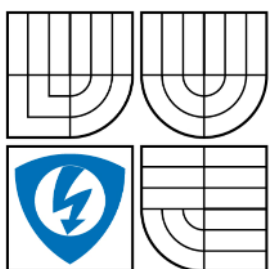


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NEKONVENČNÍ APLIKACE TLUSTÝCH VRSTEV NON-CONVENTIONAL APPLICATIONS OF THICK FILM TECHNOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

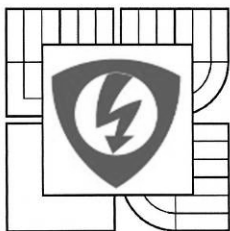
PAVEL KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. IVAN SZENDIUCH, CSC.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Pavel Krejčí

Ročník: 3

ID: 161719

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Nekonvenční aplikace tlustých vrstev

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte princip tlustovrstvové technologie a proveďte rešerši v jejím využití pro nekonvenční aplikace. Navrhněte a realizujte tlustovrstvový planární induktor na organickém i anorganickém substrátu. Zaměřte se přitom na realizaci s vysokou rozlišovací schopností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 2. 6. 2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



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:

Tato práce se zabývá využitím tlustovrstvové technologie v oblasti nekonvenčních aplikací. Předkládá základní podstatu zmíněné technologie, přehled výrobců zaměřených na výrobu tlustovrstvových past a konkrétní příklady využití. Má za cíl čtenáře seznámit s rozvíjejícími se možnostmi tlustovrstvové technologie v nekonvenčních aplikacích, klade si za cíl probudit čtenářovu představivost ve směru vývoje nových aplikací. Experimentální část se zabývá návrhem tlustovrstvového planárního induktoru na organickém a anorganickém substrátu se zaměřením na realizaci s vysokou rozlišovací schopností.

Abstract:

This work deals with issues of application of the thick film technology in the non-conventional field. It includes the essential core of this technology, the overview of producers focusing on manufacturing thick film pastes and concrete examples of application. The general aim is to present growing opportunity of non-conventional application of thick film to the reader and to stimulate the imagination towards inventing new applications. In the experimental part of this work a design of a planar inductor on organic and anorganic substrate is carried out using thick film technology, screen and paste for high resolution.

Klíčová slova:

Tlustovrstvová technologie, nekonvenční aplikace, využití tlustých vrstev, planární induktor, planární vícevrstevný induktor, Greenhouse formula

Keywords:

Thick film technologie, non-conventional application, application of thick film, planar inductor, multilayer planar inductor, Greenhouse formula

Bibliografická citace díla:

KREJČÍ, P. *Nekonvenční aplikace tlustých vrstev*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. 47 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. FEKT VUT v Brně

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Nekonvenční aplikace tlustých vrstev jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování:

Své díky směřuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za hodnotné rady, srozumitelné vysvětlování odborných znalostí a velmi vstřícný přístup. Dále děkuji panu Ing. Michalu Řezníčkovi, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Jankovskému za inspirativní konzultace k experimentální části práce a dalším pracovníkům laboratoří mikroelektroniky za seznámení s užívanou technikou. Těž jsem velmi vděčný svým vyučujícím z Gymnázia Matyáše Lercha, zejména panu Florian Mazure, Mgr. Miroslavu Kuberovi a Mgr. Vojtěchu Benešovi, kteří ve mně vzbudili zájem o aplikovanou fyziku. Dost přínosná byla také konstruktivní kritika z hlediska jazykového mé sestry Marie.

OBSAH

ÚVOD.....	- 1 -
1 TLUSTOVRSTVOVÁ TECHNOLOGIE	- 2 -
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP SÍTOTISKU	- 2 -
1.2 MATERIÁLOVÁ ZÁKLADNA	- 3 -
1.3 SEZNAM NĚKTERÝCH VÝROBCŮ TLV PAST.....	- 5 -
2 NEKONVENČNÍ APLIKACE TLV.....	- 6 -
2.1 DEFINICE.....	- 6 -
2.2 ZOBRAZOVACÍ A OSVĚTLOVACÍ ELEMENTY	- 6 -
2.2.1 <i>Barevný TDEL displej</i>	- 6 -
2.2.2 <i>Technologie IAMS</i>	- 7 -
2.3 SENZORY	- 8 -
2.3.1 <i>Tlakové senzory</i>	- 9 -
2.4 TOPNÉ ELEMENTY	- 10 -
2.5 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	- 11 -
2.5.1 <i>Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)</i>	- 12 -
2.5.2 <i>Solární články PERC</i>	- 13 -
2.6 OSTATNÍ APLIKACE	- 15 -
2.6.1 <i>Vysokoteplotní supravodiče</i>	- 15 -
3 PLANÁRNÍ INDUKTOR.....	- 16 -
3.1 INDUKČNÍ PŘENOS.....	- 16 -
3.2 PARAMETRY	- 17 -
3.3 VÝPOČTY INDUKČNOSTI	- 18 -
3.3.1 <i>Jednovrstevná struktura</i>	- 19 -
3.3.2 <i>Vícevrstevná struktura</i>	- 20 -
3.4 PARAZITNÍ VLASTNOSTI.....	- 20 -
4 REALIZACE PLANÁRNÍHO INDUKTORU.....	- 23 -
4.1 VYTVÁŘENÍ FILMOVÉ PŘEDLOHY V EAGLE LITE 7.5.0	- 24 -
4.2 MOTIVY INDUKTORŮ	- 24 -
4.3 VÝROBA SÍTA.....	- 25 -
4.4 TISK PASTY ESL 1901-S PŘES SÍTO 230 MESH.....	- 26 -
4.5 TISK PASTY DUPONT CB 115 AG PŘES SÍTO 230 MESH.....	- 26 -
4.6 TISK PASTY HERAEUS C 4731 PŘES SÍTO 230 MESH.....	- 27 -

4.7	TISK PASTY HERAEUS C 4731 PŘES SÍTO 400 MESH	- 27 -
4.8	PROFIL VÝSLEDNÉ STRUKTURY	- 30 -
4.9	STEJNOSMĚRNÉ HODNOTY ODPORU INDUKTORŮ	- 32 -
4.10	ZÁVISLOST INDUKČNOSTI A ODPORU NA FREKVENCI	- 33 -
4.11	SHRNUTÍ TECHNOLOGICKÝCH LIMITŮ	- 36 -
4.12	TECHNOLOGICKÉ NÁMĚTY	- 37 -
ZÁVĚR		- 38 -
SEZNAM UŽITÝCH ZDROJŮ		- 39 -
SEZNAM UŽITÝCH ZKRATEK.....		- 43 -
SEZNAM OBRÁZKŮ		- 45 -
SEZNAM TABULEK		- 47 -

Úvod

Tlustovrstvová technologie je nevakuumová aditivní metodou vytváření elektrických obvodů, spočívající v nanesení, sušení a vypálení funkčních materiálů ve formě viskózních past na substrát. Každá jednotlivá vrstva (vodivá, odporová, dielektrická, speciální) je nanášena pomocí pasty. Ta se sama o sobě skládá ze složky funkční (určuje charakter pasty), tavivové (vytváří vazbu mezi substrátem a funkční složkou) a pojivové (zajišťuje její tisknutelnost). Nejrozšířenějším způsobem nanášení past je sítotisk. Nejčastěji se užívají keramické substráty, pro které se standardní teplota výpalu pohybuje okolo 850 °C. Typická tloušťka tlustých vrstev je řádově v desítkách mikrometrů. Tato technologie se vyznačuje mimo jiné poměrně jednoduchým levným nevakuumovým způsobem výroby, příznivou spolehlivostí a životností, v neposlední řadě pak značnou možností integrace. Velké množství TLV materiálů je charakteristické efektivním rozvodem tepla, dobrou stabilitou, nízkými dielektrickými ztrátami, tepelnou, mechanickou, chemickou a klimatickou odolností, možností většího výkonového zatížení. Díky mnohým výhodám nachází tato technologie velmi široké uplatnění v celé řadě aplikací.

Zpočátku svého širšího rozvoje, během 60. a 70. let, byla TLV technologie zaměřena zejména do sféry vytváření hybridních integrovaných obvodů. Poté, v 80. letech došlo v mikroelektronice k výraznému vývoji polovodičových technologií, které snížily poptávku po hybridních integrovaných obvodech. Role vrstevových technologií se přesunula do oblasti speciálních aplikací, kde je žádána vysoká teplotní stabilita vlastností a dále do oblasti výkonových a vysokofrekvenčních aplikací. Zároveň se začalo hojně rozvíjet využití vrstevových technologií v tzv. nekonvenčních aplikacích. [2]

V současnosti využití tlustých vrstev zasahuje do obrovského okruhu odvětví. Můžeme zmínit významné rozšíření do automobilového průmyslu, lékařství, letectví a vojenské techniky. O všestranném využívání této technologie značně vypovídá existence množství past pro konkrétní určení: pasty pro výrobu pasivních komponent, pro hybridní obvody, pasty pro výkonové aplikace, pro osvětlovací LED techniku, pro fotovoltaiku, pro senzoriku, pro LTCC, pro palivové články, pasty určené pro tisk na kovové substráty (oproti klasickému tisku na korundovou keramiku). [4] Tlustovrstvová technologie je v mnohých odvětvích zakotvena již po desetiletí, do jiných teprve proniká. Umožňuje plnění požadavku vytváření čím dál tím více sofistikovaných obvodů. Zároveň její vynikající vlastnosti ji předurčují pro značné množství neobvyklých aplikací. Tato práce se pokusí čtenáře seznámit konkrétními příklady s možnostmi právě těchto „exotických“ aplikací, klade si za cíl probudit čtenářovu představivost ve směru vývoje nových aplikací.

1 Tlustovrstvová technologie

1.1 Základní princip sítotisku

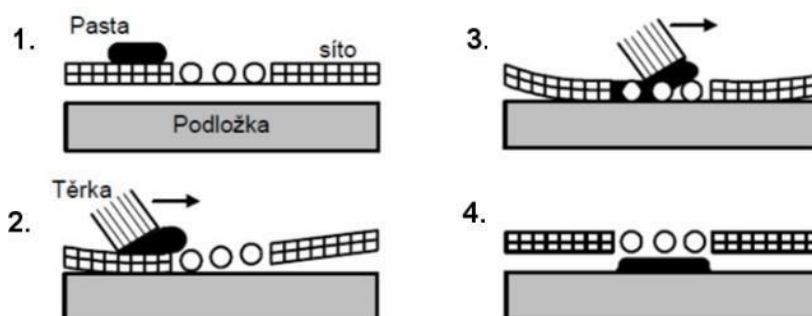
Nejrozšířenější způsob vytváření tlustých vrstev je sítotisk (v menší míře je rozšířen též šablonový tisk a disperzní tisk). Popíšeme si stručně technologický postup sítotisku:

- **Příprava**

Je třeba substrát, na který se bude tisknout řádně očistit. V definované vzdálenosti (tzv. odtrh) je nad substrátem umístěno síto s maskou. Poté je substrát uchycen a sesouhlasen se sítím. Následuje nanesení adekvátního množství pasty na horní plochu síta.

- **Nanesení pasty**

Těrka s definovaným sklonem, rychlostí a tlakem natiskne skrz síto pastu na substrát. Těrka před sebou hrne množství pasty a zároveň prohýbá síto, které je tlačeno do kontaktu se substrátem, díky tomu je přenášen vzor. Po natisknutí necháme pastu několik minut uležet (tzv. levelling), aby se vyrovnaly profilové rozdíly.



Obr. 1-1: Princip sítotisku [10]

- **Sušení**

Typicky 150 °C po dobu 15 minut v sušící peci, která je odvětrávána (vypařují se těkavé látky z objemu pasty).

- **Výpal**

Probíhá standardně v průběžných in-line pecích. Nejdůležitějším faktorem je správné řízení teplotního profilu pece. Nejprve jsou odpařeny organické pojivové látky pasty, poté se zvyšující se teplotou začnou měknout složky tavivé a dále se přetaví funkční složky. Standardní teplotní profil se vyznačuje maximální teplotou 850 °C a časem průběhu půl hodiny až jedna hodina. [1]

Postup (nanesení a sušení pasty) se pro stejný substrát opakuje dle počtu jednotlivých vrstev. Celková kvalita tisku je ovlivňována viskozitou pasty, úhlem smáčení mezi pastou a sítkou, úhlem smáčení mezi pastou a podložkou, rozměry ok a tloušťkou vlákna síta, tvarem a rychlostí pohybu těrky, tloušťkou emulze (fotocitlivého rezistu), rovinností a drsností podložky. [10]

1.2 Materiálová základna

Nejčastěji užívaným substrátem v tlustovrstvové technologii je korundová keramika (Al_2O_3). Mezi její výhody patří lepší mechanické vlastnosti (snad krom křehkosti), elektrická pevnost, klimatická odolnost, v neposlední řadě pak lepší odvod tepla oproti organickým substrátům. Nevýhodou je vyšší cena a složitější příprava. Avšak keramika přináší v kombinaci s TLV technologií vyšší spolehlivost a perspektivitu využití pro vícevrstvé struktury. Objevují se i nové materiály jako např. epoxidové flexibilní substráty, nové typy keramik (Aluminium-nitridová keramika), substráty s kovovým jádrem nebo čistě kovové substráty (tisk past přímo na hliníkový substrát).

Pasty pro TLV technologii můžeme dle její funkce rozčlenit následovně:

- **Vodivé pasty**

Slouží pro zhotovení vodivých motivů. Funkční složkou jsou nejčastěji ušlechtilé kovy (stříbro, zlato, platina, paládium a jejich různé kombinace). Vyznačují se svojí stálostí a odolností vůči prostředí.

- **Odporové pasty**

Funkční složka je tvořena většinou oxidy vzácných kovů (např. RuO_2 , IrO_2). Hodnota odporu je dána poměrem vodivé a tavivé skelné složky.

- **Dielektrické**

Nejčastěji se užívá BaTiO_3 . Jsou užívány pro vytváření TLV kondenzátorů s menšími hodnotami.

- **Izolační a krycí pasty**

Tyto neobsahují funkční složku, jsou tvořeny různými typy skelných frit. Jsou užívány pro izolování křížení vodivých cest a pro vytváření vícevrstvé struktury. Krycí pasty chrání součástky před vnějšími vlivy prostředí.

- **Speciální pasty**

Dále mohou být nanášeny na substrát různé funkční směsi, např. magnetické, termistorové, luminiscenční, stínící a nejrůznější pasty pro rozličné senzory.

Tab. 1-1: Přehled základních složek TLV past [24] [25]

Pasty	Základní složka
Vodivé	Au, Ag, AgPt, AgPd, AgPtPd, Cu
Odporové	AgPd + RuO ₂
Dielektrické	BaTiO ₃ , skelné frity
Elektrodové	C, AgCl, Ag, AgC, Au, Pt

Dle chemického složení TLV past je možno je rozdělit následovně:

- **Cermetové pasty**

Jedná se o směs částic kovů, skelných frit a pojiva. Tloušťka klasických cermetových past se pohybuje většinou v rozmezí 5-15 μm .

- **Resinátové pasty**

Jedná se o sloučeniny organicko-kovové, které jsou homogenně rozpuštěny v éterickém oleji. Tedy oproti cermetovým pastám nejsou složeny z jednotlivých práškových částic a frit. Atomy a molekuly rozpuštěných látek jsou rozptýleny v objemu. Výhodou může být vyšší rozlišovací schopnosti a taktéž tloušťka vypálené vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1-1 μm . [26]

Dále pak je možno dělit TLV technologii dle materiálu substrátu:

- **Cermetová TLV technologie**

Jako materiály substrátu jsou užívány skla na anorganické bázi, sklo-keramické materiály a materiály tvořené keramikou, sklem a kovem. Standardní teplota výpalu se pohybuje kolem 850 °C. Oproti polymerovým vrstvám se cermetové vyznačují nižší hodnotou odporu vodivých cest, širší pracovní teplotou, vyšším možným výkonovým zatížením a vyšší tepelnou vodivostí.

- **Polymerová TLV technologie**

Pro polymerové substráty se užívají polymery a polymerní sloučeniny. Výhodou těchto vrstev je nižší hodnota teploty vypalovacího profilu. Dle konkrétní pasty a substrátu se teplota výpalu pohybuje okolo 200 °C. Vůči vlhkosti nejsou tyto vrstvy příliš odolné, což snižuje jejich celkovou odolnost a stabilitu.

1.3 Seznam některých výrobců TLV past

- DuPont [27]
- Heraeus [4]
- ESL Electroscience [28]
- Fraunhofer [29]
- Ercon [30]
- Gwent Group [31]
- Koartan Inseto [32]
- Sumitomo Metal Mining [33]
- Tanaka [34]
- Noritake [35]
- Parlex Development [36]
- Multek [37]
- Johnson Matthey [38]
- Asahi Chemical Research Laboratory [39]

2 Nekonvenční aplikace TLV

2.1 Definice

Za nekonvenční (netradiční či netypické) aplikace tlustých vrstev jsou považovány ty aplikace, které se od klasického pojetí výrazněji odlišují. V klasickém pojetí jsou patrné jednotlivé obvodové prvky (rezistory, kondenzátory, tranzistory atd.). Nekonvenční aplikace využívají nikoliv pouze jevy čistě elektrické, ale i jevy a principy fyzikální a chemické. [2]

Nekonvenční aplikace lze rozdělit dle směrů využití do následujících kategorií:

- Zobrazovací a osvětlovací elementy
- Senzory
- Topné elementy
- Zdroje elektrické energie
- Antény pro čipové karty
- Mikrovlnné obvody
- Vysokonapěťové aplikace (izolace)
- Ostatní aplikace (vysokoteplotní supravodiče, TLV pojistky, speciální lékařské aplikace)

Cílem této kapitoly je poukázat na dlouhodobou perspektivitu tlustovrstvové technologie a popsat některá zajímavá využití v oblasti nekonvenčních aplikací.

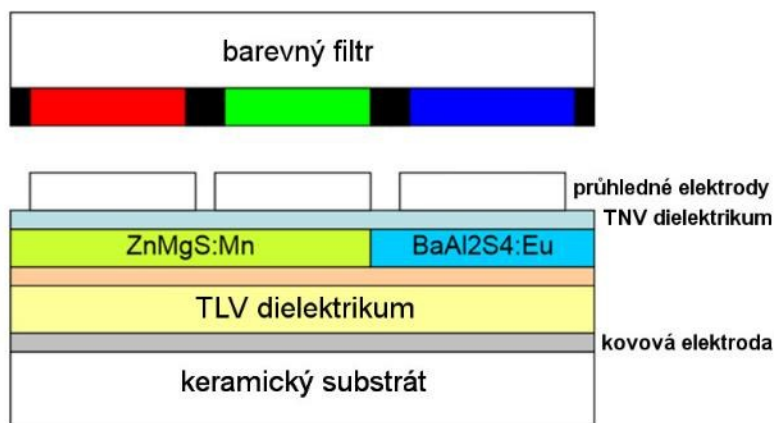
2.2 Zobrazovací a osvětlovací elementy

Zobrazovací elementy zahrnují oblast nejrozličnějších displejů, které slouží většinou jako výstupní články pro vyjádření informace ve vizuální podobě. Jako osvětlovací elementy chápeme všechny výrobky, jejichž primárním účelem je emitovat světlo. Výhodou využití tlustovrstvové technologie v těchto oblastech je zejména levný způsob výroby a dobrá mechanická odolnost.

2.2.1 Barevný TDEL displej

Tato technologie využívá principu elektroluminescence. Jedná se o přímou netepelnou přeměnu elektrické energie na světlo. Elektroluminescenční materiál emituje světlo, jestliže jím prochází elektrický proud, nebo se ocitne v silném elektrickém poli. Elektrická energie excituje atomy, což zapříčiní emisi fotonu.

Obr. 2-1 znázorňuje uspořádání barevného TLV dielektrického elektroluminescenčního displeje (TDEL displays). Podkladová vrstva je vyrobena z keramického substrátu. Vrstva TLV dielektrika s vysokou hodnotou permitivity a TNV dielektrika zabraňují vytvoření elektrického oblouku mezi dvěma elektrodami. Mezi dielektriky jsou vytvořeny fosforové struktury ZnMgS:Mn pro červené a zelené, BaAl₂S₄:Eu pro modré emitování světla. Barevný filtr pak odděluje zelenou a červenou barvu, navíc slouží pro zvýšení kontrastu a čistoty barev. [5] Nutno poznamenat, že TDEL využívá procesů tlustovrstvých i tenkovrstvých.

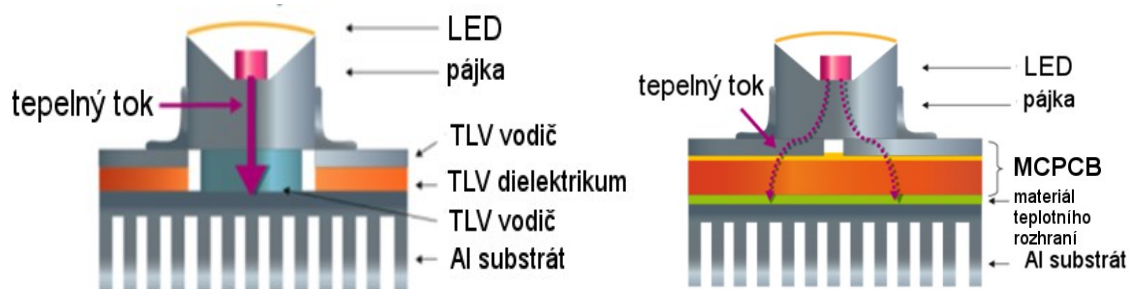


Obr. 2-1: Náskres TDEL struktury [5]

Oproti TFEL displejům mohou TDEL pracovat s vyššími proudy, což jim umožňuje vytvářet větší svítivost. TDEL displeje jsou již schopny emitovat modré světlo s přijatelnou svítivostí, což umožnilo jejich využití pro barevné zobrazení RGB. Mezi jejich další výhody patří vyšší účinnost, životnost, mechanická a teplotní odolnost a nižší cena. [6] Některé prototypy byly pomocí TDEL realizovány, např. malé grafické displeje, segmentové displeje, 17-ti palcové monitory se standardním rozlišením, 34 palcové televizní obrazovky s rozlišením HD. [7]

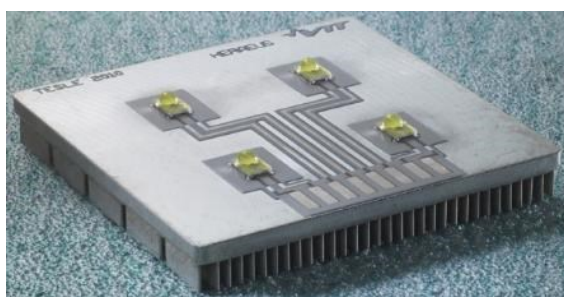
2.2.2 Technologie IAMS

Podstatou IAMS technologie (Insulated Aluminum Material Systems) je natisknutí a vypálení TLV past přímo na hliníkovém substrátu. Mimo jiné součástka obvodu pak může být umístěna přímo na vodivé pastě, která ji spojuje se substrátem (Obr. 2-2). Není třeba více vrstev. Toho je možno značně využít v osvětlovací LED technice. LED přeměňují 20-30 % elektrické energie na viditelné světlo, zbytek je transformován na teplo. Toto teplo je třeba odvádět od součástek, jelikož zvýšená teplota může snižovat účinnost a životnost LED, což je limitujícím faktorem pro její optimální fungování. IAMS umožňuje v rámci elektrického obvodu mnohem lépe tepelné toky směřovat (díky umístění součástky přímo na hliník) a přináší mnohé výhody.



Obr. 2-2: IAMS a MCPCB na hliníkovém substrátu [8]

Pro speciální výkonové aplikace nebyly vždy ideální klasické DPS, kvůli jejich vyššímu tepelnému odporu a menší odolnosti substrátu, proto se rozšířily MCPCB (substrát s kovovým jádrem). Oproti klasickým DPS se u IAMS teplota nerozprostírá tolik po povrchu desky, je přímo odváděna do hliníkové struktury plnící funkci pasivního chladiče (vysoká hodnota součinitele tepelné vodivosti). Díky tomu pracuje obvod s téměř o 10 °C nižší teplotou než odpovídající obvod MCPCB. To umožňuje delší životnost LED a jejich větší svítivost. Pro představu, pro dosažení totožné svítivosti jako u substrátů s kovovým jádrem je možné snížit počet diod o 20 %. Navíc IAMS se vyznačuje srovnatelnou tloušťkou, na rozdíl od MCPCB je vytvářena aditivní technologií, tedy depozicí materiálu na definovaná místa (méně technologických kroků, menší spotřeba materiálu, jednodušší technologický postup) a je tvořena inertním nehořlavým materiálem (sklo, kov). [8] IAMS se zdá být velmi perspektivní technologií pro vysokovýkonové LED osvětlení. Nutno poznamenat, že tato aplikace by nemusela být považována za čistě nekonvenční aplikaci TLV, avšak využívání fyzikálního principu tepelné vodivosti právě díky TLV technologii je hlavní podstatou IAMS.



Obr. 2-3: LED systém realizovaný pomocí IAMS [9]

2.3 Senzory

Elektrické senzory tvoří širokou oblast, přičemž jejich posláním je snímat reakce různých fyzikálních a chemických procesů a vyjadřovat jejich míru ve formě elektrického signálu. Velkou výhodou využití tlustovrstvové technologie v sensorice je chemická, teplotní a mechanická odolnost TLV materiálů, zejména jsou-li užity jako citlivé struktury. Často jsou

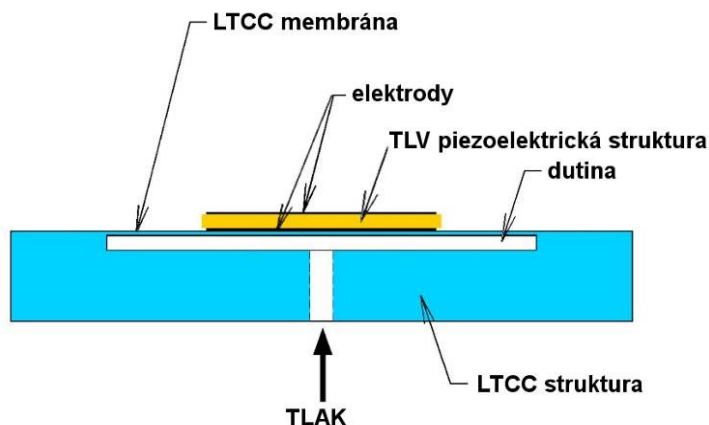
používány TLV vodivé pasty pro tisk elektrod, které jsou dále pokryty ochrannou vrstvou a umožňují tak bezkontaktní měření (zejména kapalin).

2.3.1 Tlakové senzory

- **Piezelektrický princip**

Tyto senzory se skládají z LTCC struktury s vnitřní dutinou, na elastickou membránu natisknutých elektrod pomocí TLV technologie a taktéž natisknuté vrstvy piezelektrického materiálu. Piezelektrický materiál (např. PZT - Plumbum Zirconate Titanate) se vyznačuje citlivostí na mechanické deformace, které mají za následek změnu elektrického napětí v této struktuře. Pokud je tedy tlakem prohnuta membrána, na níž leží piezelektrická struktura, je možno snadno pomocí elektrod tuto deformaci zaznamenat a změřit hodnotu napětí, potažmo tlaku. [3]

Taktéž můžeme využít v obdobném uspořádání opačného piezelektrického jevu (tedy elektrostrikce), kdy je možno elektrickým napětím deformovat TLV strukturu. Pak je možno řízenou periodickou deformací citlivé struktury (a v důsledku membrány) generovat mechanické vlnění – zvuk. Pomocí této technologie je možné vytvářet klimaticky a mechanicky velmi odolné reproduktory.

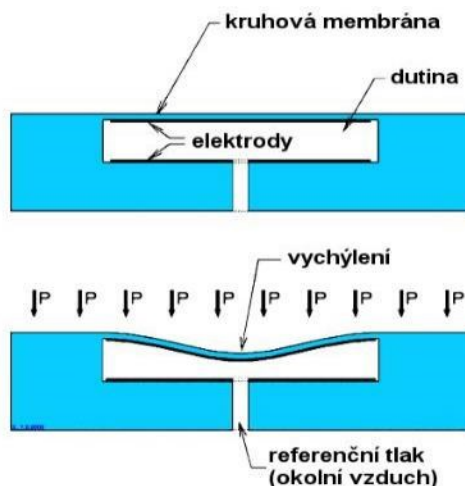


Obr. 2-4: Návrh piezelektrického senzoru (či reproduktoru) [15]

- **Kapacitní princip**

Základní uspořádání tlakových senzorů založených na kapacitním principu (Obr. 2-5) zahrnuje TLV kruhovou elastickou membránu nanesenou na základním substrátu. Pod ní jsou vytvořeny dvě TLV elektrody sloužící jako citlivé kapacity. Pokud tlak působící na membránu vyvolá její prohnutí, prohne se i horní elektroda, v důsledku čehož se změní vzdálenost mezi elektrodami a tedy i hodnota kapacity citlivých elektrod.

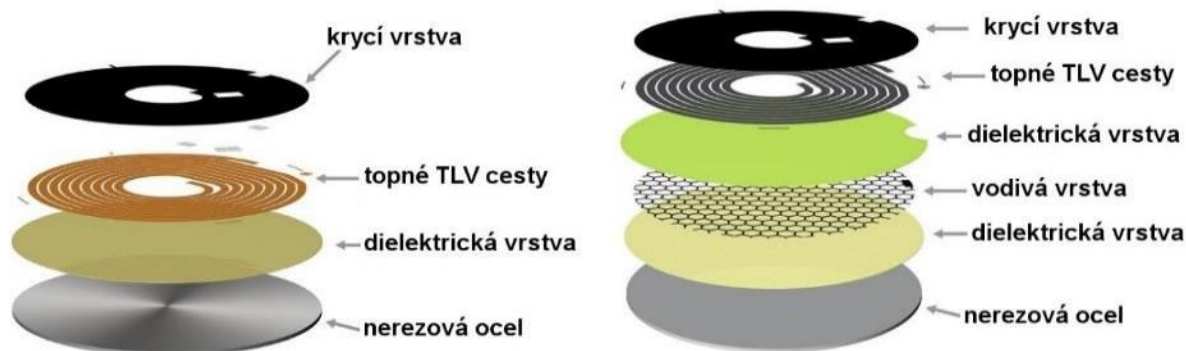
Návrh příslušné LTCC struktury se zmíněnou tenkovrstvou membránou, úzkou vzduchovou dutinou mezi tlustovrstvovými elektrodami je velmi ztížen nutností maximálně zamezit nejrůznějším parazitním kapacitám či dalším faktorům ovlivňujícím charakteristiku senzoru. Odstínění těchto ovlivňujících faktů je možno získat vyšší rozlišovací citlivost.



Obr. 2-5: Návrh tlakového senzoru na kapacitním principu [15]

2.4 Topné elementy

Základní uspořádání topného elementu vytvářeného pomocí tlustovrstvové technologie je znázorněno na Obr. 2-6. Na nosný substrát (korozivzdorná ocel, keramika) je natisknuta izolační vrstva. Poté je na ni natisknuta vrstva vodivé a odporové pasty, která je při průchodu elektrického proudu zdrojem Jouleova tepla. Na ni je pak nanášena krycí vrstva pro mechanickou ochranu. Vrstvy jsou jednotlivě natisknuty a vypáleny.



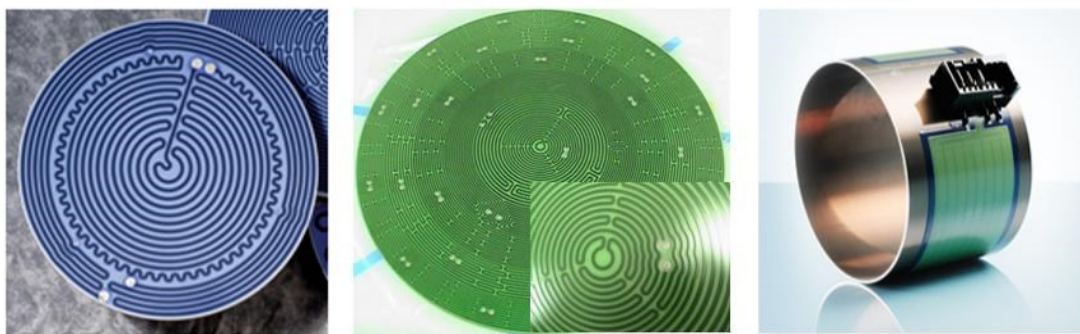
Obr. 2-6: Klasický TLV topný systém a systém E-Fast [11]

Nedostatkem klasických TLV topných těles je často jejich poškození v důsledku přehřátí (ohřívání nasucho u systémů pro ohřev vody, nadměrný nárůst vodního kamene). V systému jsou sice přítomny senzory indikující přehřátí, ale tyto nepokrývají celou plochu a tedy nezabrání lokálnímu přehřátí. Tento problém řeší technologie E-Fast (Electronic Full Area

Sensor Technology). Ta je schopna monitorovat celou plochu TLV topných cest. Základní princip uspořádání je obdobný jako u klasického TLV topného systému. Navíc je však přidána vodivá struktura umístěná mezi dvě dielektrické vrstvy. Tato struktura detekuje výrazný nárůst elektrického proudu generovaného v sensorové vrstvě topnou TLV vrstvou při přehřátí. [11]

Topné elementy realizované tlustovrstvovou technologií se oproti leptaným fóliím a drátovým spirálám vyznačují efektivnějším rozprostřením tepla po ploše, rychlejší teplotní změnou díky nízké tepelné kapacitě a možností výraznější miniaturizace. Jejich účinnost se pohybuje mezi 70 % a 95 % (dle toho, zda se jedná o přímý, či nepřímý ohřev). Výhodou je též možnost koncentrovat větší výkon do malé plochy (desítky W/cm^2) díky odolnosti tlustých vrstev. Typickou maximální teplotou TLV topných systémů je asi $350\text{ }^\circ\text{C}$ na povrchu rezistorů produkujících Jouleovo teplo. [12]

Technologie tlustovrstvových topných těles se uplatňuje v oblasti výroby myček a praček, žehliček, nástrojů na voskování lyží, zvlhčovačů vzduchu, kávovarů, rychlovarných konvic či bojlerů, vyhřívačů čoček videokamer a dalších speciálních aplikacích v medicíně či automobilovém průmyslu (vyhřívače skel). Za zmínku stojí perspektiva tisku na válcové substráty (koroziivzdorná ocel či titan), které lze uplatnit pro výrobu průtokových vysokorychlostních ohřivačů pro průmyslové aplikace či např. pro ohřev bazénů. Využívá se též více a více vynikajících vlastností aluminium-nitridové keramiky (AlN), která se svojí tepelnou vodivostí (170 W/mK) vyrovná kovům a zároveň se vyznačuje dobrou elektrickou izolací.



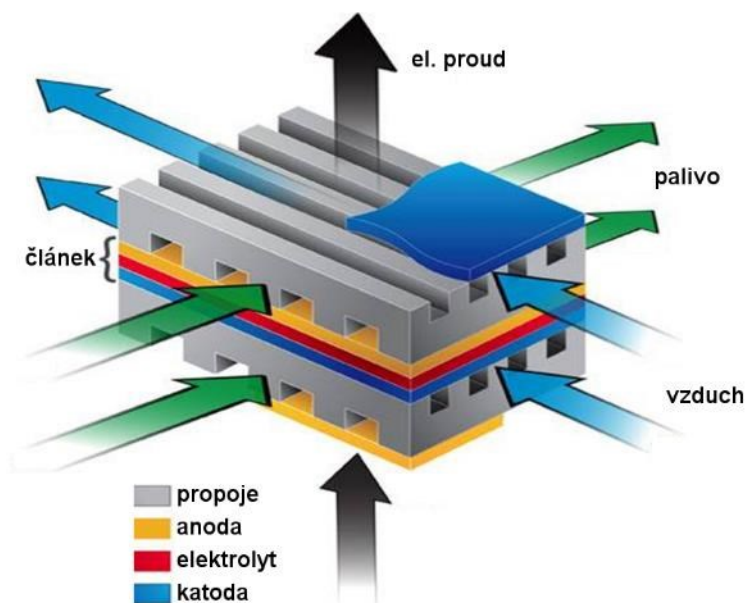
Obr. 2-7: TLV topná tělesa na Al_2O_3 , AlN [13] a válcovém substrátu z oceli [14]

2.5 Zdroje elektrické energie

Za zdroje elektrické energie pokládáme zařízení, která jsou schopna přeměňovat určitý druh energie (chemickou, mechanickou, tepelnou, světelnou) na energii elektrickou. Využití TLV technologie pro výrobu těchto zdrojů je výhodné především pro její efektivní a poměrně nízkonákladové možnosti adaptace pro sériovou výrobu, pro její výraznou odolnost a pro příznivé elektrické vlastnosti.

2.5.1 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)

Aktuální dlouhodobá potřeba zdrojů obnovitelné energie, co nejšetrnějších k životnímu prostředí, vede mimo jiné k vývoji mnoha alternativ k fosilním palivům. Jednou z nich je palivový článek, jehož podstatou je elektrochemická přeměna. Chemická energie paliva a okysličovadla je přímo přeměňována na energii elektrickou (účinnost až 70 %). [16] K anodě je přiváděno palivo a ke katodě okysličovadlo za vzniku elektrického proudu (Obr. 2-8).



Obr. 2-8: Průřez SOFC strukturou [18]

V této oblasti palivových článků s tuhými oxidy (SOFC - Solide Oxide Fuel Cells) je možno využít TLV technologie a jejich pozitiv, zejména výkonové i chemické odolnosti a poměrně jednoduchého technologického postupu pro sériovou výrobu. Pomocí past s vhodným složením je natisknuta katodová, elektrolytická, anodová a propojovací vrstva. Struktura je zkompletována a následně vypálena.

Vlastnosti struktury a jednotlivých vrstev musí odpovídat požadavkům jako je teplotní odolnost (SOFC pracuje při 700 °C - 1000 °C), adekvátní teplotní roztažnost při teplotních skocích, přesně definovaná tloušťka pasty po celé ploše při tisku a její přesně definovaná struktura povrchu. Vlastnosti materiálu předurčují účinnost výsledného palivového článku, což vede k výzkumu past vysoké kvality. Katodová pasta musí zajišťovat vlastnosti pro elektrochemickou transformaci, musí být dostatečně vodivá i v oxidační atmosféře za vysokých teplot (650 °C - 900 °C). Dále je důležité zachování definované poréznosti povrchu pro zajištění průtoku plynu k a od elektrolytu. Anodová pasta má obdobné požadavky jako katodová. Pasty pro elektrolyt se musí vyznačovat vysokou hustotou, tenkostí, uniformostí tloušťky po celém povrchu. Pasty pro propoje musí být vysokoteplotně odolné, chemicky odolné a odolné vůči

teplotním cyklům. Pasty pro katody jsou tvořeny např. oxidem nikelnatým (NiO) s možnými aditivami, pro anody různými dopovanými sloučeninami manganitu, pro elektrolyt YSZ (yttria-stabilized zirconia), pro propoje drahými kovy a vysokoteplotními slitinami (Pt, dopované chromity jako LCC, LSCC). [17]



Obr. 2-9: SOFC [16]

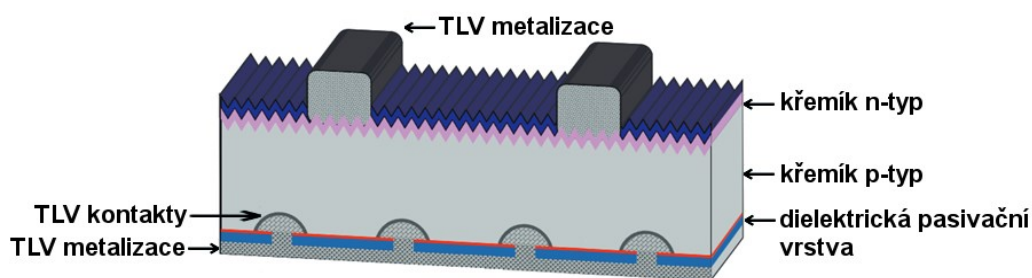
Důležitost hledání nových alternativních materiálů pro výrobu zmíněných past je zřejmá zejména z hlediska ekonomičnosti a ekologičnosti technologie SOFC. Palivový článek je sice schopen bez velkých ztrát přeměňovat energii, nicméně bude-li obsahovat některé materiály (např. platinu), které jsou energeticky obtížně zpracovatelné, nebude v důsledku ekologicky šetrný. Škála užívaných materiálů pro SOFC za poslední dobu rapidně vzrostla, což je zásadní pro plnohodnotný vývoj této technologie.

2.5.2 Solární články PERC

Vzhledem k současné poptávce po zdrojích obnovitelné energie se zaměřuje výzkum taktéž na zlepšování vlastností solárních článků. Posledním zdokonalením je struktura PERC (Passivated Emitter Rear Cell). I zde tlustovrstvová technologie nachází své uplatnění. Hlavní podstatou PERC článku je pasivace spodní strany vhodnou dielektrickou vrstvou a kvalitnější kontaktování TLV pastami. Přední a zadní krycí vrstva je tvořena sklem. Tyto solární články vykazují vyšší životnost, odolnost, ekonomičnost, efektivitu a také eliminují degradační efekt známý jako PID (potential induced degradation). Za zmínku stojí dosažení účinnosti přeměny slunečního záření na elektrickou energii ve výši 21,7% firmou SolarWorld v roce 2015 právě pomocí článků PERC.

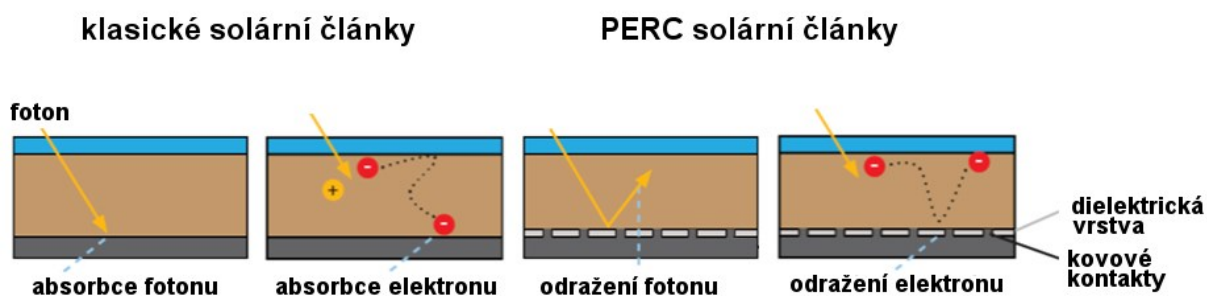
Samotná struktura PERC sestává z křemíkového waferu tvořícího PN přechod. Na spodní straně je vytvořena pasivační dielektrická vrstva nejčastěji z Al_2O_3 , nebo SiO_2 . Spodní metalizace (Ag) je propojena s waferem pomocí past pro lokální kontaktování (Al). Horní metalizace je tvořena pastou na bázi stříbra (Obr. 2-10). [20] TLV pasty zajišťují vyšší účinnost díky vytvoření lepšího elektrického kontaktu a vyšší adhezi na křemíkový wafer. Pro vyšší

hustotu kontaktování se užívají pasty s vysokou rozlišovací schopností. Během vypalování musí pasta adekvátně naleptat pasivační vrstvu, čímž se zajistí lepší elektrické spojení metalizace a křemíku, zároveň tavivová složka pasty musí zajistit dostatečnou adhezi s křemíkovým waferem. Teplotní profil musí být svižný, aby nedocházelo k přílišné difuzi funkčních složek pasty do křemíku. Celý tento proces formování metalizace není doposud plně prostudován. [21]



Obr. 2-10: Průřez strukturou PERC [20]

Vlastní podstatou solárních článků je předání energie fotonů elektronům křemíkové struktury. Excitované elektrony se mohou volně pohybovat křemíkovým waferem, a jestliže dorazí až na rozhraní PN přechodu, jsou vtaženy na druhou stranu přechodu, čímž vytváří napěťový rozdíl. Obr. 2-11 vysvětluje principiální výhody PERC struktury oproti klasické. Jestliže excitovaný elektron dorazí k spodní straně článku, je jí často „zachycen“ a nemůže se podílet na vzniku elektrického proudu. U PERC technologie je elektron, který dorazil na spodní stranu článku „odražen“ pasivační dielektrickou vrstvou. Tím se zvyšuje pravděpodobnost, že dorazí na horní stranu až na PN přechod, kde se bude moci podílet na vzniku proudu. Podobně je tomu se světlem. Pokud se foton procházející křemíkem dostane až na spodní stranu, je u klasické struktury absorbován do spodní vrstvy, čímž se v důsledku zahřívá. Jedná-li se o PERC strukturu, je opět velká pravděpodobnost, že bude foton odražen spodní pasivační dielektrickou vrstvou. Znovu se zvyšuje pravděpodobnost, že foton excituje elektron. [19]



Obr. 2-11: Srovnání klasických a PERC článků [19]

2.6 Ostatní aplikace

2.6.1 Vysokoteplotní supravodiče

Zdokonalení materiálů pro výrobu vysokoteplotních supravodičů může vést k celé řadě velmi efektivních aplikací a zároveň otevřít zcela nové pole výzkumu v oblasti elektrotechnologie. Zmiňme např. využití v oblasti vysokofrekvenční (nízkošumové mikrovlnné filtry, transformátory) či nejrůznější nízkoztrátová propojení. [23] Některé typy tlustých vrstev se vyznačují v určitých podmínkách zmíněným jevem. Supravodivost se projevuje již kolem teploty 100 K. Cílem vědců je nalézt cenově dostupný způsob vytváření vysokoteplotních supravodičů slučitelný s již existujícími technologiemi.

V dnešní době se zdá být nejperspektivnějším materiálem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) a BiSrCaCuO (BSCCO). Vyvíjejí se dále různé krycí vrstvy jako např. $\text{La}_{0,4}\text{Sr}_{0,6}\text{TiO}_3$ (LSTO). Tyto směsi se nejčastěji připravují pomocí elektroforézní depozice (EPD) pro dosažení co možná nejdefinovanějšího složení. Mimo jiné se ukazuje důležitost zmenšování velikosti funkčních částic pasty, které může výrazně snížit riziko vzniku mikroprasklin uvnitř tvořené struktury supravodiče. [22]

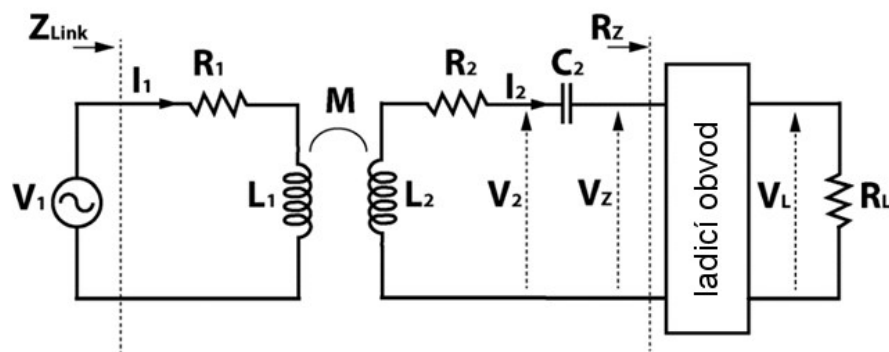
3 Planární induktor

Bezdrátový přenos elektrické energie pomocí indukčního či rezonančního principu si v posledních letech vydobývá čím dál tím větší pozornosti pro nesčetnou perspektivitu aplikací v nejrůznějších odvětvích. Zmiňme dobíjení nejrůznější spotřební elektroniky (mobilních telefonů, GPS navigací), či alternativní napájení biomedicínské bezbateriové elektroniky implementované v živé tkáni (biosenzory sledující úroveň glukózy diabetiků). [42] [41] Hlavní otázkou stále zůstává způsob miniaturizace a životnost induktoru zajišťujícího příjem energie za současného zachování co nejvyšší energetické účinnosti.

Planární induktor vyráběný pomocí TLV technologie je poměrně levný, odolný, technologicky méně náročný, je možno jej tisknout na substráty flexibilní i pevné. Navíc se tyto planární cívky vyznačují stabilní hodnotou indukčnosti (při vhodném rozvržení na substrátu její tolerance je menší než 2%). [40] Ve srovnání s jednovrstvovými planárními induktory, jsou vícevrstvé zabírající totou plochu schopny dosáhnout až o 35% vyšší účinnosti a vyššího napěťového zisku. Naopak nevýhodou TLV planárních induktorů může být ztráta ohebnosti při navyšování počtu vrstev, či limitovaná rozlišovací schopnost při tisku, která omezuje minimální velikost induktoru. Nicméně optimalizovaný návrh induktoru může tyto nevýhody do značné míry potlačit. Konkrétně popsáno v literatuře [41].

3.1 Indukční přenos

Obvod indukčního přenosu (Obr. 3-1) je složený z dvou (či více) magneticky spojených induktorů.

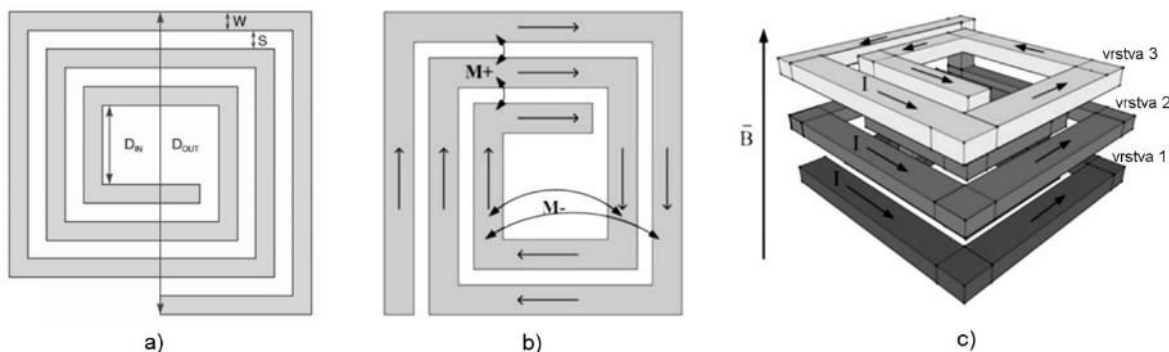


Obr. 3-1: Schematický popis indukčního spojení [41]

Střídavý elektrický proud protékající tzv. vysílacím induktorem L_1 mění ve svém okolí magnetické pole. Je-li v dosahu přijímací induktor L_2 , je na něm generována elektromotorická síla. Pokud je pak přijímací induktor připojen k zátěži, protéká skrz ni elektrický proud. Indukční spojení dvou induktorů na Obr. 3-1. L_1 je doplněn odpovídajícím sériovým odporem R_1 a L_2 odpovídajícím sériovým odporem R_2 . Pokud toto spojení pracuje na kmitočtu o dost

nižším než je jeho vlastní rezonanční kmitočet (SRF) těchto dvou induktorů L_1 a L_2 , není třeba dalších částí obvodu. Resonanční kondenzátor C_2 slouží pro uvedení přijímacího obvodu do resonance a k maximalizaci přenosu elektrické energie. Aby rezonoval s induktorem L_2 na pracovním úhlovém kmitočtu ω , hodnota C_2 je stanovena dle vztahu $C_2 = 1/\omega^2 L_2$. Ladicí obvod slouží k tomu, aby zajistil impedanční přizpůsobení mezi R_2 a R_L . Typicky je tvořena soustavou kondenzátorů. [41]

3.2 Parametry



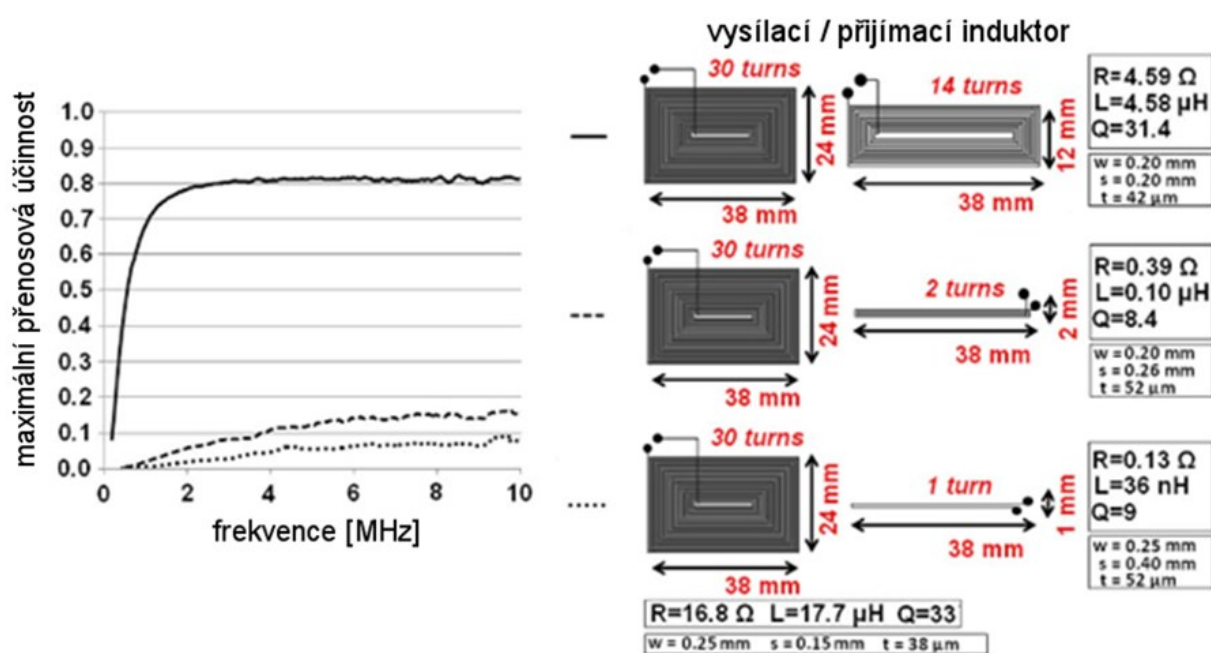
Obr. 3-2: a) geometrické parametry čtvercového induktoru b) pozitivní ($M+$) a negativní ($M-$) vzájemné indukčnosti závitů c) soustředný tok elektrického proudu ve vícevrstvé struktuře [41] [42]

Celková hodnota indukčnosti je dána součtem indukčnosti vlastní a vzájemné. Jak je patrné z Obr. 3-2:b, blíže středu cívky začínají být vzájemné negativní indukčnosti mezi jednotlivými závity výraznější. Není vždy žádoucí zmenšovat vnitřní plochu, umožňuje-li to konkrétní aplikace.

- Počet závitů: S rostoucím počtem závitů roste i výsledná indukčnost. Zároveň však roste i hodnota parazitního odporu (pro totožnou pastu) a výsledný motiv zabírá větší plochu (je-li zachována šířka cesty w a rozestupy s).
- Šířka vodivé cesty: S rostoucí šířkou vodivé cesty a tedy se zmenšujícím se vnitřním průměrem, výsledná indukčnost klesá. Čím jsou vnitřní závity blíže sobě, tím je více převládající negativní vzájemná indukčnost $M-$ (obrázek 4.2b). Nicméně současně s rostoucí šířkou vodivé cesty se snižují ztráty parazitního sériového odporu.
- Rozestupy vodivých cest: Čím jsou rozestupy větší, tím je výsledná indukčnost nižší, jelikož vnitřní průměr se zmenšuje též. Menší rozestupy vedou k vyšší hodnotě vzájemné pozitivní indukčnosti mezi vinutími, čímž se výsledná indukčnost cívky zvyšuje.

Z výše uvedeného můžeme vyvodit, že pro navýšení celkové indukčnosti planárního induktoru je možno [40] [42] [43]: zvýšit počet závitů, zvýšit velikost vnitřního průměru cívky nebo vytvořit vícevrstvé struktury a tím navýšit vzájemnou indukčnost mezi závity jednotlivých vrstev (Obr. 3-2:c). První dvě možnosti v důsledku zabírají více plochy na substrátu. Poslední zmíněná umožňuje vyšší stupeň integrace. Možný výpočet vícevrstvných struktur je popsán v literatuře [40].

Pro indukční přenos jsou užívány pracovní frekvence v řádech desítek kHz a jednotek MHz. Nižší frekvence jsou užívány, pro zvýšení přenosové účinnosti. Optimální frekvence silně souvisí s geometrií induktoru a hodnotou indukčnosti.



Obr. 3-3: Závislost přenosové účinnosti na vybraných parametrech [41]

Čím je induktor menší a má menší počet závitů, tím se optimální kmitočet posunuje do vyšších hodnot. Tedy nevýhodou miniaturizace v tomto případě je menší přenosová účinnost, v porovnání s většími induktory pracujícími na nižších kmitočtech. S rostoucí velikostí a počtem závitů induktoru se zvyšuje přenosová účinnost (Obr. 3-3) a napěťový zisk, protože to vede k větší vzájemné indukčnosti M mezi vysílací a přijímací cívkou. [41]

3.3 Výpočty indukčnosti

Předpokladem pro postupné nahrazování konvenčních způsobů vytváření cívek je dostatečná přesnost navrhovaného planárního induktoru, jelikož je velmi náročné dostavovat vlastnosti poté, co je již struktura natisknuta [40] [42]. Existují i online kalkulatory vypočítávající parametry induktoru dle různě modifikovaných rovnic [45].

3.3.1 Jednovrstevná struktura

Hodnotu indukčnosti planárního jednovrstvého induktoru L_{des} je možno vypočítat dle následujícího vzorce, známého jako „Greenhouse formula“ [40] [41] [42] [43] [46]:

$$L_{des} = \frac{\mu_0 N^2 D_{avg} C_1}{2} \left[\ln\left(\frac{C_2}{\rho}\right) + C_3 \rho + C_4 \rho^2 \right] \quad (1)$$

$$\rho = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (2)$$

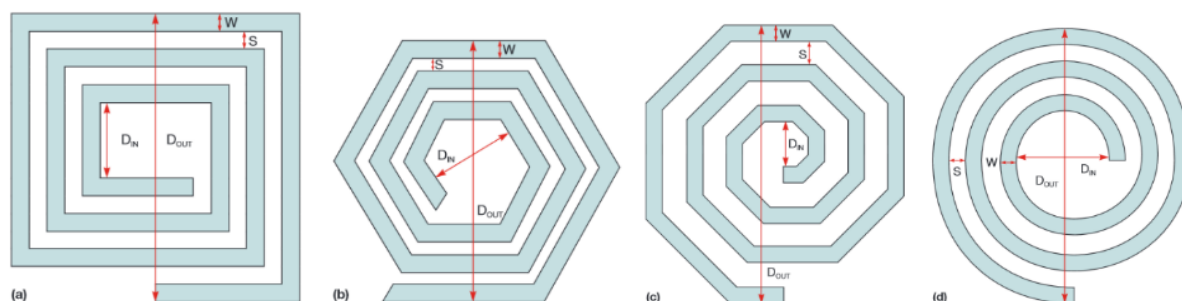
$$D_{avg} = \frac{D_{max} + D_{min}}{2} \quad (3)$$

kde: N je počet závitů,
 D_{max} a D_{min} jsou vnější/vnitřní průměr,
 D_{avg} je tzv. střední hodnota geometrického průměru,
 ρ je poměr volné plochy,
 μ_0 je permeabilita vakua ($4\pi * 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$),
 $C_1 - C_4$ jsou koeficienty dané tvarem induktoru (Tab. 1-1)

Tab. 3-1: Koeficienty dané tvarem planárního induktoru [40] [46]

Tvar	C_1	C_2	C_3	C_4
Čtvercový	1,27	2,07	0,18	0,13
Hexagonální	1,09	2,23	0	0,17
Oktagonální	1,07	2,29	0	0,19
Kruhový	1	2,46	0	0,2

Přesnost výsledku uváděné rovnice (1) klesá úměrně s rostoucími rozestupy mezi vodivými cestami. Maximální odchylka se pohybuje okolo 8% pro rozestupy třikrát větší, nežli je šířka vodivé cesty. [40] Nutno však poznamenat, že je záhodno navrhovat induktory s rozestupy mezi vodivými cestami menšími, nebo rovnými šířce vodivé cesty, jelikož větší rozestupy snižují magnetické vazby mezi závitů a zabírají větší plochu. [40] [42]



Obr. 3-4: Tvary planárního induktoru čtvercového (a), hexagonálního (b), oktagonálního (c), kruhového (d) [40]

3.3.2 Vícevrstevná struktura

Zatím neexistuje software, který by simuloval 3D strukturu a byl schopen naprosto přesně určit hodnotu výsledné indukčnosti. Pro výpočet celkové indukčnosti vícevrstevné struktury L_{TOTAL} je nutné použít rovnici vzájemné indukčnosti jednotlivých vrstev M a rovnici propojovacího faktoru K_c [40]:

$$L_{TOTAL} = L_1 + L_2 \pm 2M \quad (4)$$

$$M = 2 K_C \sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

$$K_C = \frac{N^2}{AX^3 + BX^2 + CX + D} \left[(1,67 N^2 - 5,84 N + 65) 0,64 \right] \quad (6)$$

kde: L_1, L_2 je indukčnost jednotlivých vrstev induktorů,
 M je vzájemná indukčnost mezi vrstvami,
 K_c je propojovací faktor (nabývá hodnoty 0 až 1),
 N je počet závitů,
 X je tloušťka vrstvy mezi vodivými cestami v milimetrech,

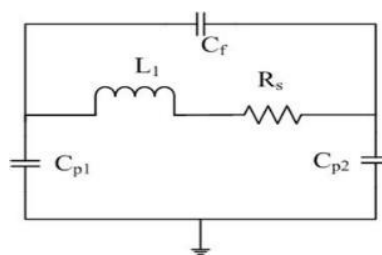
Tab. 3-2: Konstanty vícevrstevného planárního induktoru s totožným počtem závitů jednotlivých vrstev [40]

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
0,184	-0,525	1,038	1,001

Celková indukčnost L_{TOTAL} je dána součtem indukčnosti jednotlivých vrstev L_1, L_2 a vzájemné indukčnosti mezi jednotlivými vrstvami M . Vzájemná indukčnost M se k výsledné hodnotě indukčnosti dle směru elektrického proudu přičítá, či odečítá (Obr. 3-2:c). Zmíněná rovnice s dosazením daných konstant (Tab. 3-2) je platná pouze pro struktury, kde počet závitů jednotlivých vrstev je totožný.

3.4 Parazitní vlastnosti

Schéma zapojení planárního induktoru s parazitními prvky je znázorněno na Obr. 3-5. L_1 je indukčnost, R_s sériový odpor, C_f kapacita mezi vinutím, C_{p1} a C_{p2} jsou paralelní kapacity mezi vodivými cestami a substrátem. [42]



Obr. 3-5: Schéma planárního jednovrstvého induktoru s parazitními prvky [42]

Samotnou délku vodivé cesty a hodnotu stejnosměrného odporu lze vyjádřit:

$$l_C = 4n d_{in} - 4nw - (2n + 1)^2 (s + w) \quad (7)$$

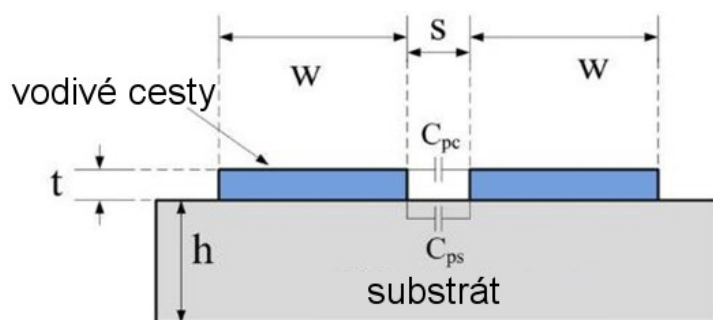
$$R_{DC} = \rho_C \frac{l_C}{wt_C} \quad ; \quad R_{DC} = R_{sq} \frac{l_C}{w} \quad (8)$$

kde: l_C je celková délka vodivé cesty
 n je počet závitů
 d_{in} je hodnota vnitřního průměru
 w je tloušťka vodivé cesty
 s jsou rozestupy mezi vodivými cestami
 R_{DC} je hodnota stejnosměrného odporu
 ρ_C je rezistivita vodivého materiálu
 R_{sq} je odpor vodivého materiálu na čtverec
 t_C je tloušťka natisknuté cesty

Parazitní kapacita je dána velikostí rozestupů mezi vodivými cestami a vlastnostmi dielektrických materiálů (Obr. 3-6). Dielektrickým materiálem je míněn vzduch, nebo svrchní izolační vrstva mezi sousedními vodivými cestami a substrát, na kterém je induktor natisknut. Celkovou parazitní paralelní kapacitu C_p planárního induktoru je možno vypočítat dle následující rovnice [42]:

$$C_p = C_{pc} + C_{ps} = (\alpha \varepsilon_{rc} + \beta \varepsilon_{rs}) \varepsilon_0 \frac{t_c}{s} l_g \quad (8)$$

kde: C_{pc} je kapacita mezi vodivými cestami svrchní vrstvou (vzduchem)
 C_{ps} je kapacita mezi vodivými cestami skrz substrát
 α je empiricky v případě vzduchu a FR4 rovna 0,9
 β je empiricky v případě vzduchu a FR4 rovna 0,1
 ε_0 je permitivita vakua
 ε_{rc} a ε_{rs} jsou relativní permitivita svrchní vrstvy a substrátu
 l_g je šířka mezery mezi cestami



Obr. 3-6: Parazitní kapacity vinutí [42]

Vlastní rezonanční frekvence induktoru (SRF) je dána vztahem [42]:

$$f_{SRF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (9)$$

V oblasti vysokých kmitočtů, v důsledku skin efektu a parazitní kapacity, parazitní sériový odpor výrazně narůstá a hodnota indukčnosti výrazně klesá v porovnání s hodnotami v oblasti nižších kmitočtů. Je tudíž žádoucí, pokud to daná aplikace dovoluje, aby induktor pracoval na nižších kmitočtech, tak aby tyto parazitní jevy měly co nejmenší vliv, aby byly zanedbatelné a aby se tedy struktura chováním přibližovala induktoru s konstantní indukčností a s konstantní hodnotou parazitního sériového odporu. [43] Vliv na jednotlivé parametry pro vyšší pracovní frekvence v řádech GHz je popsáno v literatuře [45].

4 Realizace planárního induktoru

Předmětem návrhu je tlustovrstvový induktor v řádech desítek μH s co nejnižší hodnotou parazitního sériového odporu a maximální účinností v oblasti frekvencí užívaných pro indukční přenos (desítky kHz až jednotky MHz). Cílem je zanalyzovat vztah mezi geometrickými parametry, hodnotou indukčnosti, parazitním sériovým odporem a činitelem jakosti. Dále bude posouzen vliv užitých past, substrátů a některých technologických námětů pro zdokonalení vlastností výsledné struktury.

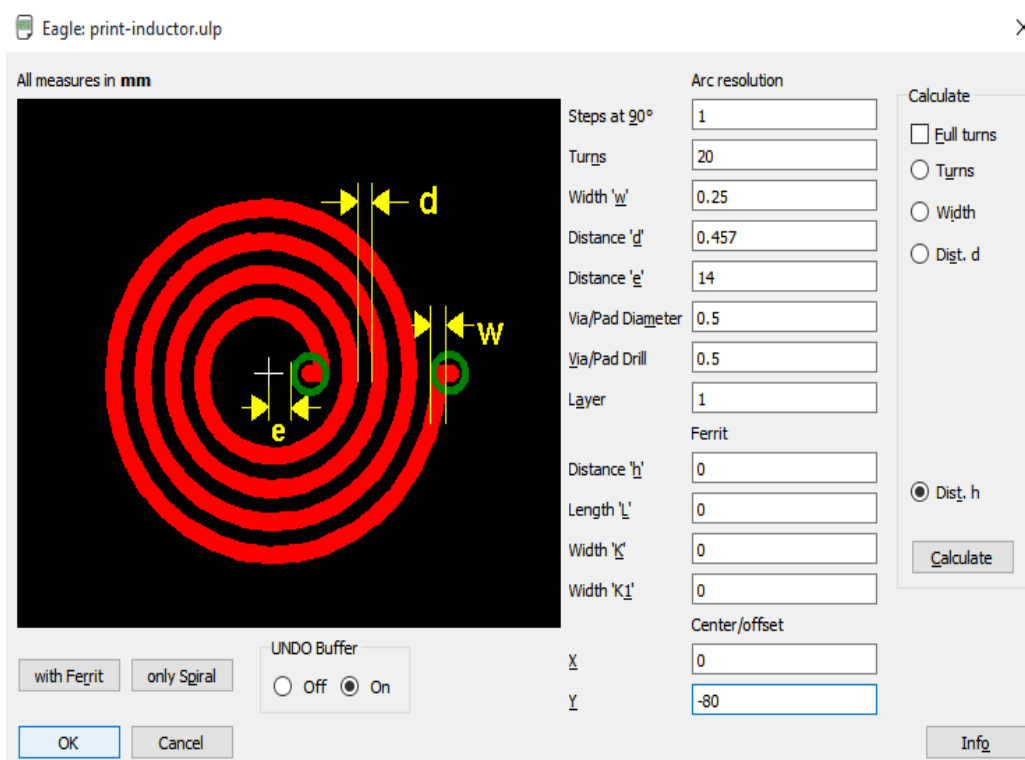
Pro depozici sítotiskem na keramický substrát je použita pasta Heraeus C 4731 a kovové síto s hodnotou 400 mesh, pro polykarbonátový substrát dvě různé pasty, ESL 1901-S a Dupont CB 115 Ag, které jsou nanášeny přes kovové síto 230 mesh.

Tab. 4-1: Vlastnosti použitých vodivých past

	Heraeus C 4731	ESL 1901-S	CB 115 Ag
Základní složka	Ag / Pt (99:1)	Ag	Ag
Viskozita (25 °C) [Pa·s]	25 – 65 (25 °C, D = 75 s ⁻¹)	160 – 180 (Brookfield RVT, 1 rpm, No. 6 spindle, 25.5 ± 0.5 °C)	15 – 40 (Brookfield RVT, Utility cup & spindle (SC4- 14/6R), 10 rpm @ 25±0.2 °C)
Solid [%]	84.0 % ± 1.5 %	-	71,0-73,0
Skladovatelnost (na suchém, chladném a temném místě v pečlivě uzavřené nádobě)	3 měsíce (5 – 25 °C)	6 měsíců (5 – 25 °C)	3 měsíce (0 – 5 °C)
Rozlišení (čára/mezera)	150 μm / 80 μm (pro 400 mesh)	250 μm / 250 μm	250 μm / 250 μm
Mesh síta	200 – 400	200 nebo 325	-
Tloušťka vypálené vrstvy [μm]	8 – 14 μm (tisk přes kovové síto 200 - 400 mesh)	25 – 35 μm	10 - 20 μm
Odpor [$\text{m}\Omega/\text{sq}$]	≤ 3.5 (pro tloušťku vrstvy 12 μm)	< 20 (měřeno na 100 x 0,25mm vodivé cestě)	25 - 40 (pro tloušťku vrstvy 25 μm)
Výpal	150 °C / 10-20 min Peak 850 °C / 10 – 12 min Celk. doba výpalu 36 - 60 min.	125 °C / 10 min	150 °C / 45 min
Pájitelnost	Dobrá $\geq 95\%$ (245 C, 5 s) (96Sn / 3.5Ag / 0.5Cu)	-	Při pozvolné změně teploty < 220 °C

4.1 Vytváření filmové předlohy v Eagle lite 7.5.0

Pro vytvoření požadovaného motivu byl hledán nekomerční software, pomocí kterého by bylo možno parametricky generovat motiv planární cívky. Vzhledem k povaze experimentální části, kdy se předpokládá, že jednotlivé parametry se budou optimalizovat, by bylo značně neefektivní tento motiv navrhovat vždy „manuálně“. Předpokládalo se, že v dostupném návrhovém prostředí Eagle neexistuje podobný nástroj pro tvorbu čtvercové planární cívky. Nicméně otevře-li uživatel ULP soubor „print-inductor“ (Obr. 4-1), má možnost navrhovat parametricky spirálovou cívku „only spiral“ nebo čtvercovou se zaoblenými rohy „with ferrit“.



Obr. 4-1: Náhled dialogového okna Eagle lite 7.5.0 pro tvorbu planárního induktoru

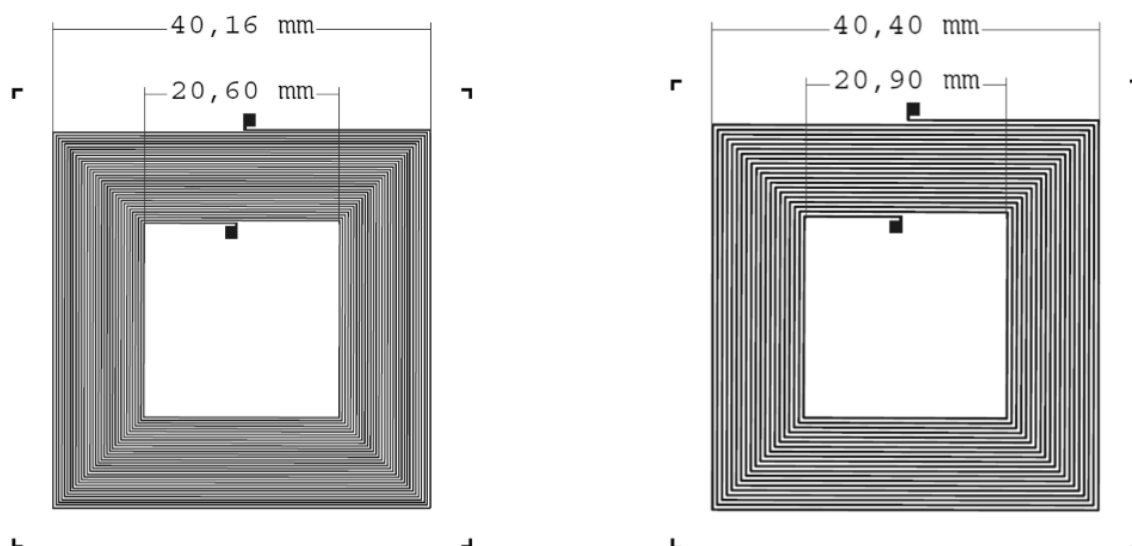
Potřebujeme-li pouze čtvercovou, stačí si uvědomit, že kolonka „steps at 90°“ udává konečný počet dílů úseček na jeden kvadrant, které dohromady tvoří zaoblený tvar spirály. Pokud tedy bude tento parametr u spirálového induktoru nastaven na hodnotu „1“, bude generován motiv čtvercového planárního induktoru pootočeného o 45°.

4.2 Motivy induktorů

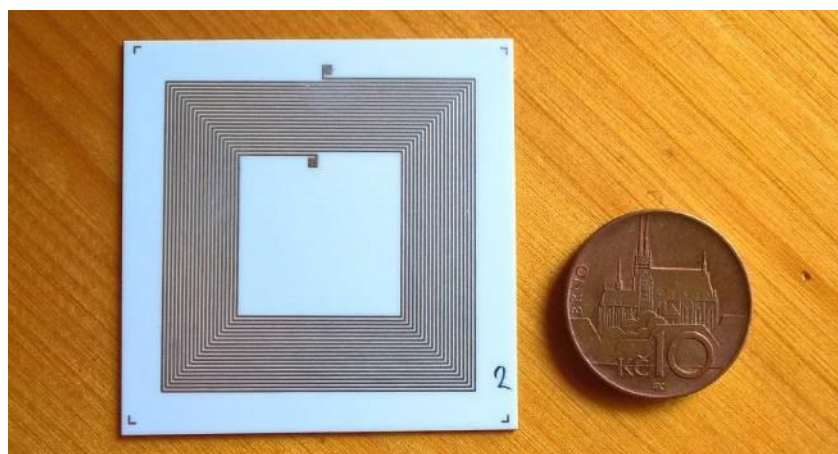
Rozměry motivu byly zvoleny s ohledem na běžné rozměry zadních krytů mobilních telefonů. Šířka vodivé cesty w a rozestupy mezi nimi s byly zvoleny dle rozlišení jednotlivých past. Parametry jsou uvedeny v Tab. 4-2. Rozměry kontaktních plošek jsou 1,27 x 1,27 mm.

Tab. 4-2: Parametry navrhovaných planárních induktorů

Motiv	D_{out} [mm]	D_{in} [mm]	Závitů	w [μ m]	s [μ m]	Síto [mesh]	L [μ H] (teor.)
1	40,16	20,60	33	150	150	400	51,02
2	40,40	20,90	20	250	250	230	19,01



Obr. 4-2: Motivy navržených planárních induktorů



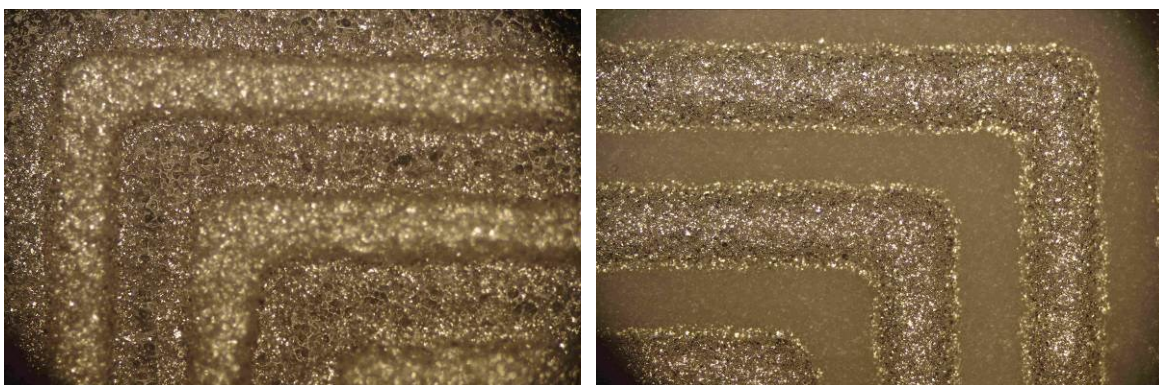
Obr. 4-3: Výsledná natisknutá struktura induktoru

4.3 Výroba síta

Síta byla odvrstvena, očištěna pro další postup. V destilované vodě se síto ponořilo tak, aby se na tkanině vytvořil souvislý povlak vody. Jako fotocitlivý rezist (pozitivní) byl užit Capillex C9. Poté, co byl rezist nanesen na síto ze strany tisku a vtlačen do tkaniny válečkem a vysušen studeným vzduchem, byl prováděn osvit po dobu 45 s. Poté bylo síto omyto a propláchnuto jemným proudem vody. Ovrstvení síta 230 mesh bylo velmi zdařilé. U ovrstvení síta 400 mesh bylo již možno sledovat nekonstantní šířku vodivé cesty. Pravděpodobně bylo způsobeno částečným podsvětlením.

4.4 Tisk pasty ESL 1901-S přes síto 230 mesh

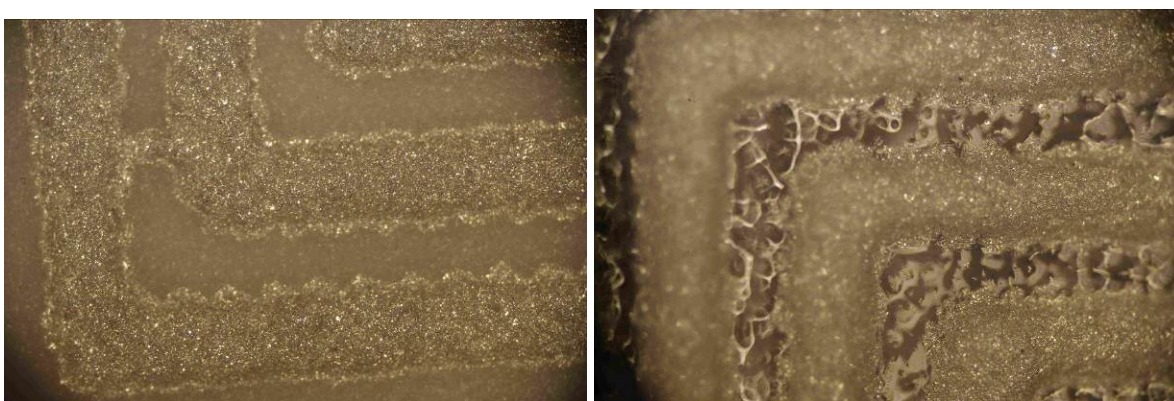
Tisk motivu č. 2 (Tab. 4-2) polymerní pastou ESL 1901-S na polykarbonátový substrát byl velmi problematický. Pasta velmi rychle vysychala (ředidlo se vypařovalo) a ucpávala síto. Následkem toho mnoho vzorků jeví známky nedotisků. Dalším znatelněji ovlivňujícím faktorem byla čistota polykarbonátového substrátu. Bylo natištěno 6 vzorků na polykarbonátový substrát a jeden na keramický substrát. Vzorky byly vytvrzovány při 140 °C po dobu 15 minut.



Obr. 4-4: Tisk pasty ESL 1901-S na keramický (vlevo) a polykarbonátový substrát (vpravo) po výpalu

4.5 Tisk pasty Dupont CB 115 Ag přes síto 230 mesh

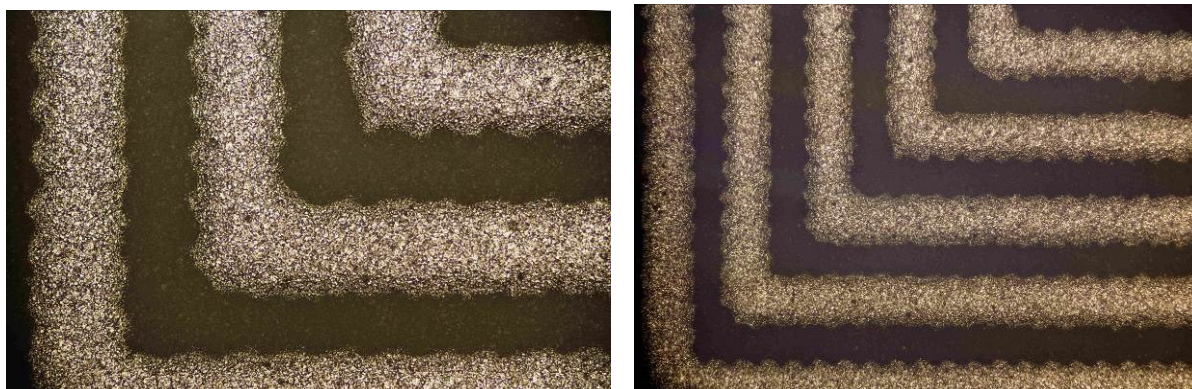
Tisk motivu č. 2 (Tab. 4-2) polymerní pastou Dupont CB 115 Ag na polykarbonátový a keramický substrát byl poměrně problematický. Podobně, jako u předchozího, pasta velmi rychle vysychala a ucpávala síto. Bylo natištěno 5 vzorků na polykarbonátový substrát a 7 vzorků na keramický substrát. Vzorky byly vytvrzovány při 150 °C po dobu 45 minut. Došlo také k deformaci (prohnutí) polykarbonátových substrátů patrně kvůli teplotnímu namáhání.



Obr. 4-5: Tisk pasty Dupont CB 115 Ag na keramický (vlevo) a polykarbonátový substrát (vpravo) po výpalu

4.6 Tisk pasty Heraeus C 4731 přes síto 230 mesh

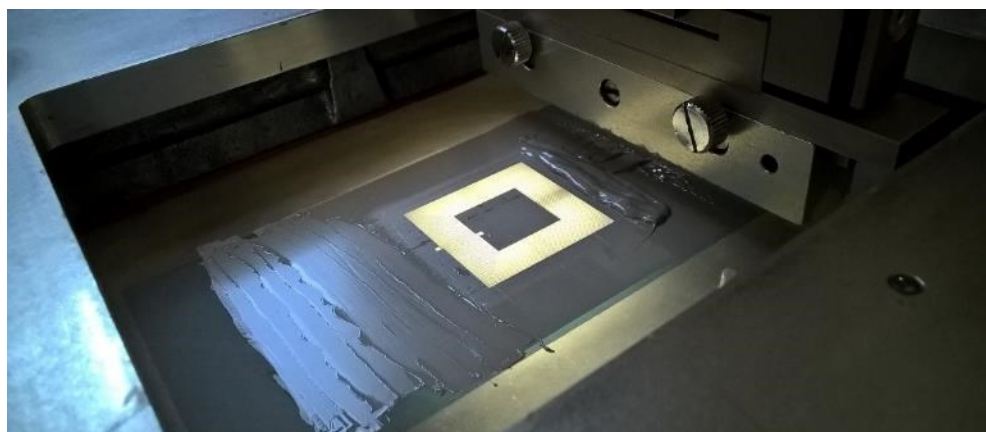
Tisk motivu č. 2 (Tab. 4-2) pasty Heraeus C 4731 přes síto 230 mesh na keramický substrát byl velmi zdařilý. Výsledné struktury nejevily známky nedotisků, přerušení či zkratů. Bylo natisknuto 6 vzorků. U jednoho byla patrná větší prachová částice v rohu motivu.



Obr. 4-6: Detaily natisknutého motivu č. 2 pastou Heraeus C 4731 po výpalu

4.7 Tisk pasty Heraeus C 4731 přes síto 400 mesh

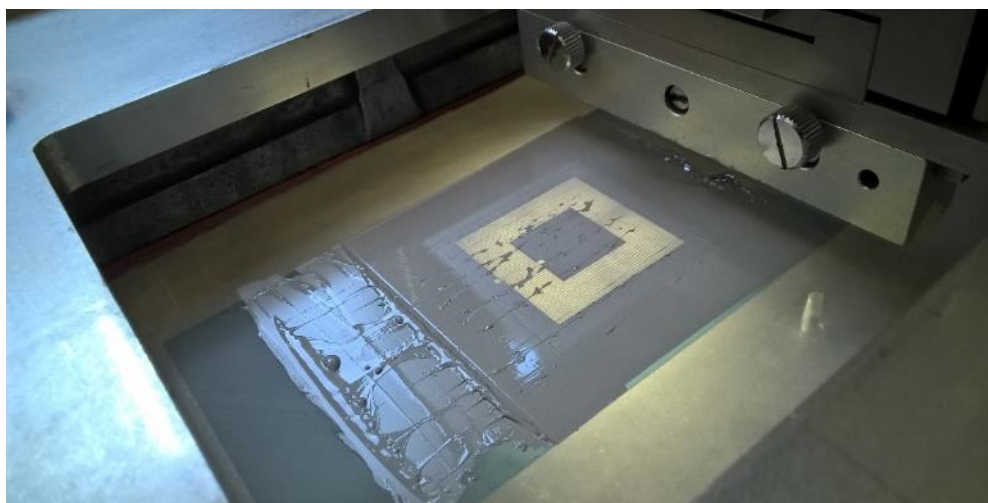
Zpočátku tisku motivu č. 1 (Tab. 4-2) pastou Heraeus C 4731 přes síto hodnoty 400 mesh na keramický substrát se ve výsledném motivu objevovaly sporadické nedotisky, přerušení vodivé cesty, vždy v jiném místě. Usoudili jsme, že tento jev je způsoben nikoliv samotným nastavením parametrů tisku, ale pravděpodobně vzduchovými bublinami v objemu pasty nebo prachovými nečistotami. Snažili jsme se tedy vznik vzduchových bublin minimalizovat šetrným rozmícháním a tím, že pastu nanesenou nad motiv před protlačěním třerkou skrz síto necháme chvíli roztéct tak, aby objem této pasty byl co nejméně členitý.



Obr. 4-7: Pasta nanesená nad motiv před protlačěním skrz síto

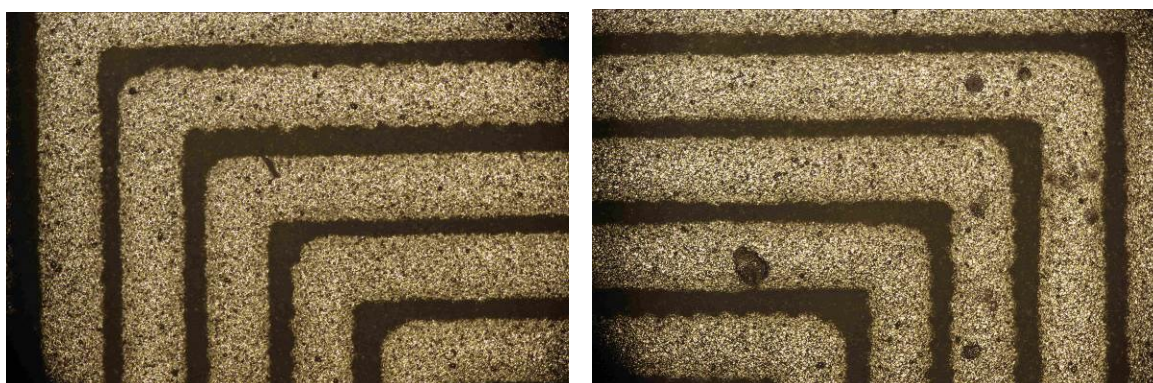
Dalším omezujícím faktorem byly prachové částice a jiné nečistoty, které způsobovaly rozmazání pasty či přerušení cesty. Cílem bylo zvýšit během tisku čistotu síta a substrátu. Síto bylo po každém jednotlivém tisku ze spodní strany čištěno utěrkou napuštěnou xylenem tak,

aby v očích síta nezůstávaly zbytky pasty z předchozího tisku a motiv byl plně průchozí. Zároveň bylo třeba vždy nechat síto oschnout (asi 2 minuty), aby se nanášená pasta nerozmazávala.



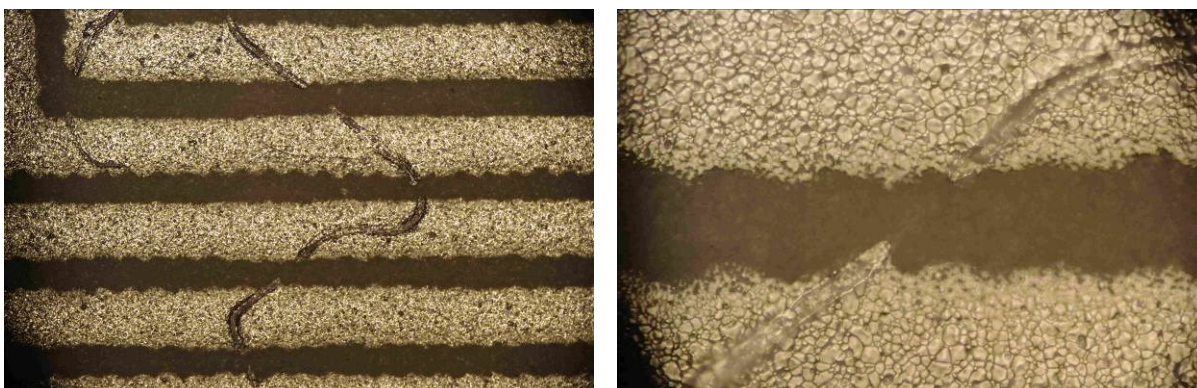
Obr. 4-8: Zbytky pasty v motivu po proběhlém tisku

Příprava substrátu s co nejvyšší možnou čistotou v dostupných podmínkách byla prováděna následovně: Substrát byl ponořen do izopropylenové lázně, poté umístěn do vany naplněné destilovanou vodou, kde byl vystaven působení ultrazvukového čištění po dobu asi 3 minut. Následně byl substrát vyjmut, osušen studeným vzduchem, případně dosušen v sušičce. Bezprostředně před tiskem bylo záhodno substrát ofouknout vzduchovou pistolí, aby byly odstraněny prachové částice a ihned poté substrát umístit pod síto. Bylo natisknuto 22 vzorků. Ty byly sušeny při 150 °C po dobu 15 minut. Pro následný výpal v in-line peci byl zvolen teplotní profil s teplotou žárového pásma 850 °C po dobu 10 minut a s celkovou dobou trvání 60 minut.



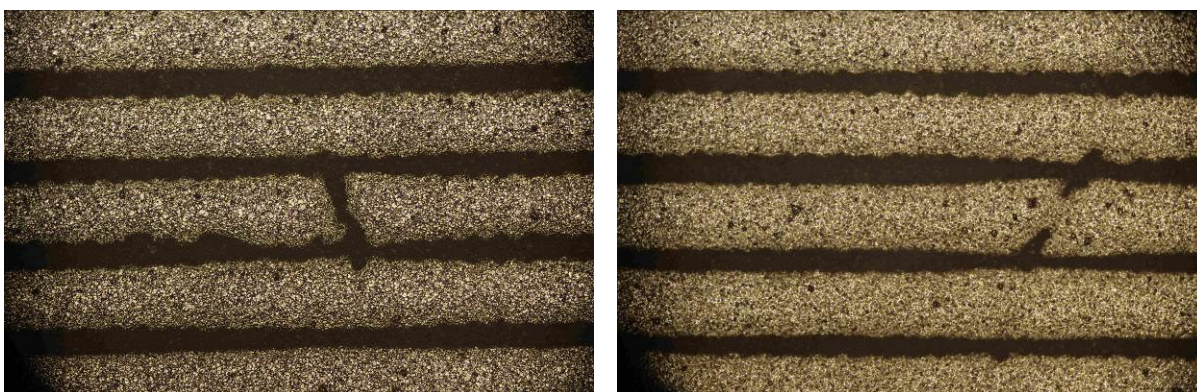
Obr. 4-9: Srovnání čistoty tisku vzorků pastou Heraeus C 4731 po výpalu

Na Obr. 4-9 je dobře patrné srovnání vzorků s rozdílným množstvím nečistot. V tomto konkrétním případě nedošlo k porušení struktury, nečistoty byly spáleny během výpalu. Na Obr. 4-10 je pak detail nečistoty – lidského vlasu po výpalu.



Obr. 4-10: Detail nečistoty po výpalu

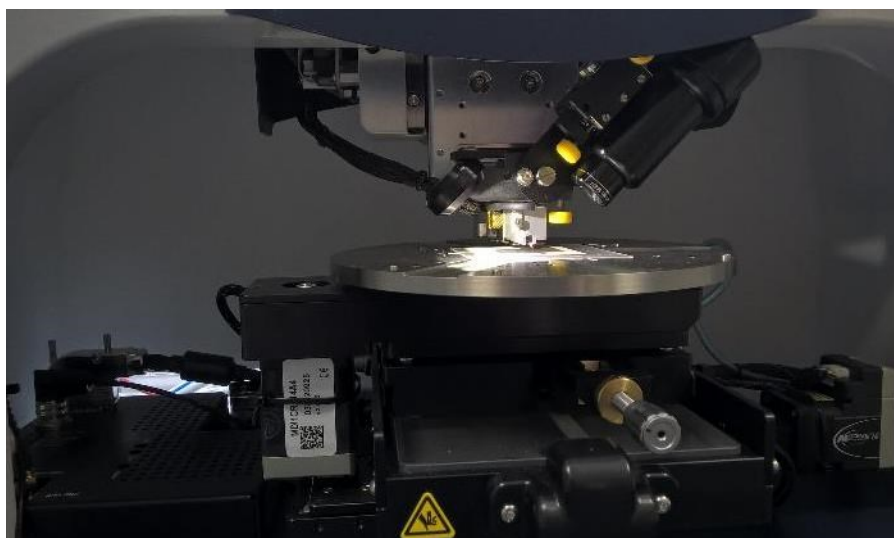
Obr. 4-11 ukazuje nejčastější problém porušení struktury. Z 22 natištěných vzorků bylo u 13 z nich přerušena vodivá cesta. U velké většiny těchto znehodnocených induktorů, byla vodivá cesta přerušena velice podobným způsobem, jako je na Obr. 4-11. Vodivé cesty jsou rovnoměrně nanášeny a k přerušení dochází vždy bodově v relativně malém úseku struktury, kde je patrný obrys nečistoty. I přes snahu o dodržování co největší čistoty během tisku byly vodivé cesty přerušeny. Pravděpodobnost výskytu nečistoty v celé délce vodivé cesty (3,9 m) je dosti vysoká. Z toho vyvozujeme patrný významný vliv nečistot ve vzduchu na výsledek tisku. Tento vliv však nejsme schopni úplně eliminovat vzhledem k realizaci tisku v ne plně sterilním prostředí laboratoře. Tím se dostáváme na hranici možností užívané technologie za daných okolností.



Obr. 4-11: Bodové přerušení vodivé cesty nečistotami

4.8 Profil výsledné struktury

Pomocí kontaktního profilometru Bruker (Obr. 4-12) byl zaznamenán profil některých vzorků, aby bylo možno blíže určit tloušťku a profil výsledné struktury. (Obr. 4-13 - Obr. 4-16)

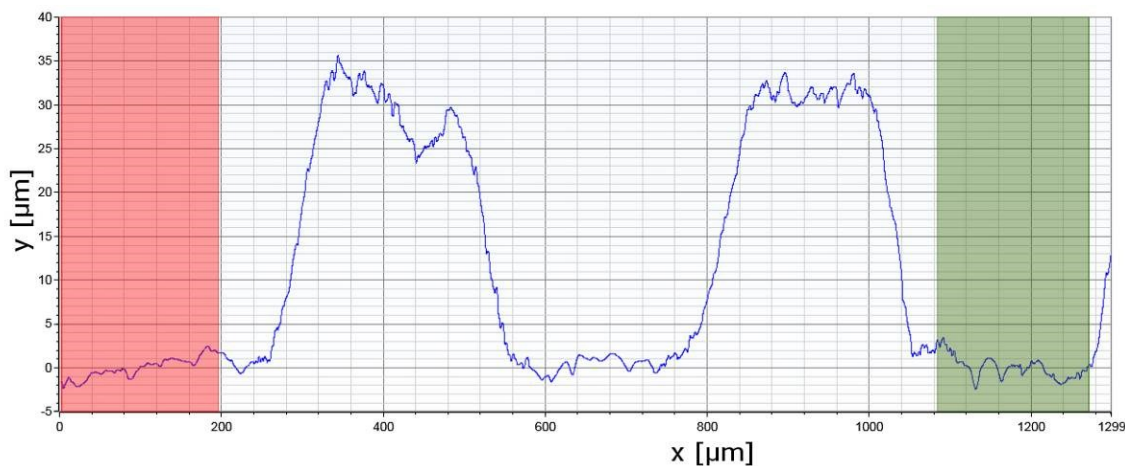


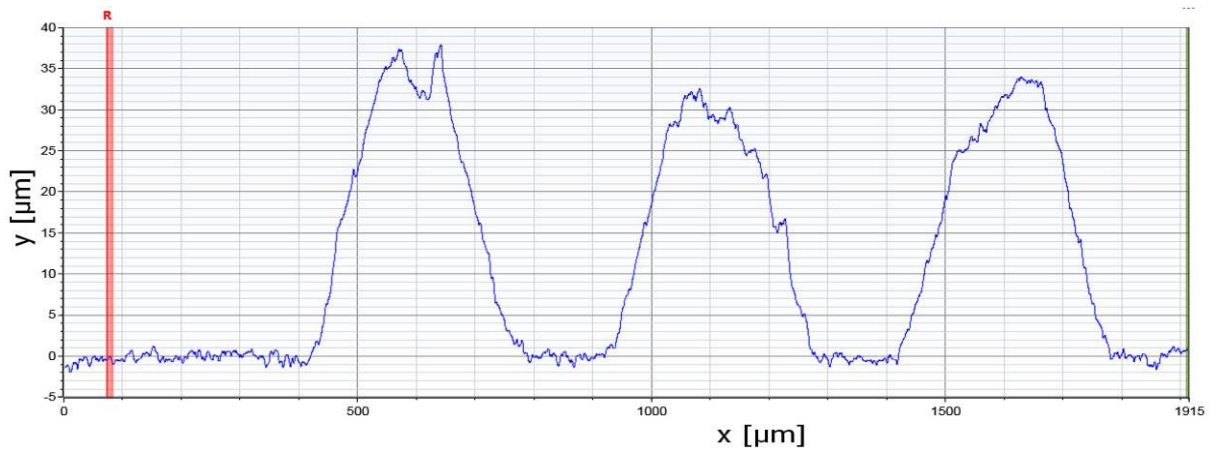
Obr. 4-12: Profilometr Bruker

V Tab. 4-3 jsou uvedeny průměrné tloušťky vodivých cest jednotlivých motivů a typů past. Bylo vypočteno jako aritmetický průměr vždy z jednoho proměřeného vzorku z 20-ti maxim pro motiv č. 2 a z 33 maxim pro motiv č. 1.

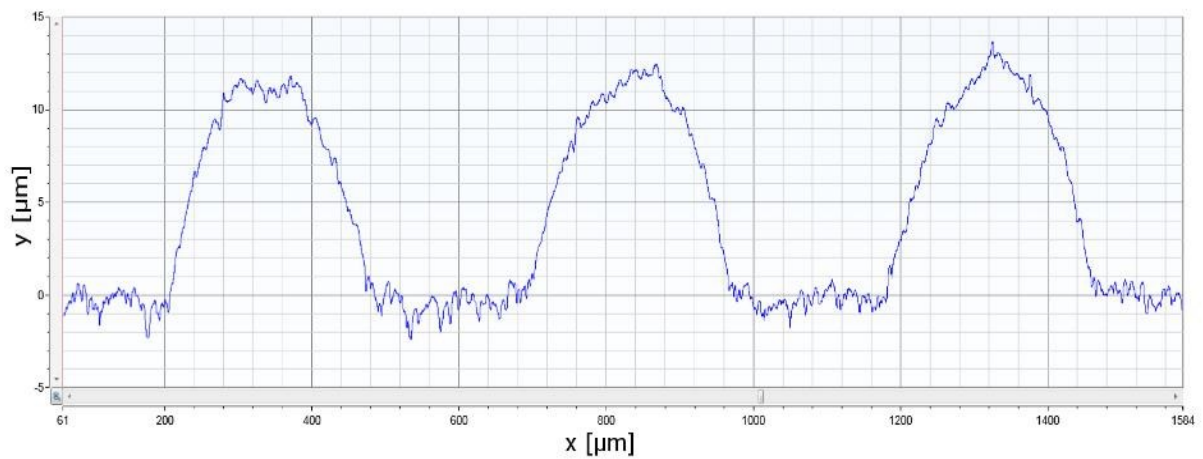
Tab. 4-3: Průměrná tloušťka natisknuté vodivé

Pasta	ESL 1901-S	Dupont CB 115	Heraeus C 4731	
Motiv č.	2	2	2	1
Tloušťka [μm]	35,05	29,25	12,6	6,43

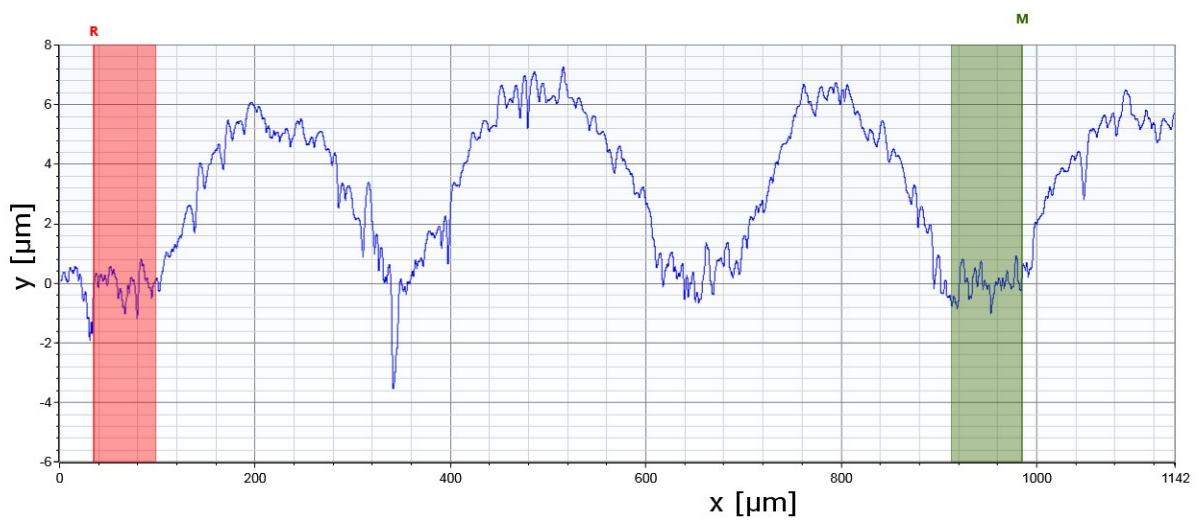




Obr. 4-14: Profil motivu č. 2 pastou Dupont CB 115 Ag



Obr. 4-15: Profil motivu č. 2 pastou Heraeus C 4731



Obr. 4-16: Profil motivu č. 1 pastou Heraeus C 4731

4.9 Stejnsměrné hodnoty odporu induktorů

Dle rovnice (7) a (8) byla vypočítána délka vodivé cesty jednotlivých motivů a následně teoretická hodnota stejnosměrného odporu (Tab. 4-4).

Tab. 4-4: Teoretické délka cesty a hodnota stejnosměrného odporu

Pasta	ESL 1901-S	Dupont CB 115 Ag	Heraeus C 4731	
Motiv č.	2	2	2	1
Délka cesty [mm]	2372	2372	2372	3935
R _{DC} [Ω] (teor.)	< 189,8	< 379,5	≤ 33,2	≤ 91,8

Hodnoty označené v Tab. 4-5 - Tab. 4-8 jako X jsou induktory s přerušenu vodivou cestou. Hodnoty zvýrazněné červeně nejsou relevantní (nastal výraznější zkrat, či naopak rozpoj).

Tab. 4-5: Stejnsměrné hodnoty odporu motivu č. 2 pastou CB 115 Ag

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6
Substrát	PC	PC	PC	PC	PC	Al ₂ O ₃
R _{DC} [Ω]	307	303	290	X	233	410
Vzorek č.	7	8	9	10	11	12
Substrát	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
R _{DC} [Ω]	70	0,2	X	X	304	X

Tab. 4-6: Stejnsměrné hodnoty odporu motivu č. 2 pastou ESL 1901-S

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7
Substrát	Al ₂ O ₃	PC	PC	PC	PC	PC	PC
R _{DC} [Ω]	155,4	X	111,2	86	X	X	6,3

Tab. 4-7: Stejnsměrné hodnoty odporu motivu č. 2 na Al₂O₃ pastou Heraeus C 4731

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6
R _{DC} [Ω]	24,5	24	24,3	26,7	24,3	23,9

Tab. 4-8: Stejnsměrné hodnoty odporu motivu č. 1 na Al₂O₃ pastou Heraeus C 4731

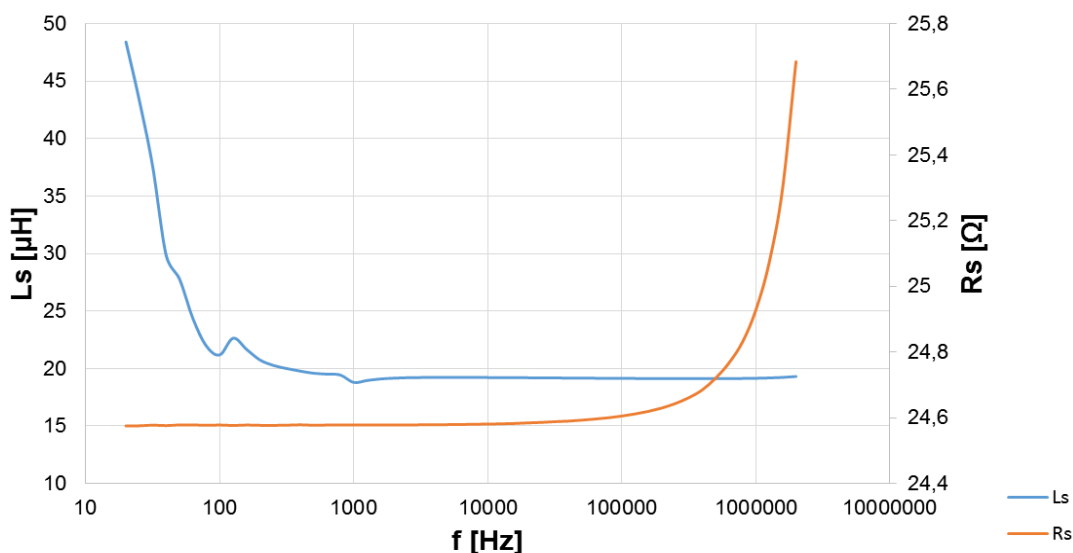
Vzorek č.	1	2	3	4	5	6
R _{DC} [Ω]	X	94,3	76,5	68,6	X	80,2
Vzorek č.	7	8	9	10	11	12
R _{DC} [Ω]	71,6	54,4	X	84,4	X	X
Vzorek č.	13	14	15	16	17	18
R _{DC} [Ω]	X	X	X	X	66,7	X
Vzorek č.	19	20	21	22		
R _{DC} [Ω]	X	X	68,7	X		

Ze změřených hodnot je patrný, jak bylo zmíněno výše, problematický tisk polymerních past (CB 115 Ag a ESL 1901-S, Tab. 4-5 a Tab. 4-6), kdy značná část natisknutých vzorků je znehodnocena přerušením cesty či zkratem jednotlivých závitů. Bylo to způsobeno rychle zasychající pastou, která ucpávala oka síta. V některých případech byl motiv při tisku rozmazán tím, že objem protlačené pasty se při odtrhu dostatečně rychle neoddělil od síta, čímž vznikaly zkraty. Tento problém je opět dán vysycháním pasty, tedy zvyšující se viskozitou. Výrazně vyšší hodnota odporu polymerních past oproti anorganickým se očekávala.

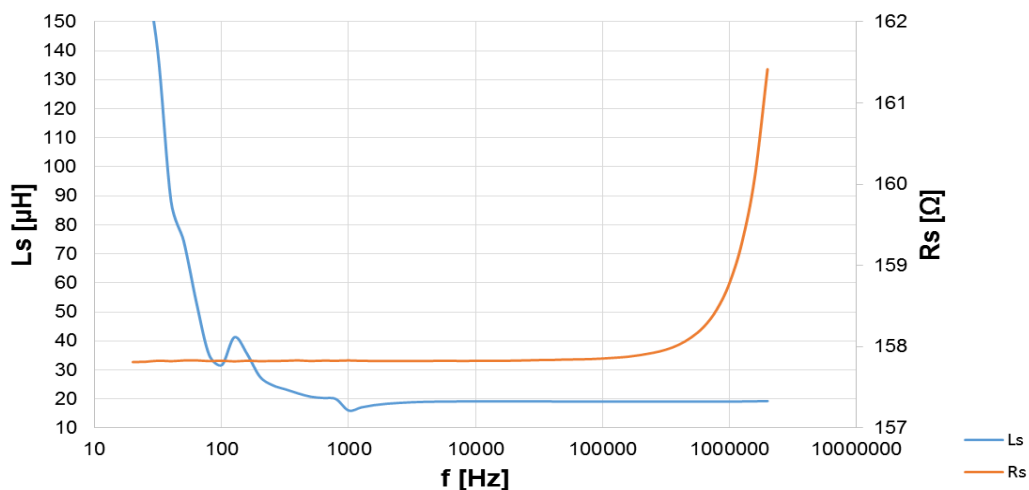
Z naměřených hodnot pasty anorganické (Heraeus C 4731, Tab. 4-7 a Tab. 4-8) je zřejmý zásadní problém u tisku velmi jemného motivu č. 1 v prostředí, které není bezprašné. I při dodržení přísných nároků na čistotu (viz výše) je pravděpodobnost minimálně jednoho přerušení z důvodu nečistoty v celé délce vodivé cesty (3935 mm) velmi vysoká (13 z 22 vzorků). Avšak tento fakt bylo možné očekávat, jelikož se již pohybujeme na hranici technologických možností tisku. A to i v případě vysoké kvality pasty. Při tisku motivu č. 2 byly všechny vzorky zdařilé. Bylo dosaženo velmi kvalitních výsledků, jelikož prachové nečistoty pro dané rozlišení již nebyly zásadní do takové míry, aby znehodnotili tisk.

4.10 Závislost indukčnosti a odporu na frekvenci

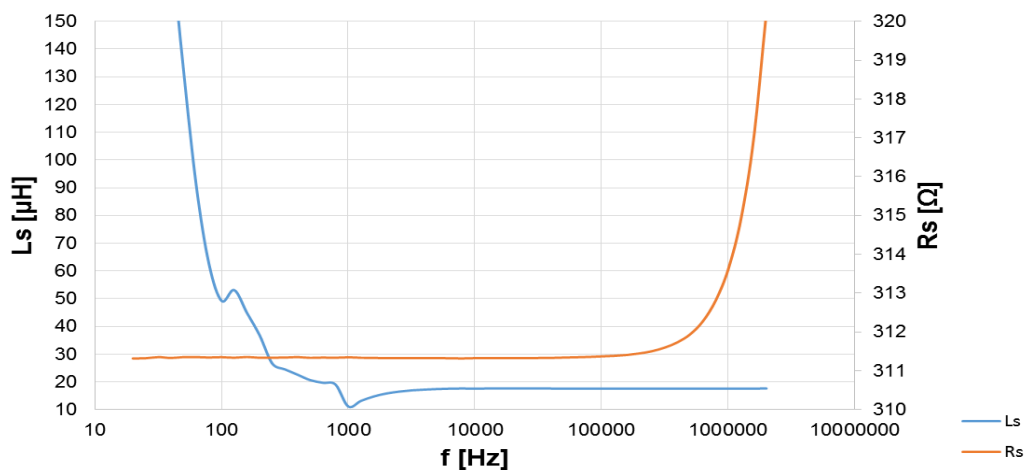
Měření frekvenční závislosti indukčnosti a odporu bylo realizováno pomocí RLC mostů přístroje Agilent E4980A v rozsahu 20 Hz – 2 MHz. Naměřené výsledky jednotlivých vzorků jsou vyneseny v grafech Obr. 4-17 až Obr. 4-20. Pro porovnání pak byly všechny výsledky vyneseny do společného grafu (Obr. 4-21).



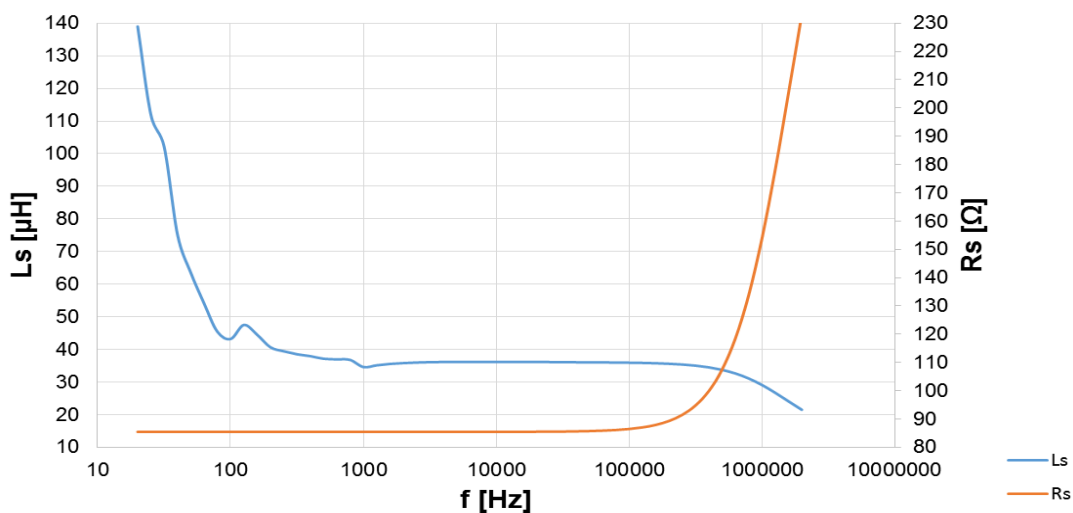
Obr. 4-17: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - motiv č. 2 pastou Heraeus C 4731 (vz. č. 3)



Obr. 4-18: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - pastou ESL 1901-S (vz. č. 1)



Obr. 4-19: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - pastou CB 115 Ag (vz. č. 1)

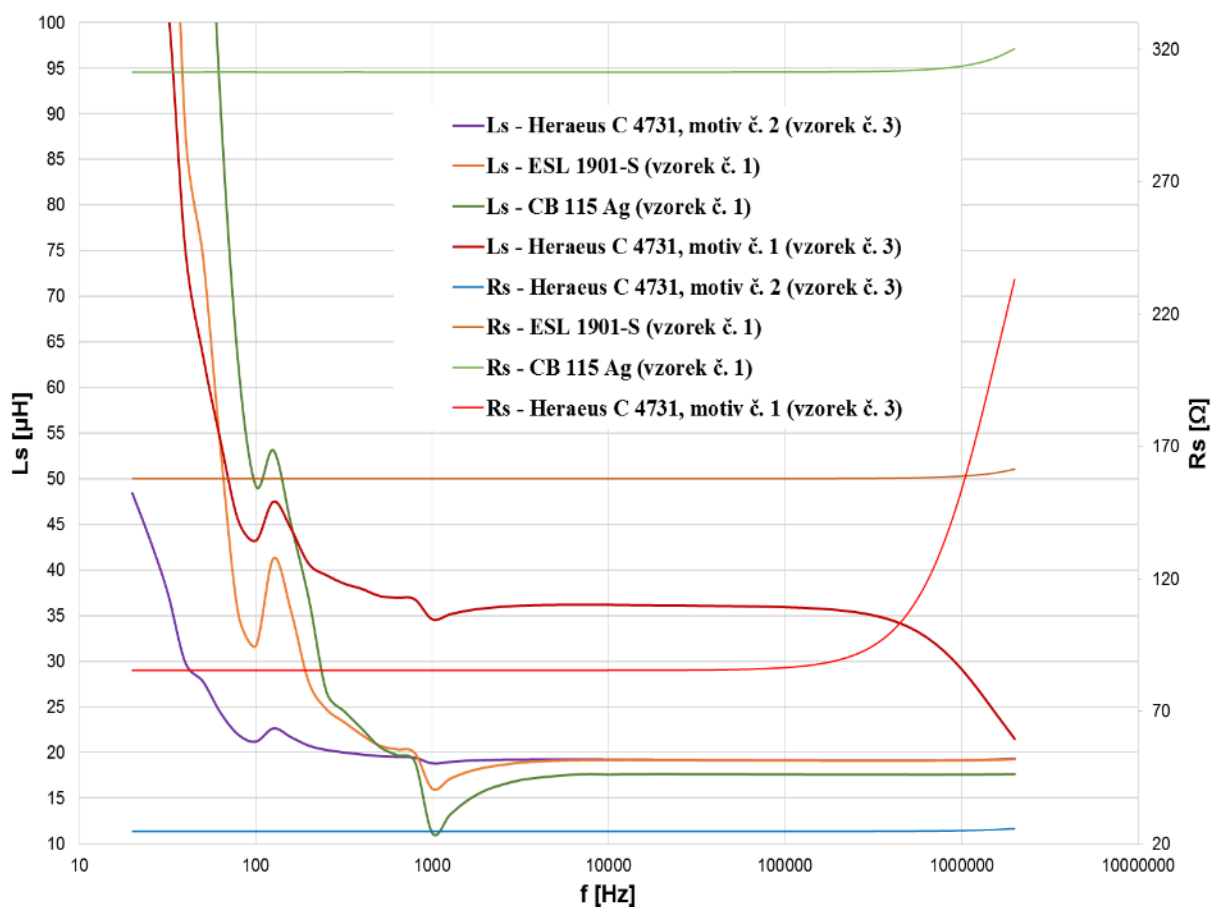


Obr. 4-20: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - motiv č. 1
pastou Heraeus C 4731 (vz. č. 3)

Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty indukčnosti L_{AC} a odporu R_{AC} v nejčastěji využívaném kmitočtovém pásmu 10 kHz až 100 kHz (Tab. 4-9).

Tab. 4-9: Průměrné hodnoty indukčnosti a odporu v rozsahu 10 – 100 kHz

Pasta	ESL 1901-S	Dupont CB 115 Ag	Heraeus C 4731	
Motiv č.	2	2	2	1
L_{AC} [μH]	19,13	17,62	19,18	36,08
L (teor.) [μH]	19,01			51,02
R_{AC} [Ω]	157,84	311,34	24,59	85,72
R_{DC} (teor.) [Ω]	< 189,8	< 379,5	$\leq 33,2$	$\leq 91,8$



Obr. 4-21: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu realizovaných vzorků

4.11 Shrnutí technologických limitů

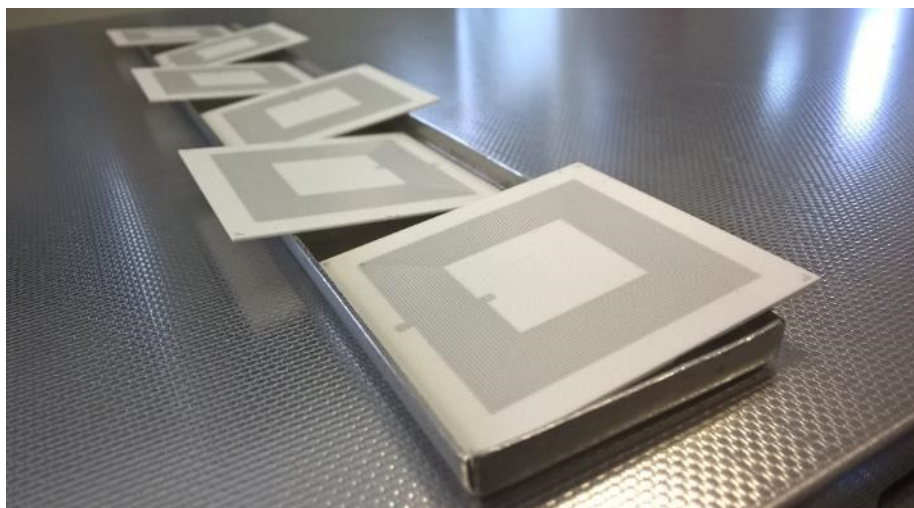
- Podsvětlování velmi jemného motivu při vyvolávání síta (znatelné výrazněji již při rozlišení čára/mezera 150 μm /150 μm). Způsobuje nekonstantní tloušťku vodivých cest, která může vést až ke zkratům slitím pasty, či naopak k zneprůchodnění ok síta a tedy k přerušení vodivé cesty.
- Vysoká pravděpodobnost bodového přerušení vodivé cesty (59 %) při tisku velmi jemného motivu čára/mezera 150 μm /150 μm a při délce vodivé cesty 3,9 m nečistotami přítomnými ve vzduchu pracoviště.
- Vyšší hodnota elektrického odporu past zejména materiálů polymerních. Výsledná účinnost bezdrátového přenosu energie je silně závislá na hodnotě parazitního odporu induktoru. Tu je třeba dále snižovat a hledat nové materiály splňující požadavky aplikace, případně adekvátně upravit návrh geometrických parametrů tak, aby bylo přijatelného odporu docíleno. Nutno poznamenat, že pasta Heraeus C 4731 se osvědčila jako velmi vhodná pro jemný tisk s důrazem na nízkou hodnotu odporu.



Obr. 4-22: Vzorčky před výpalem v in-line peci

4.12 Technologické náměty

- Navýšením tloušťky natisknuté pasty lze snížit parazitní sériový odpor. Toho lze dosáhnout použitím síta s větším průměrem tkaniny nebo vícenásobným tiskem na již nanesenou a vysušenou vrstvu pasty, případně ponorem vytvořené struktury do adekvátní cínové lázně.
- Vytvoření vícevrstevného induktoru umožňuje miniaturizaci či volbu tvaru výsledné struktury při zachování požadované indukčnosti. Toho se dá značně využít v aplikacích, kde plocha je limitujícím faktorem nebo je nutno přizpůsobit tvar struktury konkrétní aplikaci.
- Přidáním feritového materiálu k induktoru lze rovněž navýšit hodnotu indukčnosti. Samotný feritový materiál pokrytý izolační dielektrickou vrstvou by mohl sloužit jako substrát, na který lze tisknout pastu.



Obr. 4-23: Výsledné natisknuté struktury induktorů

Závěr

V teoretické části práce jsme se seznámili se základní podstatou tlustovrstvové technologie. Byla zdůrazněna důležitost výběru adekvátních materiálů pro konkrétní aplikace, ať už se jedná o složení past či substrátu. Za zmínku stojí rozvíjející se spektrum resinátových past, které jsou oproti klasickým cermetovým význačně srovnatelnou tloušťkou vypálené vrstvy s tenkovrstvovou technologií. Konkrétní příklady nekonvenčních aplikací dokazují tendenci postupného nahrazování subtraktivních technologií technologiemi aditivními. Při bližším zkoumání je naprosto zřejmá aspirace tlustovrstvové technologie na přední místo technologií užívaných pro tvorbu elektronických struktur. Při optimalizovaném návrhu se vyznačuje mimo jiné poměrně jednoduchým levným nevakuovým způsobem výroby, příznivou spolehlivostí a životností, v neposlední řadě pak značnou možností integrace. Velké množství materiálů užívaných pro tlustovrstvovou technologii je charakteristické efektivním rozvodem tepla, dobrou stabilitou, nízkými dielektrickými ztrátami, tepelnou, mechanickou, chemickou a klimatickou odolností, možností většího výkonového zatížení.

V experimentální části práce byl realizován návrh planárních induktorů pomocí tlustovrstvové technologie se zaměřením na vysokou rozlišovací schopnost. Byly srovnány užité materiály anorganické a polymerní. Práce poukazuje na dosud plně neobjevenou a neprozkoumanou oblast, která otevírá nové perspektivy pro vytváření planárních induktorů tlustovrstvovou technologií, což může vést k zdokonalování dobíjecích cívek či realizaci planárních transformátorů. Možným směrem zkoumání je tisk motivů pastou s vysokou vodivostí a vysokou rozlišovací schopností, což umožňuje navyšovat hustotu závitů. Je nutno však technologickými náměty dosáhnout snížení parazitního odporu. Dalším směrem je zvětšení šířky vodivé cesty pro docílení minimální hodnoty parazitního odporu. Zároveň se nabízí možnost tvořit vícevrstevné struktury, kde lze předpokládat dosažení hodnot indukčnosti srovnatelných s předchozím uvedeným způsobem přístupu.

Seznam užitých zdrojů

- [1] *Couches épais* [online]. École polytechnique fédérale de Lausanne, ©2015 [cit. 2015-11-03]. Dostupné z: <http://lpm.epfl.ch/ce>
- [2] SZENDIUCH, Ivan a kolektiv. *Technologie elektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTIUM, ©2002. ISBN 80-214-2072-3. [cit. 2015-11-06]
- [3] SOMER, Jakub. *Využití tlustých vrstev v moderní elektronice*. Brno: VUT FEKT. 2013. [cit. 2015-11-06]. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc
- [4] HERAEUS. *Products and Applications* [online]. ©2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/en/products_and_applications/products_and_applications.aspx
- [5] KING, Christopher. *Electroluminescent displays* [online]. 2009. Planar Systems, Inc. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://www.thomasnet.com/pdf.php?prid=101318>
- [6] *Electroluminescent Lamps and Displays* [online]. ©2013 [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/electroluminescent.html>
- [7] *IFire's TDEL technology page* [online]. ©2009. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.ifire.com/>
- [8] HERAEUS. *Celcion® Pastes on Aluminum* [online]. ©2015. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.heraeus-celcion.com/en/home/home.aspx>
- [9] LAFOND, Anita. *Optimize High-Power LEDs with Heraeus IAMS Thick-Film Technology* [online]. 2011 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.ledinside.com/knowledge/2011/3/heraeus_20110324
- [10] *Tlusté vrstvy – tisk, vytvrzení, měření* [online]. ČVUT, 2011 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustrsvy.pdf>
- [11] *Thick Film Heaters* [online]. Ferro Techniek BV, ©2015 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: http://www.ferrotechniek.com/thick_film_heaters/technology.aspx
- [12] *Thick film elements* [online]. Heatrod Elements, ©2012 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.heatrod.com/product/thick-film-elements/>
- [13] *Innovative Heating Technologies for Next Generation Tools* [online]. Watlow, ©2015 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.watlow.com/semi/semicon2013.cfm>
- [14] *Thick Film Metal Core Heating Elements* [online]. Ego [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.egoproducts.com/en/products/appliance-heating/thick-film-technology/>

- [15] D. Jurków, T. Maeder, A. Dąbrowski, M. Santo Zarnik and D. Belavič et al. *Overview on low temperature co-fired ceramic sensors*, in *Sensors and Actuators A*, vol. 233, p. 125-146, 2015
- [16] HERAEUS. *Pastes for Fuel Cells* [online]. ©2015 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/en/products_and_applications/pastes_for_fuel_cells/pastes_for_fuel_cells.aspx
- [17] FEINGOLD, PALANISAMY, TAKARABE, TOPKA a WEBB. *Manufacture of LSM and GDC Thick Film Pastes for SOFC s in ISO 9001 Environment* [online]. 2007 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/publications/SOFC-X2007.pdf>
- [18] *Solid Oxide Fuel Cells* [online]. Fuel Cell Energy, ©2013 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.fuelcellenergy.com/advanced-technologies/solid-oxide-fuel-cells/>
- [19] *Passivated Emitter Rear Cell technology improves the capture of light and optimizes cell performance* [online]. REC - Energizing Life Together, 2014 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.recgroup.com/Documents/Downloadcenter/Solar%20product%20downloads/Solar%20Whitepapers/Whitepaper%20PERC.pdf>
- [20] *Solamet® for PERC* [online]. DuPont, ©2015 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/photovoltaic-metallization-pastes/products>
- [21] BUZBY a DOBIE. *Fine Line Screen Printing of Thick Film Pastes on Silicon Solar Cells* [online]. Heraeus, ©2015 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: http://heraeus-pvsilverpaste.com/media/webmedia_local/media/whitepapers/finelinescreenprintingofthickfilmpastesonsiliconsolarcells.pdf
- [22] Qing-wei LUO, Ying-nan LI, Feng-hua LI, Zhan-guo FAN. *Preparation of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting thick film on Ni-W tapes via electrophoretic deposition*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2014. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632614630363>
- [23] KNOTH, HUHNE, OSWALD, MOLINA, EIBL, SCHULTZ, HOLZAPFEL. *Homoepitaxial growth of MOD-YBCO thick films on evaporated and MOD templates*. *Physica C* [online]. 2011. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921453411001857>

- [24] *Thick Film Microelectronic Inks / Thick Film Pastes By Koartan* [online]. Inseto, ©2013 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.inseto.co.uk/products/koartan-thickfilmmaterials.htm>
- [25] *Printed Electronics Product Overview* [online]. DuPont, ©2012 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical-materials/assets/datasheets/prodlib/PrintedElectronics_ProductOverview.pdf
- [26] TOMAŠÁK, L. Resinátové pasty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Řezníček.
- [27] *Microcircuit Materials* [online]. DuPont, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/uses-and-applications/microcircuit-materials.html>
- [28] *ESL ElectroScience Products* [online]. ESL ElectroScience, ©2012 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/products.html>
- [29] *Smart Microsystems* [online]. Fraunhofer ikts, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research_fields/smartmicrosystems.html
- [30] *Ercon products* [online]. Ercon Inc., ©2012 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.erconinc.com/products.htm>
- [31] *Overview of the range of our Products* [online]. Gwent Group, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_paste_overview.html
- [32] *Thick Film Microelectronic Inks / Thick Film Pastes By Koartan* [online]. Inseto, ©2013 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.inseto.co.uk/products/koartan-thickfilmmaterials.htm>
- [33] *Thick Film Paste Product Lineup* [online]. Sumitomo Metal Mining co., ltd., ©2014 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://www.smm.co.jp/E/business/material/product/thick_film/lineup.html
- [34] *Thick Film Pastes and Precious Metal Powders* [online]. TANAKA HOLDINGS Co., Ltd, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://pro.tanaka.co.jp/en/products/group_a/a_3.html
- [35] *Electronic Paste (Thick Film)* [online]. NORITAKE CO.,LIMITED, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://www.noritake.co.jp/eng/products/ceramic/paste/thick_film/

- [36] *Printed Electronics* [online]. Parlex USA LLC. (Johnson Electric), ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.parlex.com/products/ptf.php>
- [37] *Printed Electronics* [online]. Multek Flexible Circuit, Inc., ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.multek.com/Technology/Pages/PrintedElectronics.aspx>
- [38] *Johnson Matthey Advanced Glass Technologies* [online]. Johnson Matthey, ©2013 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.glassmatthey.com/home>
- [39] *Asahi products* [online]. Asahi Chemical Research Laboratory Co., Ltd, ©2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.asahi-kagaku.co.jp/english/english.php>
- [40] ZHAO Jonsenser. *A new calculation for designing multilayer planar spiral inductors* [online]. 2010 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://m.eet.com/media/1154363/25510-a_new_calculation_for_designing_multilayer_planar_spiral_inductors_pdf.pdf
- [41] OLIVO, CARRARA, DE MICHELI. *A Study of Multi-Layer Spiral Inductors for Remote Powering of Implantable Sensors* [online]. 2013 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://si2.epfl.ch/~demichel/publications/archive/2013/06403580.pdf>
- [42] Ashraf B. Islam, Syed K. Islam, Fahmida S. Tulip. *Design and Optimization of Printed Circuit Board Inductors for Wireless Power Transfer System* [online]. ©2013 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://file.scirp.org/Html/15-7600229_29914.htm#Figure%203
- [43] Ostfeld, A. E. ET AL. *Screen printed passive components for flexible power electronics* [online]. Scientific Reports. 2015 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep15959>
- [44] *Single layer Planar spiral coil inductor calculator* [online]. ©2010 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.circuits.dk/calculator_planar_coil_inductor.htm
- [45] Jan Van Hese. *Accurate Modeling of Spiral Inductors on Silicon for Wireless RFIC Designs* [online]. 2001 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275810
- [46] Mohan, S. S., del Mar Hershenson, M., Boyd, S. P. & Lee, T. H. *Simple accurate expressions for planar spiral inductances*. [online]. 1999 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbm9kZG1jaW50b3NoMnByb2plY3RzfGd4Ojc3NDU4OTk4MmJmJmI0YmE>

Seznam užitých zkratk

Al_2O_3	korundová keramika
AlN	aluminium-nitridová keramika
BaTiO ₃	titaničitan barnatý
$C_1 - C_4$	koeficienty dané tvarem induktoru
C_f	kapacita mezi vinutím
C_{p1} a C_{p2}	paralelní kapacity mezi vodivými cestami a substrátem
C_{pc}	kapacita mezi vodivými cestami svrchní vrstvou (vzduchem)
C_{ps}	kapacita mezi vodivými cestami skrz substrát
D_{avg}	average diameter, střední hodnota geometrického průměru
D_{in}	inner diameter, hodnota vnitřního průměru induktoru
D_{max}	hodnota vnějšího průměru induktoru
D_{min}	hodnota vnitřního průměru induktoru
D_{out}	outer diameter, hodnota vnějšího průměru induktoru
DPS	desky plošných spojů
E-Fast	Electronic Full Area Sensor Technology, typ technologie užívané v topných elementech
f_{SRF}	vlastní rezonanční kmitočet
IAMS	Insulated Aluminum Material Systems, technologie tisku na hliníkový substrát
K_c	propojovací faktor vrstev planárního induktoru
L	indukčnost
l_c	celková délka vodivé cesty
LCC	La _{0.8} Ca _{0.2} CrO ₃
LED	Light Emitting Diode, dioda emitující světlo
l_g	šířka mezery mezi cestami
L_s	sériová indukčnost
LSCC	La _{0.9} Sr _{0.1} Co _{0.1} Cr _{0.9} O ₃
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramic, keramika s nízkou teplotou výpalu
M+/ M-	positive/negative mutual coupling, pozitivní/negativní vzájemná indukčnost závitů
MCPCB	Metal-Core Printed Circuit Board, materiál s kovovým jádrem
N/n	number of turns, počet závitů
PC	polykarbonát
PERC	Passivated Emitter Rear Cell, pasivovaný emitor spodní strany solárního článku

PID	potential induced degradation, jev degradace křemíku v solárních panelech
Q	činitel jakosti
R	elektrický odpor
R_{dc}	hodnota stejnosměrného odporu
R_s	sériový odpor
R_{sq}	odpor materiálu na čtverec
RuO_2	oxid rutheničitý
s	spacing, rozestupy vodivých cest
SOFC	Solide Oxide Fuel Cells, palivové články s tuhými oxidy
SRF	self resonant frequency, vlastní rezonanční kmitočet
t_c	tloušťka natisknuté cesty
TDEL	Thick-film Dielectric Electroluminescent Technology, tlustovrstvová technologie elektroluminescenčních displejů
TFEL	Thin-film Electroluminescent Displays, tenkovrstvová technologie elektroluminescenčních displejů
TLV	tlustovrstvová
TNV	tenkovrstvová
w	width, šířka vodivé cesty
X	tloušťka vrstvy mezi vodivými cestami
α	empiricky v případě vzduchu a FR4 rovna 0,9
β	empiricky v případě vzduchu a FR4 rovna 0,1
ϵ_0	permitivita vakua
ϵ_r	relativní permitivita
μ_0	permeabilita vakua
ρ	poměr volné plochy v geometrii planárního induktoru
ρ	rezistivita neboli měrný elektrický odpor
ρ_c	rezistivita vodivého materiálu

Seznam obrázků

Obr. 1-1: Princip sítotisku [10].....	- 2 -
Obr. 2-1: Nákres TDEL struktury [5].....	- 7 -
Obr. 2-2: IAMS a MCPCB na hliníkovém substrátu [8].....	- 8 -
Obr. 2-3: LED systém realizovaný pomocí IAMS [9]	- 8 -
Obr. 2-4: Nákres piezoelektrického senzoru (či reproduktoru) [15]	- 9 -
Obr. 2-5: Nákres tlakového senzoru na kapacitním principu [15]	- 10 -
Obr. 2-6: Klasický TLV topný systém a systém E-Fast [11]	- 10 -
Obr. 2-7: TLV topná tělesa na Al ₂ O ₃ , AlN [13] a válcovém substrátu z oceli [14].....	- 11 -
Obr. 2-8: Průřez SOFC strukturou [18]	- 12 -
Obr. 2-9: SOFC [16].....	- 13 -
Obr. 2-10: Průřez strukturou PERC [20]	- 14 -
Obr. 2-11: Srovnání klasických a PERC článků [19].....	- 14 -
Obr. 3-1: Schematický popis indukčního spojení [41].....	- 16 -
Obr. 3-2: a) geometrické parametry čtvercového induktoru b) pozitivní (M+) a negativní (M-) vzájemné indukčnosti závitů c) soustředný tok elektrického proudu ve vícevrstvé struktuře [41] [42]	- 17 -
Obr. 3-3: Závislost přenosové účinnosti na vybraných parametrech [41].....	- 18 -
Obr. 3-4: Tvary planárního induktru čtvercového (a), hexagonálního (b), oktagonálního (c), kruhového (d) [40]	- 19 -
Obr. 3-5: Schéma planárního jednovrstvého induktoru s parazitními prvky [42].....	- 20 -
Obr. 3-6: Parazitní kapacity vinutí [42].....	- 22 -
Obr. 4-1: Náhled dialogového okna Eagle lite 7.5.0 pro tvorbu planárního induktoru.....	- 24 -
Obr. 4-2: Motivy navržených planárních induktorů.....	- 25 -
Obr. 4-3: Výsledná natisknutá struktura induktoru	- 25 -
Obr. 4-4: Tisk pasty ESL 1901-S na keramický (vlevo) a polykarbonátový substrát (vpravo) po výpalu.....	- 26 -
Obr. 4-5: Tisk pasty Dupont CB 115 Ag na keramický (vlevo) a polykarbonátový substrát (vpravo) po výpalu.....	- 26 -

Obr. 4-6: Detaily natisknutého motivu č. 2 pastou Heraeus C 4731 po výpalu	- 27 -
Obr. 4-7: Pasta nanesená nad motiv před protlačení skrz síto.....	- 27 -
Obr. 4-8: Zbytky pasty v motivu po proběhlém tisku	- 28 -
Obr. 4-9: Srovnání čistoty tisku vzorků pastou Heraeus C 4731 po výpalu	- 28 -
Obr. 4-10: Detail nečistoty po výpalu	- 29 -
Obr. 4-11: Bodové přerušení vodivé cesty nečistotami.....	- 29 -
Obr. 4-12: Profilometr Bruker	- 30 -
Obr. 4-13: Profil motivu č. 2 pastou ESL 1901-S	- 30 -
Obr. 4-14: Profil motivu č. 2 pastou Dupont CB 115 Ag.....	- 31 -
Obr. 4-15: Profil motivu č. 2 pastou Heraeus C 4731	- 31 -
Obr. 4-16: Profil motivu č. 1 pastou Heraeus C 4731	- 31 -
Obr. 4-17: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - motiv č. 2 pastou Heraeus C 4731 (vz. č. 3).....	- 33 -
Obr. 4-18: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - pastou ESL 1901-S (vz. č. 1)	- 34 -
Obr. 4-19: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - pastou CB 115 Ag (vz. č. 1)	- 34 -
Obr. 4-20: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu - motiv č. 1 pastou Heraeus C 4731 (vz. č. 3).....	- 34 -
Obr. 4-21: Frekvenční závislost sériové indukčnosti a odporu realizovaných vzorků.....	- 35 -
Obr. 4-22: Vzorky před výpalem v in-line peci.....	- 36 -
Obr. 4-23: Výsledné natisknuté struktury induktorů	- 37 -

Seznam tabulek

Tab. 1-1: Přehled základních složek TLV past [24] [25]	- 4 -
Tab. 3-1: Koeficienty dané tvarem planárního induktoru [40] [46]	- 19 -
Tab. 3-2: Konstanty vícevrstevného planárního induktoru s totožným počtem závitů jednotlivých vrstev [40]	- 20 -
Tab. 4-1: Vlastnosti použitých vodivých past	- 23 -
Tab. 4-2: Parametry navrhovaných planárních induktorů	- 25 -
Tab. 4-3: Průměrná tloušťka natisknuté vodivé	- 30 -
Tab. 4-4: Teoretické délka cesty a hodnota stejnosměrného odporu	- 32 -
Tab. 4-5: Stejnosměrné hodnoty odporu motivu č. 2 pastou CB 115 Ag	- 32 -
Tab. 4-6: Stejnosměrné hodnoty odporu motivu č. 2 pastou ESL 1901-S	- 32 -
Tab. 4-7: Stejnosměrné hodnoty odporu motivu č. 2 na Al ₂ O ₃ pastou Heraeus C 4731.....	- 32 -
Tab. 4-8: Stejnosměrné hodnoty odporu motivu č. 1 na Al ₂ O ₃ pastou Heraeus C 4731.....	- 32 -
Tab. 4-9: Průměrné hodnoty indukčnosti a odporu v rozsahu 10 – 100 kHz	- 35 -