
4.2.2 Měření teploty tlustých vrstev	26
4.2.3 Měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev	26
4.2.4 Měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování	27
4.3 Zaznamenání teplotního pole tlustých vrstev na různých typech podložek	28

5	Vyhodnocení měření proudového zatěžování tlustých vrstev	29
5.1	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev a parametry náhradního tepelného obvodu	29
5.1.1	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z korundové keramiky	31
5.1.2	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm	32
5.1.3	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm	33
5.2	Statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování	34
5.2.1	Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 15 v závislosti na proudovém zatěžování	35
5.2.2	Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 19 v závislosti na proudovém zatěžování	36
5.3	Teplotní závislost odporu nanesených vrstev	37
5.4	Zaznamenané teplotní pole tlustých vrstev nanesených na různých typech podložek při proudovém zatěžování	39
6	Závěr	41
A	Použité měřicí přístroje a komponenty	44

Seznam tabulek

1	Parametry podložek pro tlusté vrstvy	3
2	Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami	14
3	Průměrné hodnoty parametrů náhradního tepelného obvodu pro každý motiv a každou podložku	29
4	Tabulka teplotního součinitele odporu a teoretický odpor při 0 °C a při 25 °C pro nanesené tlusté vrstvy	37

Seznam obrázků

1	Struktura vypálené tlusté vrstvy	4
2	Rozměry tlusté vrstvy	5
3	Úhel směru vláken síta a tištěného obrazce	7
4	Ukázka technologie sítotisku	8
5	Ukázka technologie šablonového tisku	8
6	Ukázka principu dispensingu	9
7	Teplotní průběh pro výpal anorganické pasty	10
8	Náhradní tepelný obvod v ustáleném stavu polovodičové součástky	14
9	Náhradní tepelný obvod polovodičové součástky pro přechodný děj	15
10	Teplotní závislost kovových odporových senzorů teploty	17
11	Teplotní závislost termistorů v porovnání s kovovými odporovými senzory teploty	18
12	Jednoduché schéma termočládku tvořený dvěma rozdílnými materiály A, B a propojovacím vedením z materiálu C	20
13	Tvar použitých motivů spolu s rozměry vodivé dráhy	22
14	Ukázka vytvořených vzorků na různých typech podložek	23
15	Obvodové schéma měřicího obvodu	24
16	Přípravek pro uchycení měřených vzorků	24
17	Blokové schéma propojení PC s měřicími přístroji a Arduinem	25
18	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z korundové keramiky	31
19	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm	32
20	Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm	33
21	Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 15 v závislosti na proudovém zatěžování	35
22	Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 19 v závislosti na proudovém zatěžování	36
23	Teplotní závislost odporu nanesených vrstev motivu 15 na různých typech podložek	38

24	Teplotní závislost odporu nanesených vrstev motivu 19 na různých typech podložek	38
25	Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z korundové keramiky pro dvě různá proudová zatížení	39
26	Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm pro dvě různá proudová zatížení	39
27	Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm pro dvě různá proudová zatížení	40

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je zkoumání chování polymerních tlustých vrstev nanesených na různých typech podložek. Jedná se zejména o zkoumání chování tlustých vrstev v závislosti na jejich proudovém zatěžování.

Cílem první části práce je popsat různé typy podložek, které se používají pro realizaci tlustých vrstev a jejich základní vlastnosti. Dále uvést druhy past, ze kterých jsou tyto tlusté vrstvy vytvářeny. V rámci této části budou také uvedeny základní vlastnosti tlustých vrstev a různé technologie, které se používají pro realizaci těchto vrstev.

Cílem druhé části práce je stručně charakterizovat základní způsoby šíření tepla a uvést náhradní tepelný obvod, který se používá pro popis tepelných poměrů v elektronických součástkách. Dále budou v této části práce uvedeny základní senzory teploty, které je možné použít pro měření ohřevu tlustých vrstev.

Cílem třetí části práce je uvést způsob vytvoření tlustovrstvých struktur na různých typech podložek pomocí ruční síťotiskové technologie. V rámci této části bude také popsán měřicí obvod spolu s metodou měření ohřevu tlustých vrstev v závislosti na jejich proudovém zatěžování. Jedná se zejména o měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev a statickou charakteristiku ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování s využitím softwaru LabVIEW.

Cílem čtvrté části práce je vyhodnotit naměřené hodnoty a chování tlustých vrstev v závislosti na jejich proudovém zatěžování. Dále také porovnat různé typy použitých podložek na základě ohřevu tlustých vrstev. V rámci této části práce bude také znázorněno teplotní pole tlustých vrstev nanesených na různých typech podložek pomocí termovizní kamery.

2 Struktura, vlastnosti a technologie tlustých vrstev

Tlustými vrstvami v elektrotechnice se rozumí vrstvy, jejichž tloušťka se pohybuje v jednotkách až desítkách mikrometrů. Tyto vrstvy jsou nanášeny na substrát (izolační podložku) v určitém tvaru, může se jednat jak o vodivé, tak odporové nebo dielektrické vrstvy. Základem pro realizaci tlustých vrstev je pasta, která určuje jejich základní vlastnosti. [1] [2]

Technologie tlustých vrstev se stala alternativou pro desky plošných spojů, pomocí které bylo možné vyrábět malé robustní integrované obvody. Dalšího širokého využití této technologie se dočkalo s příchodem povrchové montáže. V dnešní době se technologie tlustých vrstev používá pro výrobu mnoha druhů senzorů, jako jsou mechanické, teplotní, optické či chemické. Lze tak vytvořit multifunkční senzor pomocí jedné technologie. V každodenním životě se můžeme setkat s touto technologií například v klávesnicích či v kreditních kartách. [1] [3]

2.1 Podložky pro tlusté vrstvy

Podložky (substráty) tvoří nosnou část tlustých vrstev, od kterých je vyžadována řada elektrických, tepelných a mechanických vlastností. Základními požadavky jsou:

- teplotní roztažnost podložky by měla být blízká teplotní roztažnosti tlusté vrstvy, případně součástek na ní umístěných
- mechanická pevnost, nehořlavost a stabilita rozměrů
- vysoká teplotní vodivost pro odvod ztrátového tepla
- pro vysokofrekvenční aplikace je důležitá relativní permitivita a ztrátový činitel
- dobré izolační vlastnosti

Důležitost těchto požadavků a mnoho dalších vlastností závisí na typu aplikace, ve které budou tlusté vrstvy nanášeny na dané podložce použity. [1] [3] [4]

Nejpoužívanějšími podložkami jsou keramické podložky, jako je korundová keramika (Al_2O_3), oxid berylia (BeO) a nitrid hlinitý (AlN). Výhodou těchto podložek je, že mají velice dobrou tepelnou vodivost, dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Jejich nevýhodou oproti organickým materiálům je vyšší cena a náročnější opracování. V běžných aplikacích se nejčastěji používá korundová keramika. Ve výkonových aplikacích, kde je třeba zajistit dobrý odvod tepla, se používá BeO , který má dobrou tepelnou vodivost, ale jedná se však o toxický materiál. Alternativou pro BeO je AlN s také dobrou tepelnou vodivostí. Základní parametry jednotlivých podložek jsou uvedeny v tabulce 1. [2] [3] [4]

Dalším možným druhem podložek jsou kovové podložky, kde základem je měděná, hliníková či nerezová ocel, na které je nanášena izolační vrstva. Tato izolační vrstva může být vytvořena pomocí technologie tlustých vrstev s použitím dielektrické pasty. Na izolační vrstvu se poté mohou nanášet vodivé vrstvy. Výhodou těchto podložek je dobrá tepelná vodivost a mechanické vlastnosti. Nevýhodou je jejich teplotní roztažnost a používají se například pro mechanické senzory. V aplikacích, kde se nevyžaduje velká tepelná vodivost a je vyžadována nízká cena podložky, lze použít organickou podložku FR4 (skelná tkanina tvrzená epoxidovou pryskyřicí). [3] [2].

Tabulka 1: Parametry podložek pro tlusté vrstvy [2]

Parametry Materiál	96 Al ₂ O ₃	99 Al ₂ O ₃	BeO	AlN	FR4
Tepelná vodivost (J · s ⁻¹ · m ⁻¹ · K ⁻¹)	35	37	250	175	0,25
Součinitel tepelné roztlačnosti (ppm · K ⁻¹)	6,4	6,6	5	4,5	11
Elektrická pevnost (kV · mm ⁻¹)	8	9	14	12	35–65

2.2 Pasty používané pro tlusté vrstvy

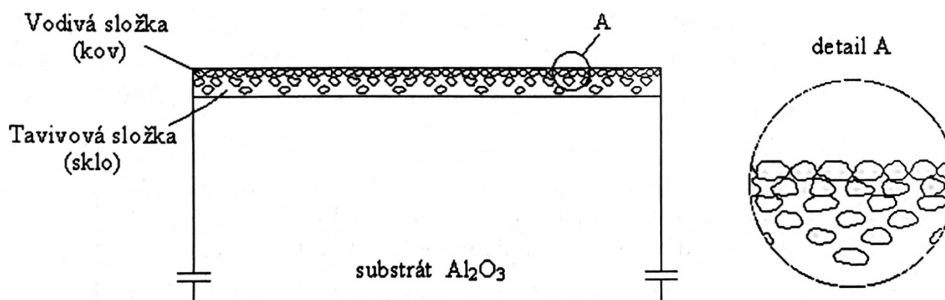
Tlusté vrstvy jsou zhotovovány z past, které jsou nanášeny na podložky pomocí jedné z technologií uvedených v kapitole 2.4. Pasty se skládají z několika složek, které určují následné vlastnosti tlustých vrstev. Lze je rozdělit na pasty anorganické a polymerní, pomocí nichž je možné realizovat vodivé, odporové, dielektrické či speciální vrstvy. [1] [2]

2.2.1 Anorganické pasty

Anorganické pasty se skládají ze tří složek:

- **Funkční** složka určuje hlavní vlastnost pasty. U vodivých past je tvořena kovovými částicemi (Ag, Au, Pt, Pd), u dielektrických past se jedná o materiály pro keramické kondenzátory I nebo II typu a u izolačních past je tato složka tvořena sklem ve formě prášku. Funkční složka pro odporové pasty je tvořena kovy (AgPd) nebo oxidy kovů (RuO₂).
- **Pojivová** složka slouží pro vytvoření vazby mezi částicemi funkční složky a spojení vrstvy s podložkou. Nejčastěji se jedná o skelnou fritu z nízkotavného skla.
- **Technologická** složka určuje viskozitu pasty, tato složka se odpaří při sušení a na počátku výpalu. Neurčuje výslednou funkci tlusté vrstvy.

Na obrázku 1 je znázorněna vypálená vrstva na korundové podložce. Vrstva je tvořena pouze funkční složkou a pojivovou (tavivovou) složkou, která vytváří základní matici vrstvy. [1] [2]



Obrázek 1: Struktura vypálené tlusté vrstvy [2]

2.2.2 Polymerní pasty

Polymerní pasty se skládají opět z několika složek:

- **Funkční** složka pro vodivé pasty je tvořena z prášku vodivých kovů, pro odporové pasty se používá uhlík a u dielektrických past se jedná o oxid hlinitý či jinou keramiku ve formě prášku.
- **Pojivová** složka je tvořena organickými polymery, která zajišťuje soudržnost a vytvoření vazby s podložkou.
- **Rozpouštědla** zajišťují potřebnou viskozitu pasty a chemickou reakci polymeru s podložkou.

K vytvrzení polymerních past dochází při teplotách pod 200 °C. Lze tak nanášet polymery, které po zahřátí zůstávají měkké a ohebné, na flexibilní podložky (plastové fólie). Polymerní pasty je možné nanášet jak na organické tak i na anorganické podložky. [1] [2]

2.3 Základní vlastnosti tlustých vrstev

Elektrické vlastnosti tlustých vrstev jsou důležitými parametry, které určují jejich možné použití v dané aplikaci. Důležitým parametrem vodivých a odporových tlustých vrstev je jejich odpor na čtverec, teplotní závislost odporu, stabilita, proudová zatížitelnost a mnoho dalších vlastností. U dielektrických vrstev je důležitá relativní permitivita a elektrická pevnost. V této kapitole budou uvedeny jen některé vyjmenované vlastnosti. [3] [5]

2.3.1 Odpor na čtverec

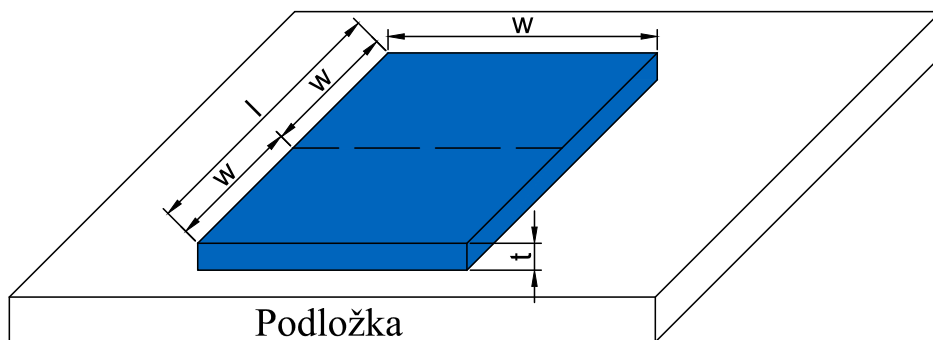
Odpor na čtverec je jedním z charakteristických parametrů tlustých vrstev. Odpor vodiče, který je zhotoven z materiálu o rezistivitě ρ ($\Omega \cdot \text{m}$), délce l (m) a průřezu S (m^2) je dán vztahem

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{t w}. \quad (1)$$

Poté odpor na čtverec R_{\square} tlusté vrstvy o tloušťce t (m) a šířce w (m) je dán poměrem ρ a t , jednotkou je Ω/\square .

$$R = R_{\square} \frac{l}{w}. \quad (2)$$

Počet čtverců, ze kterých se pomyslně vodivá vrstva skládá je dán poměrem její délky l a šířky w . Výrobce past většinou udává pro danou pastu její odpor na čtverec při její předpokládané tloušťce. Odpor na čtverec u vodivých past se pohybuje v jednotkách $m\Omega/\square$ a u odporových past v rozsahu $1-10^9 \Omega/\square$, záleží na složení pasty. [3] [6]



Obrázek 2: Rozměry tlusté vrstvy

2.3.2 Teplotní závislost odporu

Při změně teploty dochází ke změně odporu vrstvy, tuto změnu charakterizujeme teplotním součinitelem odporu TKR . Pro malou změnu teploty můžeme teplotní součinitel odporu vyjádřit vztahem

$$TKR = \frac{\Delta R/R}{\Delta T}. \quad (3)$$

U typických tlustých vrstev relativní změna odporu s rostoucí teplotou klesá, dosahuje minima a pak roste. Tlusté vrstvy mají na určitém rozsahu teplot záporné TKR , označujeme ho jako studené a na určitém rozsahu kladné TKR , které označujeme jako horké. Minima většinou dosahuje v okolí pokojových teplot, proto

tyto vrstvy vykazují dobrou stabilitu odporu při pokojových teplotách. Závislost odporu na teplotě závisí na složení pasty a tuto závislost lze upravovat vhodnými přísadami. [3] [6]

2.3.3 Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost udává maximální hodnotu proudu, která vodičem může protékat, aniž by došlo k překročení jeho dovoleného oteplení. Proudové zatížení závisí jak na teplotě okolí, tak na materiálu a rozměrech vodiče. [5]

Při průchodu proudu I (A) vodičem o odporu R (Ω) vznikají Joulovy ztráty, které způsobují oteplení vodiče. Tyto ztráty lze vyjádřit pomocí vztahu

$$\Delta P_j = R I^2. \quad (4)$$

V ustáleném stavu, stav ve kterém nedochází k časovým změnám veličin, je veškeré teplo, které ve vodiči vznikne odvedeno do okolí a nedochází tak ke zvýšení teploty vodiče. Lze jej tedy vyjádřit jako

$$Q = R I^2 t, \quad (5)$$

kde t (s) je čas. [5]

Pro určení maximální hodnoty proudu vodiče I_{max} desky plošného spoje (DPS) se dle standartu IPC 2221 používá vztah

$$I_{max} = k_1 \Delta \vartheta^{k_2} (w t)^{k_3}, \quad (6)$$

kde w je šířka vodiče, t je tloušťka a $\Delta \vartheta$ je oteplení vodiče. Konstanta k_1 určuje umístění vodiče, pro venkovní umístění je rovna 0,048 a pro vnitřní umístění 0,024. Konstanta k_2 je pro DPS 0,44 a k_3 je rovna 0,725. [5] [7]

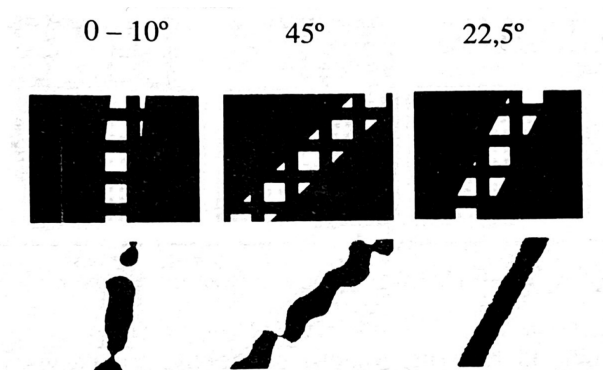
2.4 Technologie tlustých vrstev

Technologie tlustých vrstev je aditivní nevakuovaná depoziční metoda, pomocí které se vytváří vodivé, odporové či dielektrické obrazce na vhodné podložce. Je snaha docílit přesného nanášení motivů, spolu s ostrými obrysy. Nejčastěji používanými a prvotními technologiemi je sítotisk a šablonový tisk, s rozvojem elektroniky byly zavedeny nové technologie, jako je dispensing (dávkování) či jetting (tryskání). [1] [2]

2.4.1 Sítotisk

Principem této technologie je protlačení pasty skrz volná oka síta pomocí stěrky na podložku v požadovaném motivu. To lze provést na ručních nebo na poloautomatických či automatických strojích. Výhody této technologie jsou nízké náklady na vybavení, jednoduchá údržba, automatizace a široký výběr použitých materiálů. [1] [6]

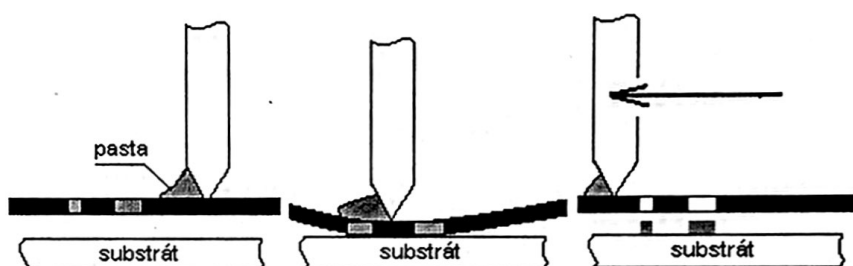
Síta jsou napínána předem definovanou silou na napínacích zařízeních a připevněna nejčastěji ke kovovým rámcům z hliníku či oceli. Rámy by měly mít malou tepelnou roztažnost a měly by zajistit uchycení síta v napnutém stavu po celou dobu života. Síta se vyrábějí z nerezové ocelové nebo polyesterové tkaniny. Síta z nerezové oceli mají delší životnost a používají se pro tisk přesných obrazců, oproti tomu polyesterová síta se vyznačují nízkou cenou. Volba síta závisí na požadavcích tloušťky vrstvy, přesnosti a ostroty obrazců a na použité pastě. Velikost ok síta by měla být 2,5 až 3 krát větší než je velikost částic pasty, aby byl zajištěn dobrý průchod pasty skrz síto. [1] [2]



Obrázek 3: Úhel směru vláken síta a tištěného obrazce [1]

Pro vytvoření požadovaného motivu je třeba zajistit, aby některá oka byla průchozí v místech, kudy má projít pasta na podložku, a některá oka musí být zaslepena. Takto upravená síta označujeme jako sítotiskové šablony. U přímé sítotiskové šablony je využívána světlocitlivá emulze, která je nanesena a následně protlačena do ok síta. Poté následuje osvit síta přes masku, při které dochází k vytvrzení osvětlené emulze. Při oplachu síta je odstraněna neosvětlená emulze a vznikají tak místa, kterými je možné protlačit pastu. U nepřímé šablony je motiv vytvořen mimo síto opět pomocí světlocitlivé emulze většinou na plastovém nosiči, vytvořený motiv je poté na síto připevněn. Nepřímá šablona umožňuje dosahovat poměrně velkých rozlišení. Pro kvalitní tisk, zejména ostrot obrazců, je důležitý úhel směru vláken a tištěného obrazce. Bylo zjištěno, jak je znázorněno na obrázku 3, že ideální úhel je 22,5°. [1] [2]

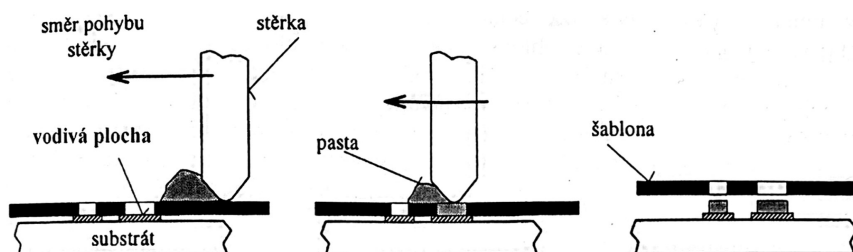
Samotný tisk probíhá nanesením pasty na šablonu, která je pomocí stěrky protlačována skrz síto na podložku. Podložky musí být mechanicky nebo vakuově uchyceny, aby nedocházelo k pohybu podložek během tisku. Stěrky jsou buď polyuretanové nebo kovové s různými tvary břitů. Šablona je umístěna v určité vzdálenosti nad podložkou, tuto vzdálenost nazýváme odskok a je jedním z faktorů určující kvalitu tisku. Stěrka při pohybu působí určitou silou na šablonu a způsobuje její průhyb, čímž dochází k přiblížení šablony k podložce a přenosu pasty na podložku. Pomocí odskoku šablony zůstává na podložce požadovaný obrazec. Kvalita tisku závisí na rychlosti pohybu stěrky, tlaku stěrky, volby síta, pasty a na mnoha dalších faktorech. [1] [2]



Obrázek 4: Ukázka technologie sítotisku [2]

2.4.2 Šablonový tisk

Technologie šablonového tisku je podobná sítotisku, jen místo síta je použita šablona. Šablona je většinou tvořena z ocelové, molybdenové nebo bronzové planžety, v některých případech se používají i plastové šablony. U kovových šablon se požadovaného motivu dosahuje pomocí leptání, elektrogalvanického nanášení, které umožňuje vytvářet šablony velmi malých tlouštěk nebo laserového řezání, které se používá pro realizaci přesných motivů, ale je oproti leptání výrazně dražší. Šablony jsou podobně jako u sítotisku uchyceny v rámu. [1] [2]



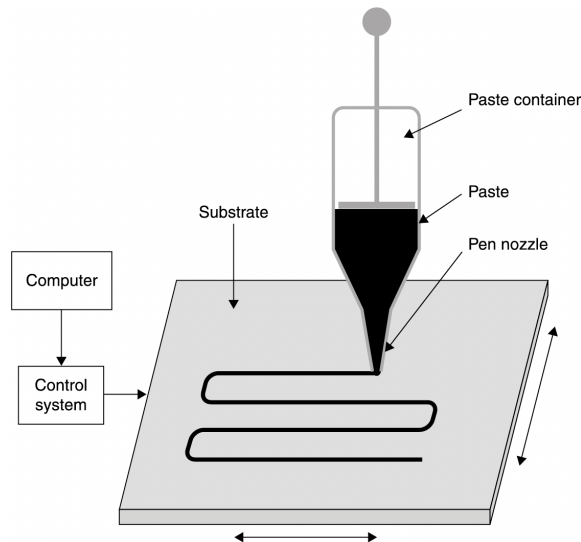
Obrázek 5: Ukázka technologie šablonového tisku [2]

Při tisku je šablona přímo přiložena na podložku a pomocí stěrky je pasta vtlačována do volných míst šablony. Po přejetí stěrky přes šablonu a vyplnění volných míst šablony je nutné provést odtrh šablony od podložky, aby došlo k oddělení pasty od šablony a pasta zůstala v požadovaném motivu na podložce. Z toho vyplývá, že tloušťka vrstvy je dána tloušťkou šablony a nanášený motiv je omezen mechanickou tuhostí šablony. Ukázka šablonového tisku je na obrázku 5. [1] [2]

2.4.3 Dispensing

Tato metoda je založena na nanášení pasty ze zásobníku pomocí plných či dutých jehel na podložku. Při využití plných jehel, je jehla ponořena do zásobníku, poté následuje její přesun nad podložku na místo, kam má být pasta aplikována a při přiblížení jehly k podložce dojde k přenosu pasty na podložku. Tvar a velikost nanesené kapky jsou dány tvarem jehly, viskozitou pasty a hloubkou ponoru jehly do pasty. Pro rychlejší nanášení se využívá vícejehlového pole. [1]

Další možností je využití duté jehly, kde pasta je umístěna v zásobníku, podobně jako u injekční stříkačky. Řízeným tlakem je pasta vytlačována do duté jehly (psací hlavice) a nanášena na podložku. Pohyb jehly nebo podložky je většinou zajištěn programovým mechanismem a vytlačování pasty ze zásobníku je provedeno tlakem vzduchu nebo pomocí pístu se šroubovým posuvem. Pomocí této metody lze vytvářet vrstvy široké od 50 μm do 2,5 mm, které je možné nanášet jak na nerovné, tak i na flexibilní substráty. Moderní hlavice umožňují při ukončení nanášení odsátí pasty zpět do psací hlavice tak, aby na konci nevznikala širší vrstva a byla zajištěna konstantní šířka. [1] [6]



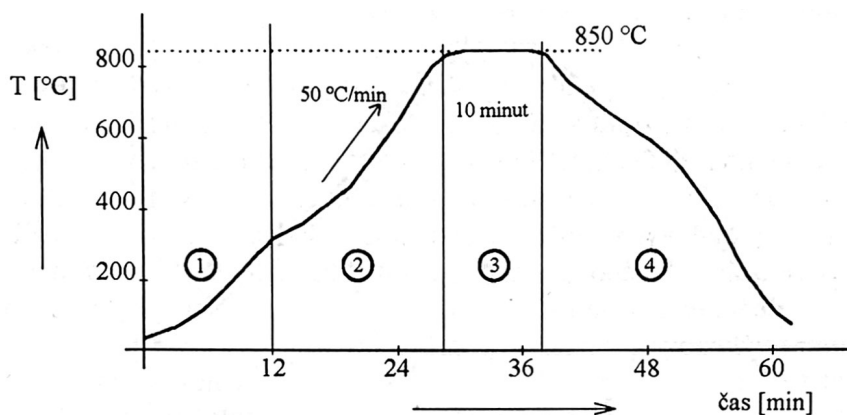
Obrázek 6: Ukázka principu dispensingu [6]

2.4.4 Jetting

Tato technologie využívá dvě různé techniky. Jedním z nich je kontinuální tisk, kdy nanášený materiál ve formě kapek je řízen elektrickým polem. Nenabitě kapky jsou zachycovány a recirkulovány. Tato technika umožňuje rychlé nanášení materiálu. Druhý způsob je označován jako drop-on-demand, tryska tiskové hlavy je umístěna svisle, blízko nad podložkou a z této trysky jsou řízeně vypouštěny kapky na podložku. [1] [6]

2.4.5 Výpal a vytvrzení nanesených past

Po nanesení pasty v požadovaném motivu na podložku, jednou z uvedených technologií, je nutné jejich tepelné zpracování. Prvním krokem je sušení, kdy dojde k odpaření těkavé složky a nanesená vrstva se stává mechanicky odolnější při manipulaci. Poté následuje samotný výpal při teplotách mezi 600 °C až 1200 °C, tato teplota je dána typem pasty. Při výpalu nedochází k roztavení pojivové složky, ale pouze k jejímu měknutí, tím vzniká vazba vrstvy s podložkou a její samotná struktura. Pro dosažení vhodných vlastností vrstvy a možnosti reprodukovatelnosti je nutné dodržet předem definovaný průběh teploty. Ukázka průběhu teploty pro výpal tlusté vrstvy je znázorněna na obrázku 7. [1] [2]



Obrázek 7: Teplotní průběh pro výpal anorganické pasty [2]

Při použití polymerních past nedochází k výpalu, ale mluvíme o vytvrzení, protože by tyto pasty tak vysokou teplotu nevydržely. Stejně jako u tepelného zpracování anorganických past je prvním krokem sušení a poté následuje vytvrzení, které probíhá při teplotách do 200 °C. [1]

3 Způsoby šíření tepla a měření teploty

Teplu v elektronických zařízeních vzniká přeměnou elektrické energie na tepelnou. Zdrojem této tepelné energie jsou nejčastěji součástky (pasivní i aktivní), které vykazují určitý ztrátový výkon. Důsledkem této tepelné energie je zvýšení teploty zařízení, což vede ke změně parametrů součástek, zkrácení doby života, degradaci materiálů a mechanickému pnutí. Proto je při návrhu zařízení snaha minimalizovat ztrátový výkon a zajistit dostatečné chlazení (odvod tepla). [2]

Rozlišujeme tři způsoby šíření tepla:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekci)
- sáláním (radiací)

Popis těchto způsobů šíření tepla, který bude stručně uveden v následujících kapitolách, je důležitý pro správný návrh zařízení a chlazení součástek. [2]

3.1 Vedení tepla

Přenos tepla vedením nastává pouze v látkovém prostředí, zejména v pevných látkách, v kapalinách a plynech není příliš výrazný. K popisu šíření tepla byly zavedeny některé důležité veličiny, jako je tepelný tok ϕ (W) a hustota tepelného toku \mathbf{q} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), která vyjadřuje množství energie prošlou plochou za určitý čas. [8]

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

$$\mathbf{q} = \frac{d\phi}{d\mathbf{S}} \quad (8)$$

Základní zákon vedení tepla popisuje Fourierův zákon, který udává vztah mezi hustotou tepelného toku, tepelnou vodivostí a gradientem teploty.

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T \quad (9)$$

Ze vztahu plyne, že hustota tepelného toku má opačný směr než gradient teploty, tedy má směr od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou. Tepelná vodivost λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je charakteristická pro daný materiál, udává propustnost tepla danou látkou a její velikost závisí na teplotě. V praktických aplikacích se pro výpočet uvažuje její střední hodnota. [8] [9]

3.2 Proudění tepla

K přenosu tepla prouděním může dojít pouze v látkovém prostředí a slouží k popisu přenosu tepla v kapalinách a plynech. Tento přenos tepla je vázán na přenos hmoty z jednoho místa na druhé a rozlišujeme tak proudění tekutin přirozené nebo nucené (například pomocí ventilátoru). Přenos tepla prouděním je doprovázen i přenosem tepla vedením a jejich podíl závisí na druhu proudění a na vlastnostech látky. [2] [8]

Matematický popis šíření tepla prouděním je složitý a pro praktické výpočty se používá matematicko-experimentální model, který popisuje obtékání povrchu pevného prostředí o teplotě T_S a proudící tekutiny o teplotě T_A .

$$q = \alpha (T_S - T_A) \quad (10)$$

Člen v rovnici α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) se nazývá součinitel přestupu tepla a závisí na parametrech proudící tekutiny, ale také na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. [2] [8]

3.3 Sálání tepla

K přenosu tepla sáláním není třeba látkové prostředí jako tomu bylo v předchozích dvou případech. Teplo je přenášeno pomocí elektromagnetických vln, které vyzařuje každé neprůzračné těleso, jehož termodynamická teplota je větší než 0 K. Energie vyzařovaná tělesem může být částečně pohlcena jiným tělesem, částečně odražena a část může tělesem projít. To znamená, že tělesa energii vyzařují a zároveň ji absorbují, kde absorbovaná energie se mění na teplo. Mají-li dvě tělesa, které na sebe září, stejnou teplotu, pak je vyzařovaná i absorbovaná energie stejná. [8] [9]

Množství tepla dopadajícího na těleso Q_0 je částečně tělesem pohlceno Q_A , část odraženo Q_R a část tělesem projde Q_D , potom můžeme psát

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0. \quad (11)$$

Pokud tuto rovnici vydělíme Q_0 a jednotlivé podíly, které nám vzniknou na levé straně rovnice, označíme A , R , D , získáme následující rovnici.

$$A + R + D = 1 \quad (12)$$

Tato rovnice nám charakterizuje vztah tělesa vzhledem k dopadajícímu záření. Člen A označujeme jako pohltivost (absorpce), R jako odrazivost (reflexe) a člen D jako průteplivost, jedná se o bezrozměrné veličiny a nabývají hodnot od 0 do 1. Těleso, které má $A = 1$ (pak $R = 0$, $D = 0$), veškerou dopadající energii pohltí a toto těleso označujeme za absolutně černé těleso. Parametry A , R , D jsou závislé na vlnové délce elektromagnetické vlny a pro každou vlnovou délku musí platit, že jejich součet je roven 1. [8] [9]

Vztah mezi celkovou intenzitou záření M ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) absolutně černého tělesa a jeho teplotou popisuje Stefan-Boltzmannův zákon.

$$M = \sigma T^4 \quad (13)$$

Člen σ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) je Stefan-Boltzmannova konstanta a T (K) je termodynamická teplota. Planckův zákon popisuje vztah spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa v závislosti na jeho povrchové teplotě. Integrací tohoto vztahu, pro všechny vlnové délky, získáme vztah pro Stefan-Boltzmannův zákon. Závislost vlnové délky, při které je spektrální intenzita záření největší, a teploty popisuje Wienův posunovací zákon. Tento zákon říká, že s rostoucí teplotou tělesa dochází k posunu vlnové délky, při které intenzita záření dosahuje maxima, ke kratším vlnovým délkám. [8]

Tepelný tok vyzářený povrchem tělesa můžeme popsat vztahem

$$\phi = \varepsilon \sigma S T^4, \quad (14)$$

kde ε (–) je emisivita povrchu. Obsah povrchu tohoto tělesa je S (m^2) a T (K) je teplota povrchu. [2]

Emisivita pro danou vlnovou délku se nazývá spektrální emisivita a je dána jako podíl spektrální intenzity záření daného tělesa a spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa při stejné teplotě. Pokud je spektrální emisivita tělesa konstantní pro celý rozsah vlnových délek, nazýváme toto těleso šedým tělesem. Dále je zavedena totální emisivita, která je dána jako vážený průměr emisivity pro všechny vlnové délky s vahou spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa nebo je také zavedena pásmová emisivita, která je dána jako průměrná hodnota emisivity na určitém pásmu vlnových délek. Emisivita je zejména důležitá pro správné bezdotykové měření teploty a je závislá na druhu materiálu, jeho povrchu, struktuře a chemickém složení. [10] [11]

Pokud budeme uvažovat těleso v tepelné rovnováze, tedy vyzářená energie je rovna absorbované, tak podle Kirchhoffova zákona je spektrální emisivita rovna spektrální pohltivosti. To znamená, pokud budeme uvažovat neprůteplivé (nepropustné) těleso ($D = 0$), tak poté, pokud toto těleso dobře pohlcuje energii, tak zároveň ji dobře vyzařuje a obráceně. Zároveň také pokud toto těleso energii dobře pohlcuje, pak ji hůře odráží. [10] [12]

3.4 Náhradní tepelný obvod

Pro správnou funkci a dlouhou životnost součástek je důležité nepřekročit jejich dovolené oteplení, které je dáno ztrátovým výkonem. Určení maximální teploty součástek pomocí uvedených vztahů pro šíření tepla je velice složité a náročné. Z tohoto důvodu se pro popis šíření tepla používá náhradní tepelný obvod. Tento

náhradní tepelný obvod umožňuje například určit maximální výkonové zatížení součástek nebo lze tak modelovat jejich chlazení. [2]

Tepelný obvod se podobně jako elektrický obvod skládá také ze zdroje a pasivních prvků. Existuje jistá analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami, která je znázorněna v tabulce 2. Pro tepelný obvod lze tak psát obdobné zákony jako pro elektrický obvod. [2]

Tabulka 2: Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami [2] [13]

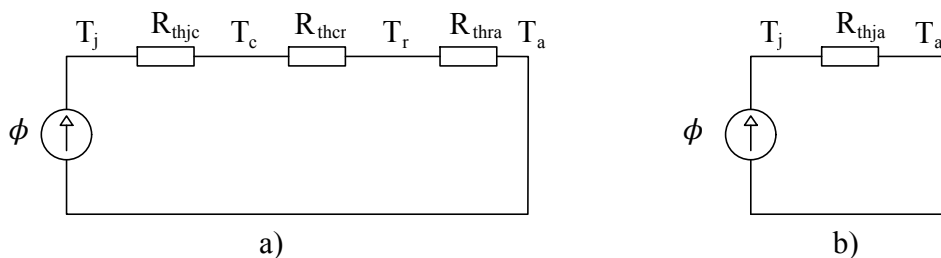
tepelné veličiny	elektrické veličiny
rozdíl teplot ΔT (K)	elektrické napětí U (V)
tepelný tok ϕ (W)	elektrický proud I (A)
tepelný odpor R_{th} ($K \cdot W^{-1}$)	elektrický odpor R (Ω)
tepelná kapacita C_{th} ($J \cdot K^{-1}$)	elektrická kapacita C (F)
tepelná vodivost λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	elektrická vodivost $\gamma = 1/\rho$ ($S \cdot m^{-1}$)

Budeme-li uvažovat ustálený stav, tedy stav, kdy se tepelné veličiny v čase nemění, a jednorozměrný problém, můžeme tepelný obvod sestavit ze zdroje (analogie ke zdroji proudu) a tepelných odporů (analogie elektrických odporů). Na obrázku 8 je znázorněn tepelný obvod polovodičové součástky, který se skládá ze zdroje, který reprezentuje ztrátový výkon, tepelných odporů mezi přechodem a základnou R_{thjc} , mezi základnou a chladičem R_{thcr} a mezi chladičem a okolím R_{thra} . Poté můžeme pro tepelný obvod napsat rovnici

$$\Delta T_{ja} = \phi (R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}) = \phi R_{thja}. \quad (15)$$

Tento tepelný obvod můžeme zjednodušit a pro maximální teplotu přechodu můžeme určit maximální ztrátový výkon, podle následujícího vztahu. [2] [14]

$$\phi_{max} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thja}} \quad (16)$$

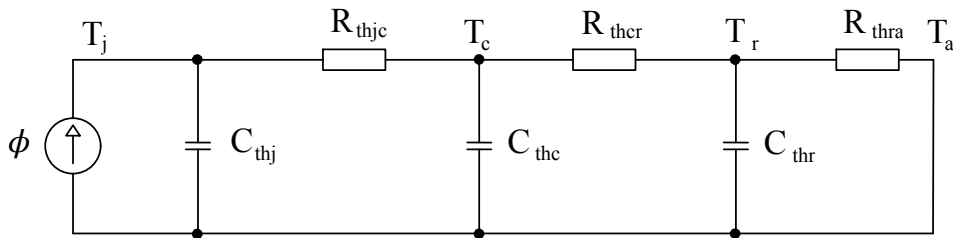


Obrázek 8: Náhradní tepelný obvod v ustáleném stavu polovodičové součástky a) úplný b) zjednodušený

Při přechodných dějích, například při skokové změně ztrátového výkonu, nedojde ke změně teploty okamžitě, ale teplota se bude měnit podle určité časové závislosti. Veškeré vzniklé teplo není odvedeno do okolí, ale část se podílí na ohřátí součástky. Tato postupná změna teploty je způsobena tepelnou kapacitou, kterou lze vypočítat, pro materiál o měrné tepelné kapacitě c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), hustoty ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a objemu V (m^3), podle následujícího vztahu. [14] [13]

$$C_{th} = c \rho V \quad (17)$$

Poté můžeme pro polovodičovou součástku, podobně jako v ustáleném stavu, vytvořit tepelné schéma, které bude tvořeno RC články. Toto schéma je znázorněno na obrázku 9. Jednotlivé tepelné kapacity respektují tepelnou kapacitu materiálu, ze kterých je polovodičová součástka tvořena. [14] [13]



Obrázek 9: Náhradní tepelný obvod polovodičové součástky pro přechodný děj

Popis přechodného děje by byl pro uvedený tepelný obvod složitý, zavádí se proto zjednodušující vztah pro časovou závislost teploty

$$T_j(t) = T_a + \phi R_{thja} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = T_a + \phi Z_{thja}, \quad (18)$$

kde $\tau = R_{thja} C_{thja}$ (s) je tepelná časová konstanta a t (s) představuje čas. Člen Z_{thja} ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) označujeme jako tepelnou impedanci, která je v ustáleném stavu rovna tepelnému odporu R_{thja} . [14] [13]

3.5 Metody měření teploty

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje stav hmoty. Jedná se o veličinu, kterou nelze měřit přímo, k jejímu měření využíváme teplotní závislost jiných fyzikálních veličin. Většina fyzikálních vlastností látek je závislá na teplotě. [15]

Pro teplotu bylo zavedeno několik teplotních stupnic. Základní stupnicí je termodynamická stupnice, jejíž počátek je dán absolutní nulou. Jednotkou této stupnice je kelvin (K), který byl definován pomocí termodynamické teploty trojného bodu vody. Od této stupnice byla odvozena Celsiova teplotní stupnice, jejíž jednotkou

je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Jednotka Celsiova stupně je rovna jednotce kelvina, proto přepočítání mezi těmito dvěma stupnicemi je velice jednoduchý.

$$\vartheta = T - T_0 \quad (19)$$

Člen ϑ ve vztahu pro přepočítání je teplota ve stupních Celsia, T je teplota v kelvinech a $T_0 = 273,15 \text{ K}$. V některých státech se používá ještě Fahrenheitova stupnice. [15] [16]

V roce 1990 byla přijata Mezinárodní teplotní stupnice, označována jako ITS-90, která je založena na konečném počtu definičních pevných bodů. Těmto bodům odpovídají teploty, při kterých dochází k reprodukovatelným změnám vnitřní struktury vybraných látek. Teplotní stupnice se realizuje podle přesně daného postupu v intervalech mezi definičními body pomocí interpolačních přístrojů. [15] [16]

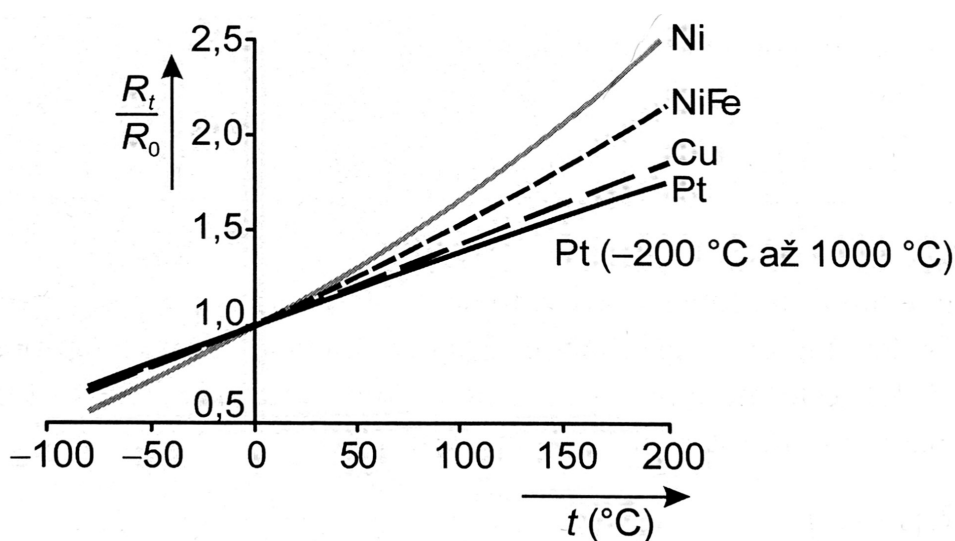
K měření teploty se používají teplotní senzory, které můžeme podle dotyku s měřeným prostředím rozdělit na dotykové a bezdotykové. Dalším možným dělením senzorů může být podle transformace signálu na aktivní (termočlánek) nebo pasivní, u kterých je nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu. [15]

3.5.1 Kovové odporové senzory teploty

Kovové odporové senzory teploty využívají teplotní závislost odporu kovu. Tato závislost je přímo úměrná, tedy s rostoucí teplotou roste elektrický odpor kovu. Pro posuzování kovových odporových senzorů se používá lineární aproximace závislosti odporu na teplotě mezi teplotami $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato lineární aproximace je označována jako teplotní součinitel odporu $\alpha \text{ (K}^{-1}\text{)}$, kde $R_{100} \text{ (}\Omega\text{)}$ je hodnota odporu při teplotě $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $R_0 \text{ (}\Omega\text{)}$ je hodnota odporu při teplotě $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [15] [17]

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} \quad (20)$$

Používanými materiály pro kovové odporové senzory teploty jsou platina, nikl, měď či některé slitiny kovů. Nejpoužívanějším materiálem je platina, protože má vysokou teplotu tání, je časově stabilní a její závislost odporu na teplotě se blíží lineární závislosti. Niklové snímače teploty se vyznačují rychlou odezvou, velkou citlivostí, horší stabilitou, menším teplotním rozsahem a oproti platině mají značnou nelineární závislost odporu na teplotě. Měděné snímače teploty mají dobrou lineární závislost, ale jejich nevýhodou je snadná oxidace. Teplotní závislost odporu mědi se například využívá pro měření teploty měděného vinutí elektrického stroje. Teplotní závislost odporu na teplotě pro jednotlivé materiály je zobrazena na obrázku 10. [15] [17]



Obrázek 10: Teplotní závislost kovových odporových sensorů teploty [15]

Platinové odporové senzory teploty se označují Pt100, kde číslice označuje hodnotu odporu při teplotě 0 °C, tedy pro Pt100 je $R_0 = 100 \Omega$, vyrábějí se ale i senzory s jinými základními hodnotami 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Pro průmyslové použití se vyrábějí platinové senzory ve dvou tolerančních třídách, třída A pro rozsah teplot od -200 °C do 650 °C a třída B pro rozsah teplot od -200 °C do 850 °C. Teplotní závislost odporu je dána polynomem pro rozsah teplot od -200 °C do 0 °C

$$R(\vartheta) = R_0 [1 + A \vartheta + B \vartheta^2 + C \vartheta^3 (\vartheta - 100)] \quad (21)$$

a pro rozsah teplot od 0 °C do 850 °C vztahem

$$R(\vartheta) = R_0 (1 + A \vartheta + B \vartheta^2), \quad (22)$$

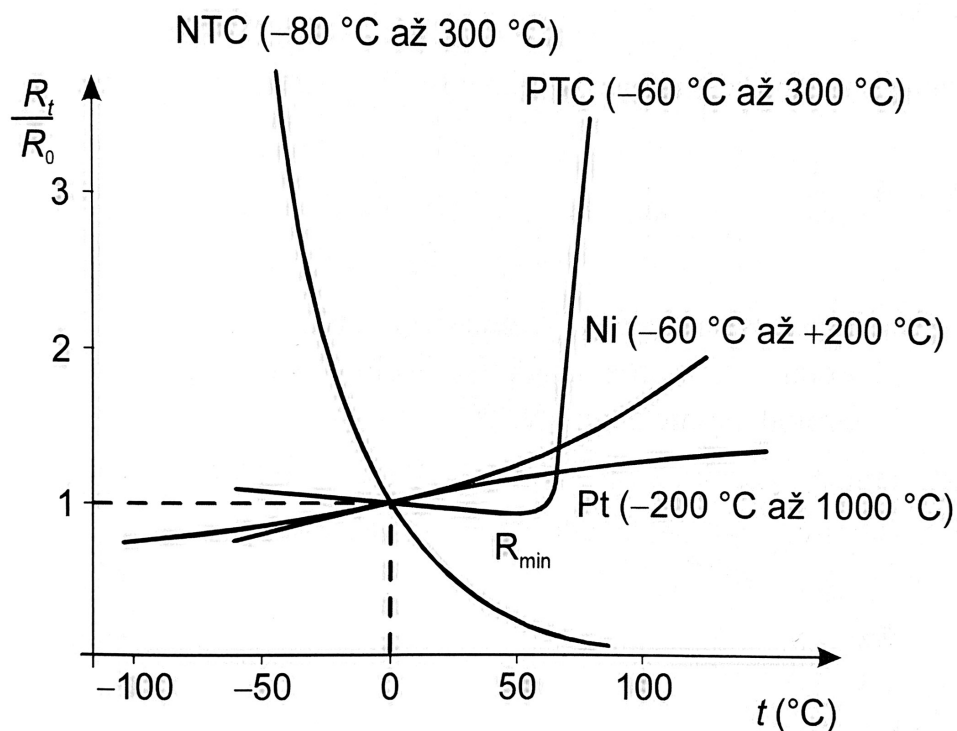
kde ϑ (°C) je teplota a A, B, C jsou koeficienty. [15] [17]

Jedním z hlavních problémů při konstrukci kovových odporových sensorů teploty je změna odporu odporové dráhy při mechanickém namáhání, jako jsou vibrace, rázy či různá teplotní roztažnost odporového materiálu a izolační nosné konstrukce. Odporový senzor může být tvořen drátkem, který je volně navinut na nosnou konstrukci nebo drátek stočený do spirály a vložen do válcových otvorů keramického tělíska. Toto uspořádání zajišťuje snadné rozpínání drátku při změně teploty, ale není příliš odolné proti vibracím a rázům. Odporová dráha může být také realizována pomocí tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie, pomocí které je odporový materiál nanesen na podložku ve tvaru meandru. Výhodou těchto vrstevových odporových sensorů je odolnost proti vibracím a rázům, ale jejich nevýhodou je menší přesnost v širším rozsahu teplot z důvodu rozdílné teplotní roztažnosti vrstvy a podložky. [17] [18]

Při přesném měření teploty pomocí kovových odporových senzorů teploty je nutné brát v úvahu jejich hysterezi, kdy senzor bude mít jinou hodnotu odporu při rostoucí teplotě z teploty t_1 na teplotu t_2 a při klesající teplotě z teploty t_2 na teplotu t_1 . Dalším důležitým nepříznivým jevem je samoohřívání senzoru. Při průchodu měřicího proudu senzorem vzniká Joulovo teplo, které způsobuje ohřev senzoru, tím pádem je změřená teplota větší než skutečná. Výrobci senzorů tak většinou udávají maximální hodnotu měřicího proudu, aby nedošlo k přílišnému zkreslení výsledku. Při měření přechodného děje je také důležitá časová odezva senzoru, která se udává jako doba, za kterou je dosaženo 50% nebo 90% výstupní hodnoty, při skokové změně teploty. [17] [18]

3.5.2 Termistory

Termistory využívají, podobně jako kovové odporové senzory teploty, teplotní závislost odporu. Jedná se o senzory, které jsou zhotoveny z polovodičového materiálu a podle teplotního součinitele odporu je dělíme na NTC, které mají záporný teplotní součinitel odporu a PTC, které mají kladný teplotní součinitel odporu. Charakteristická závislost odporu na teplotě pro termistory je znázorněna na obrázku 11. [15]



Obrázek 11: Teplotní závislost termistorů v porovnání s kovovými odporovými senzory teploty [15]

Pro měření teploty se nejčastěji používají NTC termistory, které se vyrábějí sli-
sováním oxidů kovů do tvaru disku, destičky, kapky či válečku a následuje jejich
slinování za vysokých teplot. Jejich výhodou je velká teplotní citlivost, malé roz-
měry a krátká časová odezva. [15] [17]

NTC termistory mají nelineární teplotní závislost odporu a jejich běžné použití je
v rozsahu teplot od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale vyrábějí se i pro jiné rozsahy teplot.
Teplotní závislost odporu je většinou popisována pomocí následující rovnice

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (23)$$

kde R_0 (Ω) je odpor při teplotě T_0 (K) a parametr β (K) je charakteristický pro
daný materiál termistoru a je závislý na teplotě. Pro zjištění teploty T ze změřeného
odporu R_T se používá aproximace pomocí polynomu.

$$T = [A_0 + A_1 \ln R_T + \dots + A_n (\ln R_T)^n]^{-1} \quad (24)$$

Ve většině aplikacích je pro výpočet teploty postačující polynom třetího stupně
s vypuštěním kvadratického členu. [15] [17]

Při měření teploty pomocí termistorů vzniká chyba, podobně jako u kovových od-
porových senzorů teploty, vlivem měřicího proudu, který způsobuje samoohřívání
senzoru. Tento jev závisí na velikosti měřicího proudu, také na rozměrech nebo
materiálu, ze kterého je termistor vyroben. [17]

PTC termistory jsou termistory, které se vyrábějí z polykrystalické feroelektrické
keramiky a mají kladný teplotní součinitel odporu. Odpor PTC termistoru s ros-
tující teplotou nejprve mírně klesá a při určité teplotě začne jeho odpor strmě stou-
pat (až o několik řádů) a poté opět mírně klesá. Této závislosti odporu na teplotě
PTC termistorů se také využívá pro použití termistorů jako tepelné ochrany, ome-
zovače proudu, časové zpoždění nebo regulace teploty. [15] [17]

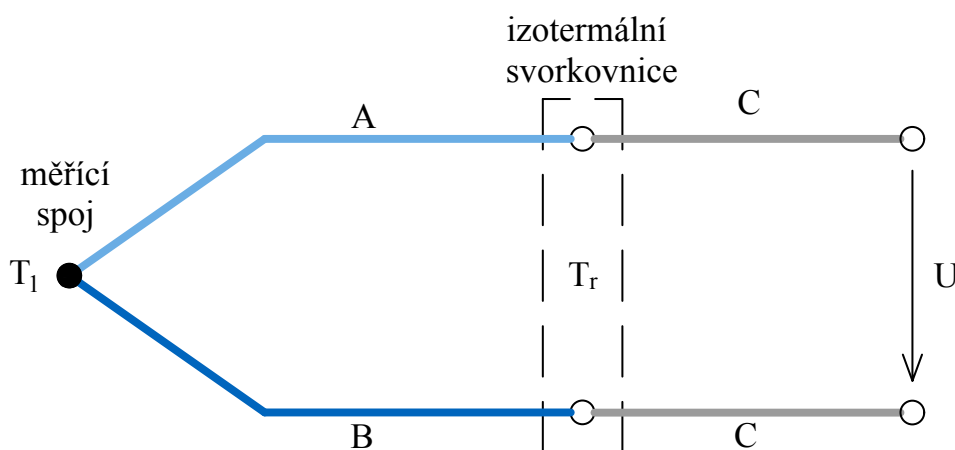
3.5.3 Termoelektrické články

Pro měření teploty jsou také využívány termočlánky, jedná se o senzory tvořené
dvěma různými kovy, které využívají Seebeckova jevu. Výhodou termočlánků je
jejich krátká časová odezva, dobrá teplotní stabilita v širokém rozsahu teplot a mož-
nost měření vysokých teplot. [15] [18]

Výstupem termočlánku je termoelektrické napětí, které je úměrné rozdílu teplot.
Pokud spojíme dva rozdílné kovy a jeden spoj bude mít větší teplotu než druhý
a jestliže tento vzniklý obvod rozpojíme na libovolném místě, pak na vzniklých
svorkách naměříme termoelektrické napětí. Pro malý rozdíl teplot lze použít jed-
noduchý vztah, který předpokládá lineární závislost mezi rozdílem teplot a termo-
elektrickým napětím.

$$U = \alpha (T_1 - T_r) \quad (25)$$

Termoelektrické napětí mezi svorkami je U (V), člen α ($V \cdot K^{-1}$) je termoelektrický koeficient pro danou dvojici kovů, T_1 (K) je teplota teplejšího spoje a T_r (K) je referenční teplota. Pro větší rozdíl teplot je závislost nelineární a je nutné použít polynom vyšších řádů. [15] [10]



Obrázek 12: Jednoduché schéma termočlánku tvořený dvěma rozdílnými materiály A, B a propojovacím vedením z materiálu C

Termočlánky se vyrábějí z takových dvou různých materiálů, aby bylo dosaženo co největšího napětí na výstupu a zároveň, aby byly odolné proti korozi a atmosférickým vlivům, měly vysokou teplotu tání a byly časově stabilní. Je snaha používat takové materiály, u kterých se závislost termoelektrického napětí na teplotě co nejvíce blíží lineární závislosti. Byla proto standartem IEC zavedena řada dvojic materiálů, které tyto požadavky splňují. [15] [10]

Charakteristika termočlánku je udávána vzhledem k referenční teplotě, která většinou bývá 0°C , proto je nutné, v případě, kdy je při měření referenční hodnota jiná, provést kompenzaci. Kompenzaci lze provést například použitím kompenzační krabice, která využívá odporový můstek nebo pomocí integrovaných obvodů. Při měření je také nutné zajistit, aby referenční teplota nekolísala, ale byla konstantní. [15] [10]

3.5.4 Bezdotykové měření teploty

Jak už bylo uvedeno v kapitole 3.3, tak každé těleso, jehož teplota je větší než 0 K, vyzařuje elektromagnetické vlnění, které je charakterizováno vlnovou délkou. Vlnová délka elektromagnetického záření vyzařená určitým tělesem závisí na teplotě tělesa. Teplejší těleso vyzařuje kratší vlnové délky a naopak chladnější těleso delší vlnové délky. Této závislosti využíváme pro bezdotykové měření teploty. [15] [17]

Přístroje pro bezdotykové měření teploty nazýváme pyrometry. Existuje několik druhů pyrometrů, jako jsou úhrnné pyrometry, které vyhodnocují teplotu tělesa na základě tepelného záření v celém rozsahu vlnových délek. Ve skutečnosti měření neprobíhá v celém rozsahu vlnových délek z důvodu technického omezení, jako je například nedokonalá propustnost čoček zařízení. Dalším druhem je monochromatický pyrometr, který měří jen na velmi úzkém vlnovém pásmu. Pásmový pyrometr měří záření na určitém úseku vlnových délek. Dále používanými pyrometry jsou poměrové, vícepásmové pyrometry nebo pyrometry s automatickou korekcí emisivity. [15]

Hlavním prvkem pyrometru je detektor, který reaguje na tepelné záření. Podle interakce fotonu s materiálem se detektory dělí na tepelné a kvantové. Kvantové detektory jsou tvořeny buď z vlastního nebo nevlastního polovodiče. Při interakci fotonu, s dostatečně velkou energií, s polovodičem dochází k uvolnění elektronu a vzniká tak pár elektron-díra. U kvantového detektoru tvořeného vlastním polovodičem se využívá závislosti vodivosti na fotonovém toku. Tyto detektory se provozují ve fotovodivostním režimu, je tedy nutné vytvoření vnějšího elektrického pole. Detektory tvořené nevlastním polovodičem využívají PN přechod a mohou být provozovány ve fotovodivostním nebo fotovoltaickém režimu. Ve fotovodivostním režimu se jedná o pasivní prvek, jehož vodivost s intenzitou ozáření stoupá. Detektor ve fotovoltaickém režimu lze simulovat jako zdroj proudu řízený intenzitou ozáření. [15] [17]

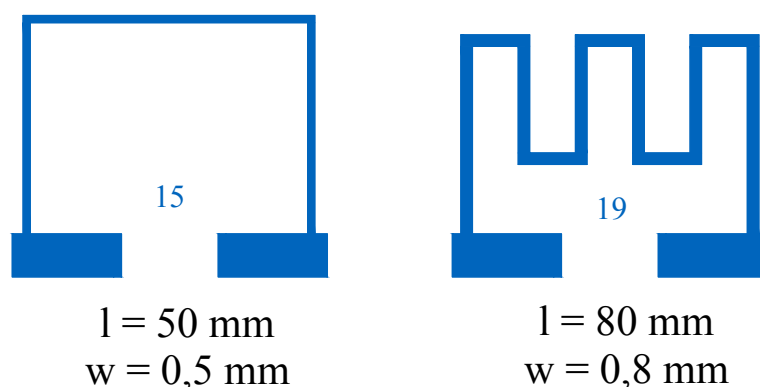
Tepelné detektory jsou založeny na absorpci tepelného záření, které vyzařuje měřené těleso. Absorbované tepelné záření snímacím prvkem způsobuje jeho ohřátí na určitou teplotu a tato teplota je snímacím prvkem převáděna na elektrický signál. Jako snímacího prvku, který je zahříván a vytváří elektrický signál úměrný jeho teplotě, může být použito několik do série zapojených termoelektrických článků. Další možností snímacího prvku je teplotně závislý odpor, který je při dopadu tepelného záření zahříván a mění tak svůj elektrický odpor. Používají se také pyroelektrické detektory, jedná se o detektory, které při změně teploty mění svoji polarizaci, tedy na jejich povrchu se objeví elektrický náboj. [15] [17]

K zaznamenání teplotního pole se používají termovizní kamery, které jsou složeny z optiky a detektorů tepelného záření. Může být použit jeden nebo řada detektorů, které musí být doplněny pohyblivými optickými částmi kamery, které postupně skenují jednotlivé body objektu. Používá se také pole detektorů, které nevyžaduje pohyblivé optické části ke skenování jednotlivých bodů objektu. [15] [17]

4 Příprava měření proudového zatěžování tlustých vrstev

4.1 Příprava tlustovrstvých struktur na různých typech podložek

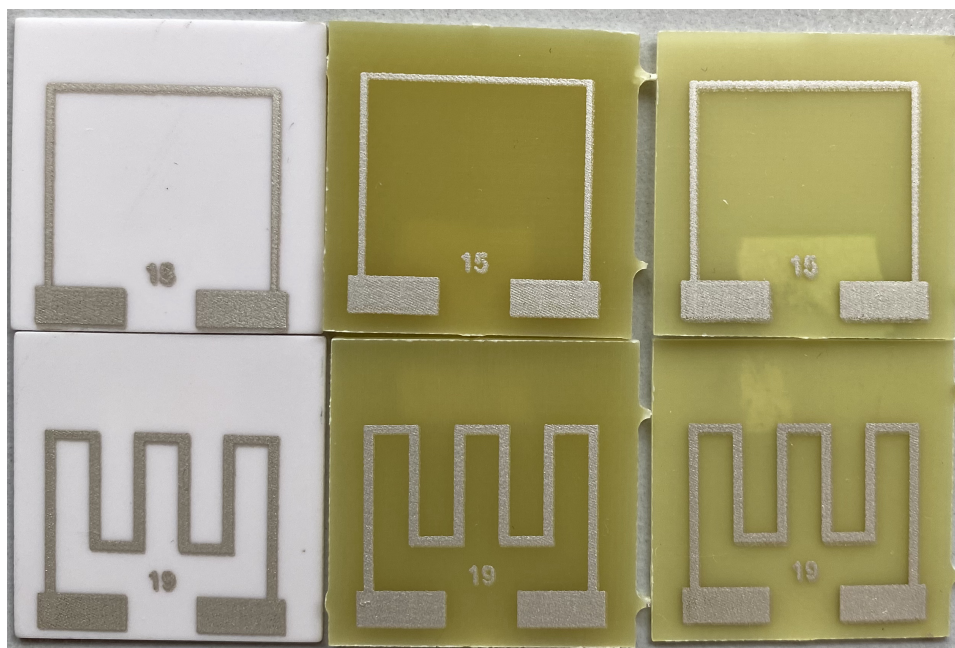
Pro měření proudového zatěžování tlustých vrstev byly zvoleny motivy s velkými kontaktními ploškami, které umožňovaly čtyřsvorkové měření odporu vrstvy. Z důvodu časové náročnosti byly zvoleny pouze dva motivy, označené na síťotiskové šabloně jako motiv číslo 15 a 19, jejich tvar a rozměry jsou znázorněny na obrázku 13. Při použití stejné pasty by měly mít tlusté vrstvy obou motivů stejný odpor. Motivы byly nanášeny na tři různé typy podložek o rozměrech 25x25 mm, jednalo se o podložku z korundové keramiky o tloušťce 0,6 mm a podložky z FR4 o tloušťce 1,5 mm a 0,5 mm.



Obrázek 13: Tvar použitých motivů spolu s rozměry vodivé dráhy, kde l je délka dráhy a w je šířka dráhy [5]

Samotný tisk probíhal na ručním síťotiskovém stroji Uniprint. Po uchycení šablony do síťotiskového stroje byl proveden kontrolní tisk na fólii. Tento tisk byl proveden z důvodu určení přesné pozice podložek na pracovní desce síťotiskového stroje. Pracovní deska s malými otvory umožňovala přisátí podložek pomocí vysavače, aby nedošlo k nežádoucímu posuvu podložek při tisku a byl zajištěn přesný přenos motivu na podložku. Stroj se skládal ze dvou pryžových stěrek, které byly ovládnuty přes táhlo. Při tisku bylo možné ovlivnit pouze rychlost pohybu stěrky, sklon a velikost přitlačné síly byly dány strojem.

Pro tisk vodivé vrstvy byla použita stříbrná polymerní pasta Paron 910. Vytvrzení nanesených vrstev probíhalo při teplotě 130 °C po dobu jedné hodiny. Bylo tak vytvořeno deset vzorků na korundové podložce pro každý motiv a pět vzorků na podložkách z FR4 pro každý motiv a každou tloušťku podložky. Ukázka nanesených a vytvrzených tlustých vrstev na různých podložkách je znázorněna na obrázku 14. Celkem bylo realizováno 40 vzorků.



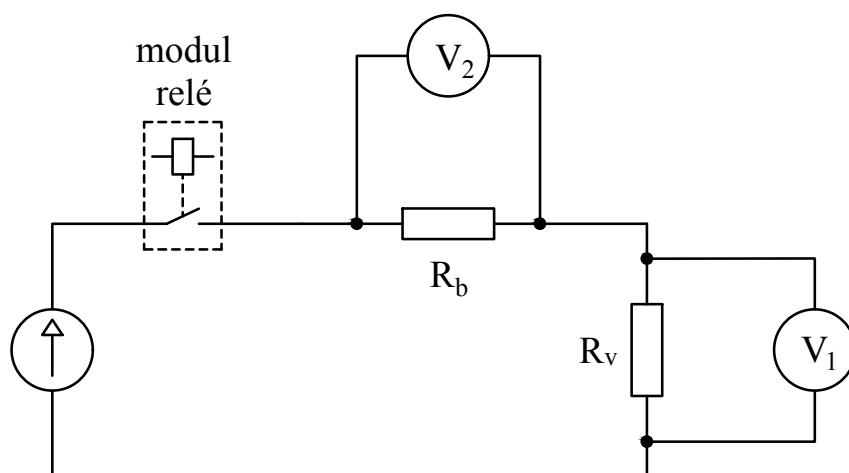
Obrázek 14: Ukázka vytvořených vzorků na různých typech podložek, vlevo podložka z korundové keramiky, uprostřed podložka z FR4 o tloušťce 1,5 mm, vpravo podložka z FR4 o tloušťce 0,5 mm

4.2 Způsob měření proudového zatěžování tlustých vrstev

U všech vytvořených vzorků bylo provedeno orientační měření jejich odporu. Na základě změřených hodnot byly vybrány takové čtyři vzorky pro každou podložku a každý motiv, jejichž hodnoty odporů se nacházely v co nejmenším intervalu. Hodnota odporů vybraných vzorků se pohybovala od $4,5 \Omega$ do $7,5 \Omega$. Tyto vybrané vzorky byly použity pro měření popsané v následujících kapitolách.

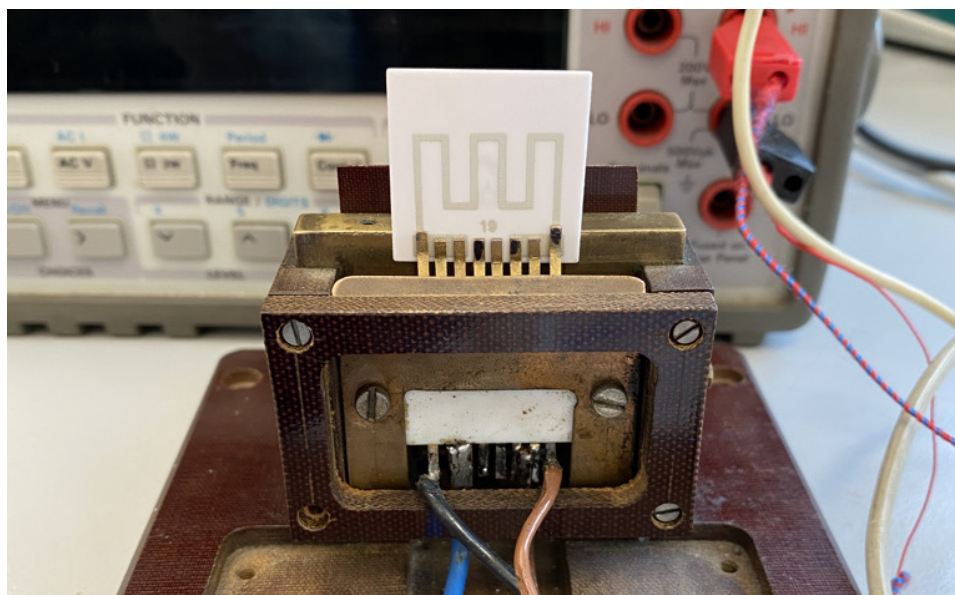
4.2.1 Schéma zapojení pro měření ohřevu tlustých vrstev

Obvod pro měření ohřevu tlustých vrstev byl tvořen zdrojem proudu, modulem relé, odporovým bočníkem, měřeným vzorkem, který je ve schématu znázorněn jako odpor R_v a dvěma multimetry v režimu měření stejnosměrného napětí. Pro měření teploty bylo použito odporové čidlo Pt100, jehož odpor byl měřen pomocí třetího multimetru v režimu dvou vodičového měření odporu.



Obrázek 15: Obvodové schéma měřícího obvodu, kde R_b je bočník pro měření proudu a R_v představuje odpor měřeného vzorku

Měřené vzorky byly vkládány do přípravku, který umožňoval jejich uchycení a byl tvořen osmi přítlačnými kontakty. Tento přípravek spolu s uchycenou korundovou podložkou a motivem č. 19 je znázorněn na obrázku 16. Celkem bylo využito šest kontaktů, z čehož středové dva kontakty nebyly použity, vnější kontakty slouží pro měření úbytku napětí na vrstvě a zbylé čtyři kontakty slouží pro přívod proudu.



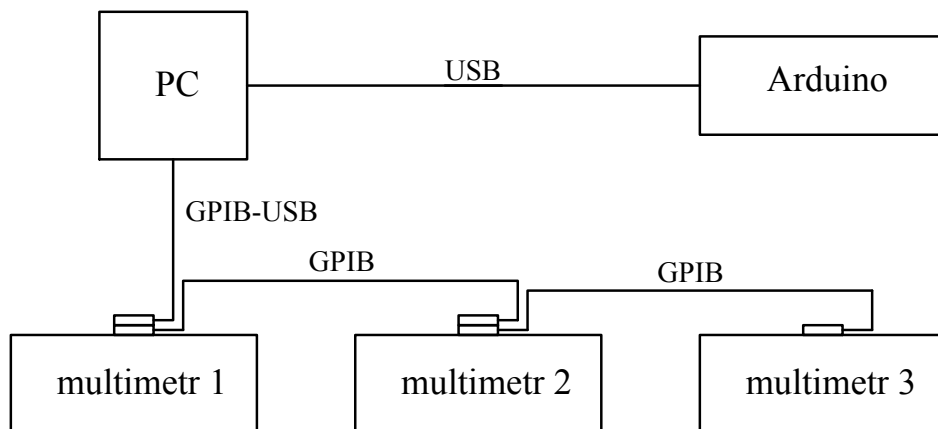
Obrázek 16: Přípravek pro uchycení měřených vzorků

Zdroj proudu byl použit zdroj Hameg HM7042-5. Zdroj umožňoval nastavení výstupního napětí od 0 V do 32 V spolu s proudovým omezením a maximálním výstupním proudem 2 A. Při měření, měřící obvod byl sepnut, bylo na zdroji nastaveno proudové omezení na požadovanou hodnotu proudu, kterou měl být měřený vzorek zatěžován. V okamžiku rozeznutí obvodu klesl proud zdroje na nulu a výstupní napětí vzrostlo na nastavenou hodnotu. Tím byla zajištěna konstantní hodnota proudu měřícím obvodem při měření.

Spínání a rozeznutí obvodu bylo zajištěno modulem relé, který bylo možné přímo řídit pomocí Arduino. Modul relé zajišťoval galvanické oddělení pomocí optočlenu, řídicího pinu od spínacího tranzistoru, který spínal cívku relé. Součástí modulu byla také signalizační dioda, která informovala o sepnutí relé.

Elektrický proud obvodem byl měřen pomocí úbytku napětí na bočníku Agilent 34330A o hodnotě odporu 1 m Ω . Ze známé hodnoty odporu bočníku a změřeného úbytku napětí bylo poté možné vypočítat pomocí Ohmova zákona proud procházející obvodem.

Pro měření stejnosměrného napětí a odporu teplotního čidla byly použity multimetry HP 34401A. Tyto multimetry byly z důvodu komunikace vzájemně propojeny pomocí GPIB kabelu a připojeny k počítači pomocí převodníku National Instrument GPIB-USB-HS. Dále bylo k počítači připojeno Arduino UNO, které sloužilo pro řízení modulu relé. Blokové schéma propojení měřících přístrojů je znázorněno na obrázku 17.



Obrázek 17: Blokové schéma propojení PC s měřícími přístroji a Arduinem, multimetr 1 a 2 byly provozovány v režimu měření stejnosměrného napětí a multimetr 3 v režimu dvouvodičového měření odporu

Veškeré měření bylo řízeno z počítače pomocí programu LabVIEW. Pro možnost ovládání Arduina pomocí Labview byl použit modul LINX. Stručný popis jednotlivých měření s využitím LabVIEW bude popsáno v následujících kapitolách.

4.2.2 Měření teploty tlustých vrstev

Pro měření teploty bylo použito odporové čidlo teploty Pt100, které umožňovalo dvou vodičové měření teploty. Jednalo se o čidlo zhotovené tenkovrstvou technologií. Teplotní čidlo bylo umístěno na podložku vždy co nejbližší vodivé dráhy a pro daný motiv bylo vždy umístěno přibližně na stejném místě. Z tohoto důvodu bylo zavedeno takové zjednodušení, že změřená teplota téměř odpovídala teplotě nanesené tlusté vrstvy.

Závislost odporu platinového čidla na teplotě, pro kladný rozsah teplot, je popsána rovnicí (22). Upravením této rovnice lze získat následující vztah pro výpočet teploty ϑ ($^{\circ}\text{C}$) ze změřené hodnoty odporu čidla R_{ϑ} (Ω) pro kladný rozsah teplot.

$$\vartheta = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4 B \left(1 - \frac{R_{\vartheta}}{R_0}\right)}}{2 B} \quad (26)$$

Koeficienty v rovnici pro Pt100 jsou $A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ a koeficient $B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$.

4.2.3 Měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev

Pro měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev bylo nutné, od okamžiku sepnutí obvodu, po přibližně stejných časových intervalech měřit hodnotu odporu teplotního čidla, proud obvodem, úbytek napětí na vrstvě a zaznamenávat čas jednotlivých měření. Toto měření spolu se spínáním obvodu bylo řízeno pomocí LabVIEW.

Při spuštění programu byla nutná inicializace multimetrů, každý multimetr měl svoji adresu, pomocí které bylo možné s přístroji na GPIB sběrnici komunikovat. Po inicializaci došlo k nastavení multimetrů, zejména k nastavení režimu měření, jako je měření stejnosměrného napětí nebo dvou vodičové měření odporu. Bylo také nutné navázat komunikaci s Arduinem, do kterého byl na začátku měření zaslán příkaz, aby došlo k sepnutí modulu relé. Poté následovala smyčka, ve které probíhalo samotné měření.

Základem programu byla smyčka while, kterou bylo možné ručně přerušit pomocí virtuálního stop tlačítka. Po zmáčknutí tlačítka došlo k přerušení smyčky a ukončení programu. V této smyčce se prováděla sekvence několika kroků. Prvním krokem bylo přečtení hodnot z multimetrů a odečtení času měření, dalším krokem byl

zápis dat do souboru a poté proběhlo čekání podle předem nastavené doby. Tento sled událostí se neustále ve smyčce opakoval, dokud nedošlo k jejímu přerušení.

Po ukončení smyčky měření byl zaslán do Arduina příkaz na rozepnutí modulu relé. Poté následovalo ukončení komunikace s měřicími přístroji a Arduinem. Po výměně měřeného vzorku v přípravku a spuštění programu došlo k automatickému vygenerování nového souboru, kam byla data ukládána. Adresa aktuálního souboru, kam byla data ukládána, byla vždy zobrazována na čelním panelu, odkud také bylo možné ovládat stop tlačítko a sledovat měřené hodnoty.

Ze změřené časové závislosti ohřevu tlustých vrstev bylo možné určit parametry náhradního tepelného obvodu pro dané uspořádání pomocí rovnice (18). Jelikož po celou dobu měření nebyl ztrátový výkon konstantní, ale mírně se měnil z důvodu teplotní závislosti odporu vrstvy, bylo nutné vypočítat střední hodnotu výkonu. Střední hodnota výkonu byla vypočítána jako podíl dodané energie během měření a dobou měření. Pro výpočet celkové dodané energie byla použita lichoběžníková metoda numerické integrace. Střední hodnotu výkonu lze poté vypočítat podle následujícího vzorce.

$$P_{stř} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(P_{i+1} + P_i)(t_{i+1} - t_i)}{2}}{t_{konec} - t_{začátek}} \quad (27)$$

Člen P_i představuje hodnotu výkonu v čase t_i , $t_{začátek}$ a t_{konec} je čas počátku a konce měření, počet měření je n .

Parametry náhradního tepelného obvodu lze po výpočtu střední hodnoty výkonu určit z následujícího vztahu.

$$T_v(t) = T_a + P_{stř} R_{th} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th} C_{th}}}\right) \quad (28)$$

Teplota vrstvy je reprezentována členem T_v a teplota okolí T_a . Tepelný odpor lze snadno určit například z ustáleného stavu jako podíl rozdílu teplot a střední hodnoty výkonu.

4.2.4 Měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování

Pro měření statické charakteristiky bylo opět využito LabVIEW. Na začátku měření bylo nutné navázat komunikaci s měřicími přístroji a provést jejich nastavení. Dále pomocí Arduina došlo k sepnutí měřícího obvodu. Hodnotu proudu, který bude protékat obvodem bylo nutné nastavovat ručně, na začátku měření byla hodnota proudu nastavena na nulu.

Základem programu opět byla smyčka while, kterou bylo možné ručně přerušit pomocí virtuálního stop tlačítka. Ve smyčce bylo prováděno několik po sobě následujících kroků. Prvním krokem byl odečet hodnot z měřících přístrojů, následoval zápis změřených hodnot do souboru, poté bylo nutné ručně změnit hodnotu proudu, mezi tím program čekal na potvrzení změny proudu pomocí virtuálního tlačítka na čelním panelu. Po zmáčknutí tohoto tlačítka začal odpočet doby čekání. Po uplynutí této doby se program vrátil ke kroku číslo jedna.

Doba čekání byla vždy zadána před začátkem měření a odpovídala trojnásobku časové konstanty, po uplynutí této doby je dosaženo přibližně 95 % ustáleného stavu. Časovou konstantu pro dané uspořádání motivu a podložky bylo možné určit na základě vypočteného tepelného odporu R_{th} a tepelné kapacity C_{th} z předchozího měření. Časovou konstantu τ (s) lze vypočítat podle následujícího vztahu.

$$\tau = R_{th} C_{th} \quad (29)$$

Po zmáčknutí stop tlačítka na čelním panelu došlo k přerušení smyčky, rozpojení obvodu pomocí relé a ukončení komunikace s měřícími přístroji. Po výměně vzorku a spuštění programu došlo k automatickému vytvoření nového souboru pro zápis dat. Adresa souboru do kterého byly zapisovány změřené hodnoty byla zobrazena na čelním panelu spolu s aktuálně změřenými hodnotami a kontrolkami signalizující stav programu.

4.3 Zaznamenání teplotního pole tlustých vrstev na různých typech podložek

K zaznamenání teplotního pole tlustých vrstev na různých typech podložek při proudovém zatěžování byla použita termovizní kamera Flir i7. Tato termovizní kamera využívala jako detektor tepelného záření mikrobolometrický detektor, jedná se o detektor využívající teplotní závislost odporu. Tyto detektory jsou uspořádány do matice.

Pro zaznamenání teplotního pole tlustých vrstev na podložce z korundové keramiky byla emisivita podle tabulek nastavena na hodnotu 0,9. Jelikož se nejednalo o přesné měření teploty pomocí termovizní kamery, ale pouze o zaznamenání teplotního pole, byla pro měření podložek z FR4 emisivita zachována jako při měření podložek z korundové keramiky. V případě, že by bylo žádoucí měřit teplotu pomocí termovizní kamery, bylo by nutné vyhledat emisivitu v tabulkách pro FR4 nebo změřit teplotu pomocí dotykového čidla teploty. Poté by se emisivita nastavila na takovou hodnotu, aby termovizní kamera zobrazovala stejnou hodnotu teploty, jaká byla změřena pomocí dotykového čidla.

5 Vyhodnocení měření proudového zatěžování tlustých vrstev

Vyhodnocení naměřených hodnot je provedeno na základě měření popsané v kapitole 4. Z naměřených hodnot bylo také možné určit, kromě parametrů náhradního tepelného obvodu a statické charakteristiky ohřevu vrstev, teplotní závislost odporu nanesené vrstvy.

5.1 Časová závislost ohřevu tlustých vrstev a parametry náhradního tepelného obvodu

Pro měření byly použity čtyři vzorky pro každý motiv a každou podložku. Časová závislost ohřevu vrstev byla měřena pro dvě hodnoty proudu. U podložky z korundové keramiky se jednalo o hodnoty proudu 0,3 A a 0,4 A. Poté následovalo měření ohřevu vrstev nanesené na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm, která měla být zatěžována stejným proudem jako vrstvy nanesené na podložce z korundové keramiky. Při zatěžování proudem 0,3 A došlo k nepatrnému přepálení vrstvy motivu 15 na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm, proto byla hodnota proudu pro následující měření snížena na 0,1 A a 0,2 A pro vrstvy nanesené na podložkách z FR4.

Ze změřené časové závislosti ohřevu tlustých vrstev bylo možné určit parametry náhradního tepelného obvodu, jak je uvedeno v kapitole 4.2.3. V tabulce 3 jsou uvedeny průměrné hodnoty parametrů náhradního tepelného obvodu pro každý motiv a každou podložku.

Tabulka 3: Průměrné hodnoty parametrů náhradního tepelného obvodu pro každý motiv a každou podložku

podložka	motiv	R_{th} ($K \cdot W^{-1}$)	C_{th} ($J \cdot K^{-1}$)	τ (s)	3τ (s)
Korund	15	25,16	1,35	33,77	101,30
	19	19,04	1,63	30,89	92,67
FR4 0,5 mm	15	53,49	0,81	43,07	129,21
	19	65,29	0,61	39,77	119,31
FR4 1,5 mm	15	48,43	1,93	91,12	273,35
	19	52,09	1,43	73,85	221,54

Při porovnání tepelné kapacity uspořádání, které je tvořeno podložkami z FR4 o tloušťce 0,5 mm a 1,5 mm je patrné, že tenčí podložka má menší tepelnou kapacitu než tlustší. Tato skutečnost vyplývá i ze vztahu 17, kdy tepelná kapacita je přímo úměrná objemu materiálu a měrná tepelná kapacita a hustota materiálu jsou pro obě podložky stejné.

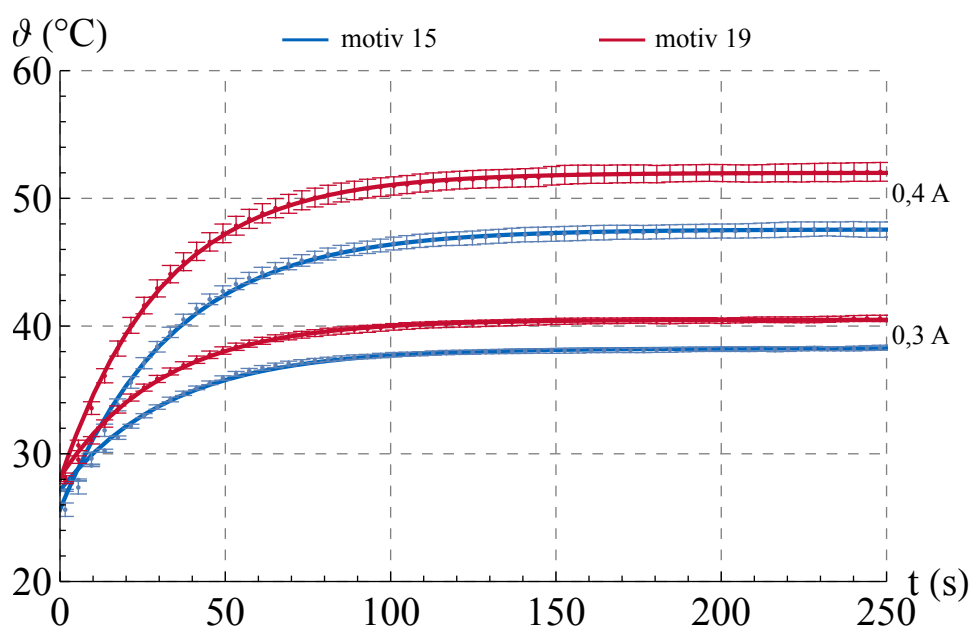
Při porovnání tepelných odporů uspořádání tvořené podložkami z korundové keramiky a FR4 vyplývá, že podložka z korundové keramiky umožňuje lepší odvod tepla než podložka z FR4, a to více jak dvojnásobně. Je to dáno tím, že korundová keramika má větší tepelnou vodivost než materiál FR4.

Uspořádání s podložkou z korundové keramiky má nejmenší časovou konstantu, která nám charakterizuje dobu, za kterou by bylo dosaženo ustáleného stavu, pokud by přechodný děj probíhal stále stejnou rychlostí jako ve svém počátku. Naopak nejdelší časovou konstantu má uspořádání s podložkou z FR4 o tloušťce 1,5 mm, u kterého je dosaženo ustáleného stavu za nejdelší dobu.

Výsledné časové závislosti ohřevu tlustých vrstev jsou vyneseny v následujících grafech na základě průměrných hodnot získaných měření na čtyřech podobných vzorcích. Z důvodu přehlednosti nejsou v grafech vyneseny jednotlivé naměřené hodnoty, ale pouze jejich průměrné hodnoty spolu s jejich nejistotami.

5.1.1 Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z korundové keramiky

Při zatěžování motivu 15 proudem 0,3 A došlo k ohřevu vrstvy přibližně o 11 °C a při proudu 0,4 A došlo k ohřevu vrstvy přibližně o 22 °C. V případě motivu 19 se vrstva ohřála při zatěžování proudem 0,3 A přibližně o 12 °C a při proudu 0,4 A přibližně o 24 °C. Motiv 19 při stejné hodnotě proudu se vždy ohřál více než motiv 15, může to být dáno tvarem motivu, který neumožňuje tak dobrý odvod tepla jako motiv 15 nebo také větší hodnotou odporu vrstvy motivu 19.

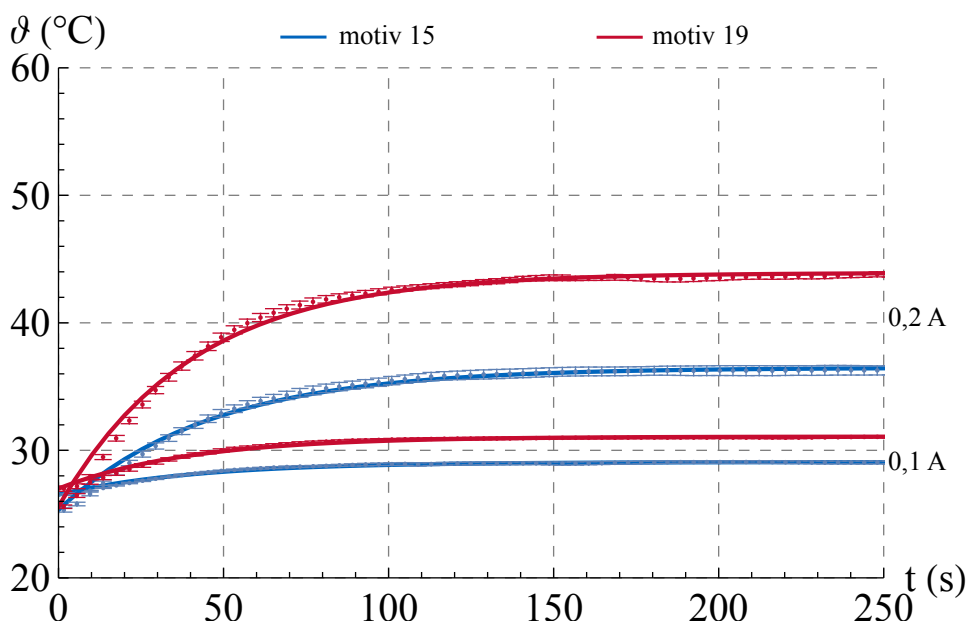


Obrázek 18: Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z korundové keramiky

Poměrně vysoká počáteční teplota může být způsobena tím, že mezi výměnami vzorků nebyla provedena dostatečně velká přestávka na to, aby došlo k vychladnutí teplotního čidla a přípravku na teplotu okolí. Teplota okolí se pohybovala okolo 25 °C.

5.1.2 Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm

V případě podložky z FR4 o tloušťce 0,5 mm při zatěžování proudem 0,1 A došlo k minimálnímu ohřevu vrstev, pro motiv 15 se jednalo o 2,5 °C a pro motiv 19 se jednalo o 4 °C. Při zatěžování tlustých vrstev proudem 0,2 A došlo k značně rozdílnému ohřevu motivu 15 a 19, v případě motivu 15 se jednalo o 11 °C a v případě motivu 19 se jednalo o 18 °C.



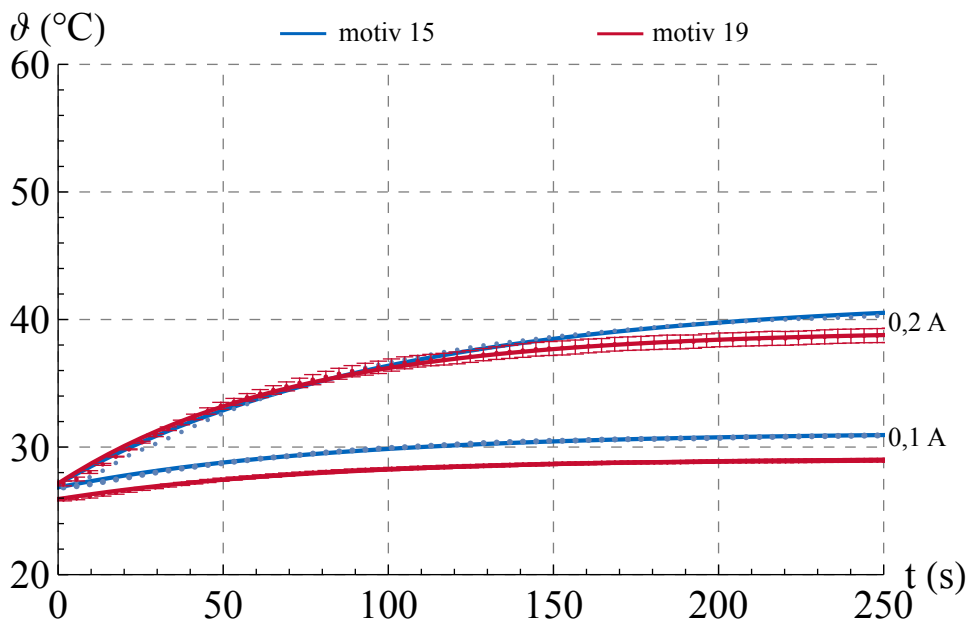
Obrázek 19: Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm

Jak už bylo poznamenáno, může to být způsobeno rozdílným tvarem motivů. V případě motivu 19 jsou vodivé dráhy, ve kterých vzniká teplo, blízko u sebe oproti motivu 15. Další možnou příčinou je také menší tepelná vodivost materiálu FR4, která omezuje šíření tepla z místa meandrů motivu 19 do celé podložky a následnému přestupu tepla z podložky do okolí.

Další možnou příčinou tak rozdílného ohřevu tlustých vrstev motivu 15 a 19 při zatěžování proudem 0,2 A může být rozdílná hodnota odporu vrstev, která by měla být při použití stejné pasty stejná. V případě rozdílné hodnoty odporu vrstev by měl mít motiv 19 větší hodnotu odporu než motiv 15, protože ohřev vrstev závisí na ztrátovém výkonu, který je dán součinem první mocniny odporu vrstev a druhé mocniny procházejícího proudu.

5.1.3 Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm

V případě podložky z FR4 o tloušťce 1,5 mm u obou motivů při stejné hodnotě proudu došlo k podobnému ohřevu. U motivu 19 při proudovém zatížení 0,1 A došlo k ohřevu o 3 °C a při zatížení 0,2 A k ohřevu o necelých 12 °C.



Obrázek 20: Časová závislost ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm

Při tisku vzorků motivu 15 se nepodařilo všechny vzorky správně vytisknout a při měření ohřevu došlo k nepatrnému přepálení dvou vzorků z důvodu příliš vysokého proudu. Tím pádem zbyl pouze jeden měřitelný vzorek.

Při porovnání průběhů časové závislosti ohřevu tlustých vrstev nanesených na podložkách z FR4 je patrná poměrně rozdílná časová konstanta. V případě podložky z FR4 o tloušťce 1,5 mm trvá poměrně dlouho, než je dosaženo ustáleného stavu oproti podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm. V případě podložky tloušťky 0,5 mm dochází poměrně k rychlému nárůstu teploty oproti podložce tloušťky 1,5 mm. Tato skutečnost je dána zejména rozdílnou tepelnou kapacitou daného uspořádání. U podložky tloušťky 1,5 mm, která má velkou tepelnou kapacitu, trvá delší dobu, než dojde k nabití této větší tepelné kapacity.

5.2 Statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování

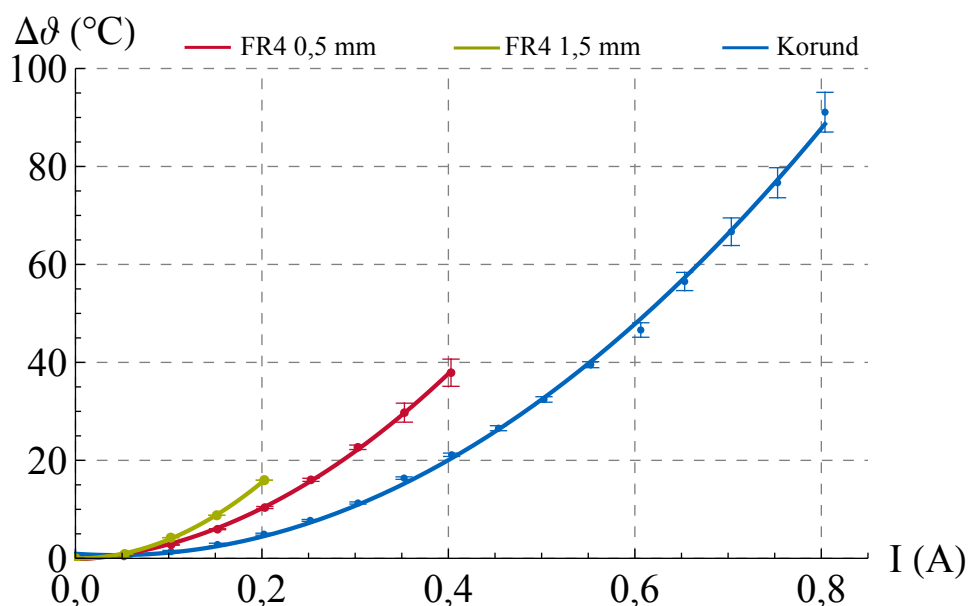
Při měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev byla hodnota proudu ručně zvyšována po 0,05 A. Největší hodnota proudu, do které bylo měření realizováno byla určena na základě nejvyšší hodnoty proudu, při které ještě nedošlo k přepálení vodivé dráhy prvního měřeného vzorku daného uspořádání. V případě tlustých vrstev nanesených na podložkách z FR4 nebyla v některých případech nejvyšší hodnota proudu zvýšena o 0,05 A, ale pouze o 0,02 A, aby bylo získáno dostatečné množství dat.

Teplota okolí, při kterém probíhalo měření, se pohybovala okolo 25 °C. Statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev jsou proto vynášeny jako závislost oteplení vrstvy, tedy rozdílu změřené teploty vrstvy a teploty okolí, na velikosti proudu, kterým je tlustá vrstva zatěžována.

Výsledné statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev jsou vyneseny v následujících grafech na základě průměrných hodnot získaných měřeními na čtyřech podobných vzorcích, kromě případu tlusté vrstvy motivu 15 nanesené na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm, u které byl k dispozici pouze jeden vzorek. Z důvodu přehlednosti nejsou v grafu vyneseny jednotlivé naměřené hodnoty každého vzorku, ale pouze jejich průměrné hodnoty spolu s jejich nejistotami.

5.2.1 Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 15 v závislosti na proudovém zatěžování

Největší proudové zatížení tlustých vrstev umožňovala podložka z korundové keramiky, která dosáhla oteplení o 90 °C při proudovém zatížení 0,8 A. Například při porovnání podložky z korundové keramiky a FR4 o tloušťce 0,5 mm je rozdíl oteplení tlusté vrstvy při proudovém zatížení 0,4 A přibližně 20 °C, jak je patrné z obrázku 21.



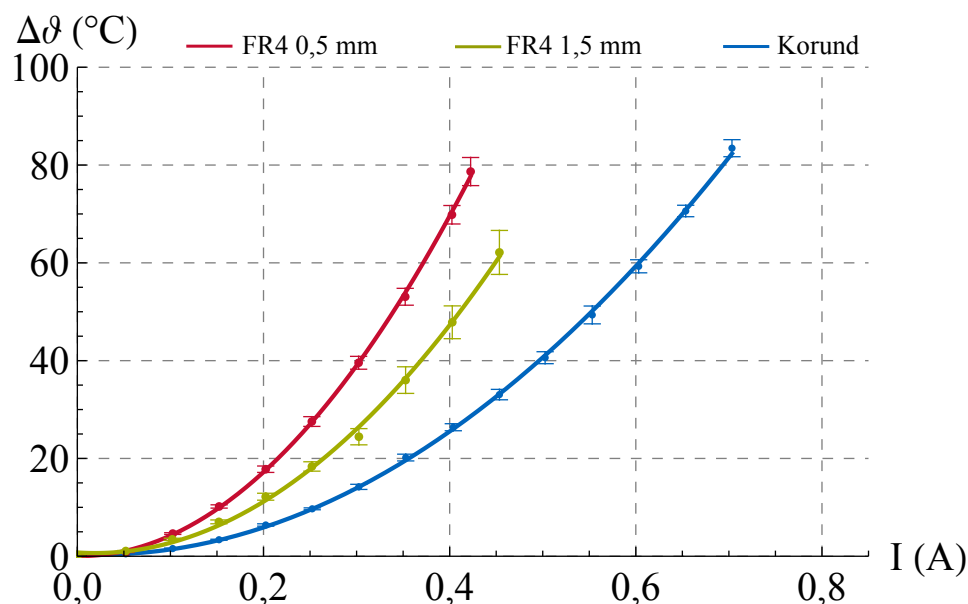
Obrázek 21: Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 15 v závislosti na proudovém zatěžování

K přepálení tlusté vrstvy nanesené na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm došlo při poměrně nízké hodnotě oteplení v porovnání vrstvy nanesené na podložce z korundové keramiky. K přepálení vrstvy došlo při oteplení nad 40 °C.

Měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev motivu 15 nanesených na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm bylo provedeno pouze na jednom vzorku. K přepálení tohoto vzorku došlo při poměrně nízké hodnotě oteplení. Jak už bylo uvedeno, může to být způsobeno špatnou kvalitou tisku série těchto motivů.

5.2.2 Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 19 v závislosti na proudovém zatěžování

V případě motivu 19 umožňovala největší proudové zatěžování tlustých vrstev podložka z korundové keramiky, poté následovala podložka z FR4 o tloušťce 1,5 mm a nejmenší proudové zatěžování umožňovala podložka z FR4 o tloušťce 0,5 mm. Při porovnání podložek z FR4 a vypočtených tepelných odporů pro dané uspořádání v tabulce 3, kde uspořádání s podložkou o tloušťce 1,5 mm má menší tepelný odpor než uspořádání s podložkou o tloušťce 0,5 mm, vyplývá, že pro stejnou hodnotu proudu dojde k většímu oteplení tlusté vrstvy na podložce o tloušťce 0,5 mm než na podložce o tloušťce 1,5 mm. Toto tvrzení vyplývá i z obrázku 22.



Obrázek 22: Statická charakteristika ohřevu tlustých vrstev motivu 19 v závislosti na proudovém zatěžování

Při porovnání motivu 15 a 19 v případě podložky z korundové keramiky umožňoval motiv 15 větší proudové zatížení než motiv 19. Podobně je tomu tak i v případě podložky z FR4 o tloušťce 0,5 mm. Přepálením motivu 15 na podložce z FR4 při tak nízké teplotě může být také zapříčiněno šířkou vodivé dráhy, která nemusí být po celé délce konstantní. Jedná se o kvalitu ostroty obrazce, kdy zejména při tisku motivu, který je tvořen úzkými drahami, není přenesen motiv v celé své šířce na podložku z důvodu většího průměru vláken a úhlu směru vláken síta a tištěného obrazce. Tato skutečnost je naznačena na obrázku 3. Tím pádem mohlo dojít v místě možného zúžení vodivé dráhy k lokálnímu ohřevu vrstvy z důvodu větší proudové hustoty. Došlo tak ke zvýšení teploty v místě, kde nebylo umístěno teplotní čidlo na vysokou teplotu a mohlo dojít k přepálení vodivé dráhy.

5.3 Teplotní závislost odporu nanesených vrstev

Teplotní závislost odporu bylo možné získat z měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na proudovém zatěžování, protože kromě proudu obvodem a teplotou vzorku byl ještě zaznamenáván úbytek napětí na měřeném vzorku. Poté bylo možné pomocí Ohmova zákona vypočítat odpor vrstvy při změřené teplotě.

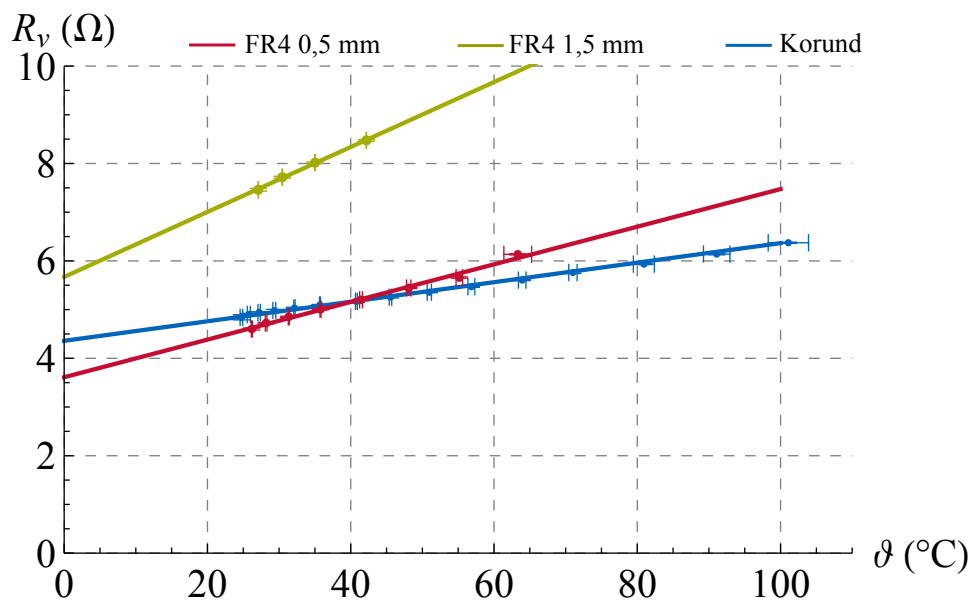
Teplotní závislost odporu nanesených vrstev pro každý motiv je zobrazena na obrázku 23 a 24. Z teplotní závislosti odporu bylo možné určit teplotní součinitel odporu TKR a odpor R_0 při 0 °C pro každý motiv a každou podložku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4, spolu s odporem vrstvy R_{25} při pokojové teplotě, tedy 25 °C.

Tabulka 4: Tabulka teplotního součinitele odporu a teoretický odpor při 0 °C a při 25 °C pro nanesené tlusté vrstvy

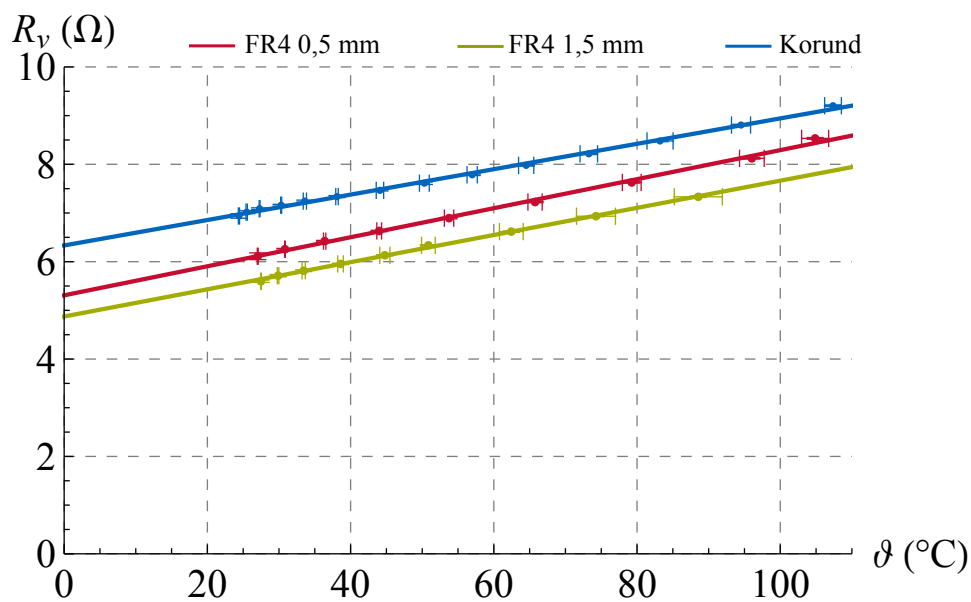
	Motiv 15			Motiv 19		
	R_0 (Ω)	R_{25} (Ω)	TKR ($^{\circ}\text{C}$)	R_0 (Ω)	R_{25} (Ω)	TKR ($^{\circ}\text{C}$)
Korund	4,36	4,86	0,0046	6,33	6,99	0,0041
FR4 0,5 mm	3,61	4,58	0,0107	5,31	6,05	0,0056
FR4 1,5 mm	5,67	7,34	0,0118	4,87	5,57	0,0057

Teplotní závislost odporu nanesených vrstev na podložce z korundové keramiky byla podobná, výrazně se lišila teplotní závislost odporu vrstev nanesených na podložkách z FR4. TKR vrstev motivu 15 na podložkách z FR4 byla přibližně dvakrát větší než vrstev motivu 19. Data pro určení teplotní závislosti odporu vrstev motivu 15 na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm byla získána pouze z měření jednoho vzorku, protože více vzorků nebylo k dispozici.

Z provedených měření tlustých vrstev motivu 15 na podložkách z FR4 vyplývá, že se může jednat o nepovedené vzorky, protože v případě měření statické charakteristiky ohřevu vrstev došlo k jejich degradaci a následnému přepálení při poměrně malém oteplení v porovnání s ostatními vzorky. Podobně tomu je i v případě zjištěné teplotní závislosti odporu, která se značně liší od ostatních vzorků.



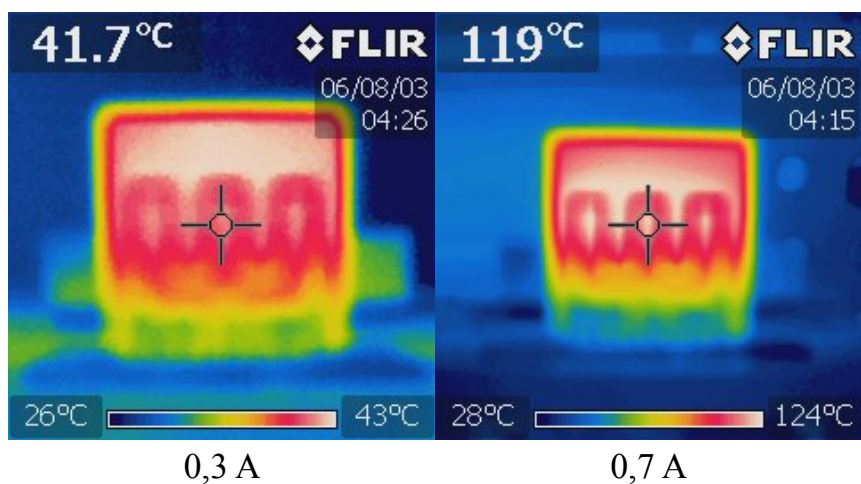
Obrázek 23: Teplotní závislost odporu nanesených vrstev motivu 15 na různých typech podložek



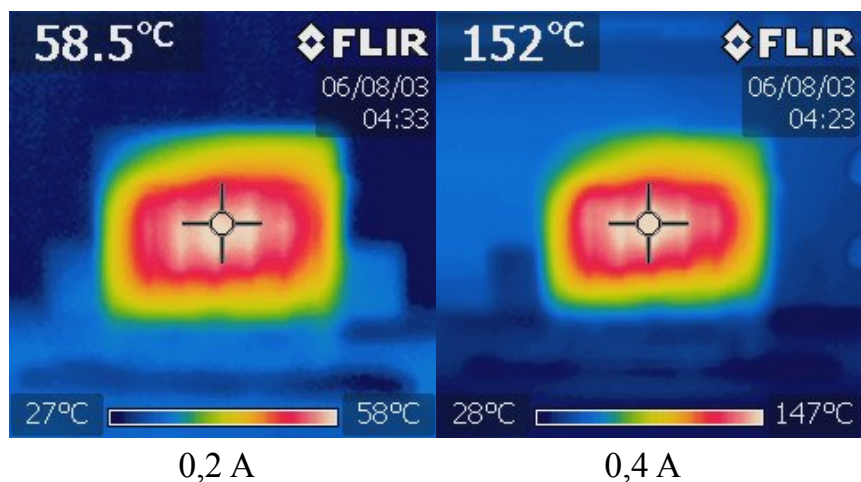
Obrázek 24: Teplotní závislost odporu nanesených vrstev motivu 19 na různých typech podložek

5.4 Zaznamenané teplotní pole tlustých vrstev nanesených na různých typech podložek při proudovém zatěžování

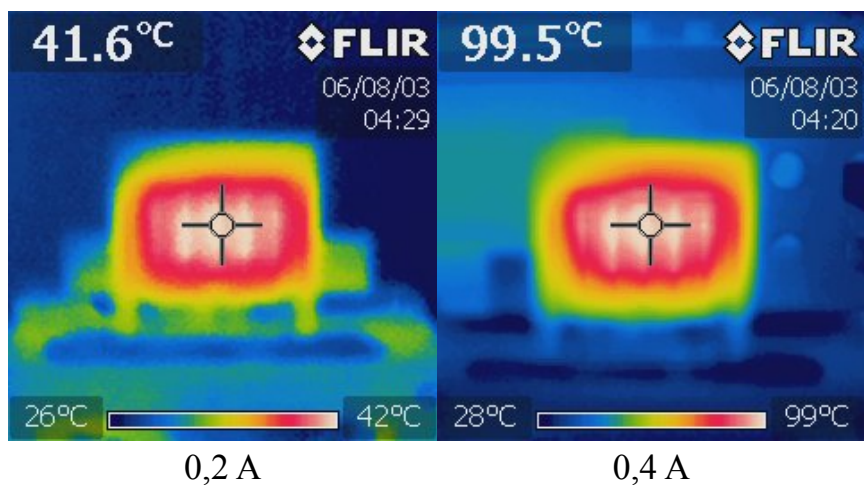
Teplotní pole bylo zaznamenáno pouze pro motiv 19 na všech typech podložek, a to vždy pro dvě hodnoty proudu. V případě korundové keramiky se jednalo o hodnotu proudu 0,3 A a 0,7 A, v případě podložek z FR4 se jednalo o hodnotu proudu 0,2 A a 0,4 A.



Obrázek 25: Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z korundové keramiky pro dvě různá proudová zatížení



Obrázek 26: Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm pro dvě různá proudová zatížení



Obrázek 27: Teplotní pole tlustých vrstev na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm pro dvě různá proudová zatížení

Při porovnání podložek z korundové keramiky a z FR4 je patrné, že podložka z korundové keramiky umožňuje lepší odvod tepla, protože teplota téměř celého jejího povrchu je srovnatelná s teplotou tlustých vrstev. Teplo, které vznikne ve vodivé vrstvě prostupuje do celé podložky a následně přes celou plochu podložky prostupuje do okolí. V případě podložek z FR4 došlo k ohřátí podložek pouze v místě nanesených tlustých vrstev a teplota směrem od nanesených tlustých vrstev k okraji podložky značně klesá. Tím pádem nedochází k tak dobrému odvodu tepla jako v případě podložky z korundové keramiky.

6 Závěr

V první části této bakalářské práci jsou stručně popsány podložky a pasty, které se používají pro realizaci tlustých vrstev a jsou zde uvedeny základní technologie, které se používají.

V druhé části práce jsou uvedeny základní způsoby šíření tepla a náhradní tepelný obvod, ze kterého se poté vychází při porovnání vytvořených tlustých vrstev na různých typech podložek. Dále jsou v této části uvedeny základní senzory pro měření teploty, které jsou poté použity pro měření ohřevu tlustých vrstev.

Obsahem třetí části práce je popis realizace vodivých tlustých vrstev na třech různých typech podložek pomocí ruční sítotiskové technologie. Dále je zde uveden použitý měřicí obvod, u kterého jsou rozebrány funkce jeho jednotlivých částí a propojení počítače s měřicími přístroji. Veškeré měření, kromě regulace proudového zdroje, bylo řízeno pomocí software LabVIEW, který byl využit pro měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev a pro měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev v závislosti na jejich proudovém zatěžování.

Ve čtvrté části práce jsou zhodnoceny naměřené hodnoty, které byly získány podle předem popsaného měření. Z měření časové závislosti ohřevu tlustých vrstev byly určeny parametry náhradního tepelného obvodu pro dané uspořádání. Z vypočtených parametrů náhradního tepelného obvodu bylo možné určit časovou konstantu, která byla využita při měření statické charakteristiky ohřevu tlustých vrstev. Z měření statické charakteristiky bylo také možné určit teplotní závislost odporu.

Největší proudové zatěžování umožňovaly tlusté vrstvy nanesené na podložce z korundové keramiky. Tato podložka umožňovala nejlepší odvod tepla oproti podložkám z FR4. Schopnost podložky z korundové keramiky odvádět teplo oproti podložkám z FR4 bylo demonstrováno pomocí termovizní kamery na motivech 19.

Měření vždy probíhalo na čtyřech vzorcích pro každý motiv a každou podložku kromě motivu 15 na podložce z FR4 o tloušťce 1,5 mm. Pro toto uspořádání byl k dispozici pouze jeden vzorek z důvodu špatného tisku a také přepálení dvou vzorků. Následným vyhodnocením se ukázalo, že mohlo dojít k nekvalitnímu tisku i v případě motivu 15 na podložce z FR4 o tloušťce 0,5 mm, protože k přepálení vodivé vrstvy došlo při poměrně nízké hodnotě oteplení oproti ostatním uspořádáním. Zároveň se teplotní závislost odporu motivů 15 na podložkách z FR4 výrazně lišila oproti ostatním uspořádáním.

Použitá literatura

- [1] MACH, Pavel; URBÁNEK, Jan; SKOČIL, Vlastimil. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3229-6.
- [3] WHITE, Neil. Thick Films. In: *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Ed. by KASAP, Safa; CAPPER, Peter. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 1–1. ISBN 978-3-319-48933-9. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-48933-9_29.
- [4] HROMADKA, Karel. *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/23041>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] KALTMAYER, Jan. *Proudové zatížení polymerních tlustých vrstev* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/89848>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] PRUDENZIATI, Maria; HORMADALY, Jacob. *Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics* [online]. Cambridge: Elsevier Science & Technology, 2012 [cit. 2021-02-21]. ISBN 9780857096210. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1584610>.
- [7] *IPC 2221A: Generic Standard on Printed Board Design* [online]. 2013 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf).
- [8] HRADÍLEK, Zdeněk; LÁZNIČKOVÁ, Ilona; KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [9] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952.
- [10] MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; KUCHARSKI, J.; MCGHEE, J. *Temperature Measurement*. Second Edition. New York: Wiley, 2001. ISBN 9780470846131. Dostupné z DOI: 10.1002/0470846135.
- [11] *Emisivita* [online] [cit. 2021-05-05]. <https://tpt.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti/emisivita>.

- [12] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1). *Automa* [online]. 2014, roč. 20, č. 2 [cit. 2021-05-05]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf.
- [13] *Thermal Resistance Theory and Practice* [online]. Infineon Technologies AG, 2000 [cit. 2021-03-05]. <https://www.infineon.com/dgdl/smdpack.pdf?fileId=db3a304330f6860601311905ea1d4599>.
- [14] LETTL, Jiří; PAVELKA, Jiří; BAUER, Jan. *Výkonová elektronika*. 4. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06514-3.
- [15] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [16] *Státní etalon teploty pro kontaktní měření* [online] [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/412>.
- [17] WEBSTER, John G.; EREN, Halit. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*. 2nd ed. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4889-0. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1201/b15474>.
- [18] *Konstrukční příručka* [online]. Sensit, 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.sensit.cz/cz/prirucka-sensit-5849>.

Příloha A Použité měřicí přístroje a komponenty

Multimetr HP 34401A měřící úbytek napětí na tlusté vrstvě:

měřicí rozsah: 1 V

přesnost: $\pm (0,0020 \% \text{ ze čtení} + 0,0006 \% \text{ z rozsahu})$

Multimetr HP 34401A měřící úbytek napětí na bočníku:

měřicí rozsah: 100 mV

přesnost: $\pm (0,0030 \% \text{ ze čtení} + 0,0003 \% \text{ z rozsahu})$

Multimetr HP 34401A měřící odpor teplotního čidla:

měřicí rozsah: 1 k Ω

přesnost: $\pm (0,0020 \% \text{ ze čtení} + 0,0005 \% \text{ z rozsahu})$

Bočník Agilent 34330A:

měřicí rozsah: 1 k Ω

přesnost: $\pm 0,3 \%$

Termovizní kamera Flir i7:

nastavená emisivita: 0,9