

# POSUDEK Oponenta Disertační práce

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Hlína

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Substráty pro výkonovou elektroniku  
realizované technologií tlustých vrstev

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Zdeňka Kolská, Ph.D.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Předložená disertační práce zpracovává velmi aktuální téma, zabývá se problematikou výkonových substrátů připravených technologií tlustých vrstev (technologií TPC).

První část práce je věnována popisu konvenčních výkonových substrátů, keramických materiálů používané pro jejich výrobu a výkonových substrátů realizovaných technologií TPC. Experimentální část práce je zaměřena na pokročilé výkonové substráty realizované technologií TPC. Jsou zde popsány provedené experimenty a dosažené výsledky v oblasti vícevrstevných TPC struktur, TPC vrstev na keramických podložkách z nitridu hlinitého a odporových sítí kompatibilních s technologií TPC.

## Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Metody pro přípravu a testování materiálů použité v disertační práci jsou vhodné a používané v podobné problematice.

Z předložené práce vyplývá, že konvenční technologie výroby výkonových substrátů neumožňují realizovat substráty s komplexními propojovacími strukturami obsahujícími například pokovené otvory, vícevrstvé struktury nebo integrované pasivní součástky. Technologie TPC ze své podstaty umožňuje realizaci substrátů obsahující výše popsané prvky, nicméně tato problematika dosud nebyla v literatuře popsána, a právě v oblasti pokročilých výkonových substrátů realizovaných technologií TPC byl prostor pro další výzkum. Jde tedy o velmi inovativní práci, která řeší aktuální téma.

Cíle disertační práce jsou shrnuty v následujících bodech.

1. Technologie pro realizaci vícevrstevných TPC substrátů. V této části práce byl navržen vícevrstvý TPC testovací motiv obsahující horizontální i vertikální (pokovené otvory) propojovací struktury. Tento testovací motiv byl určen pro otestování fyzikálních vlastností (elektrických i mechanických) vícevrstevných TPC struktur (substrátů). Následně byl při sérii naplánovaných experimentů postupně optimalizován proces realizace vícevrstevných TPC substrátů a byly průběžně testovány dosažené vlastnosti, které byly posléze porovnány s vlastnostmi jednovrstevných substrátů. Provedenými experimenty bylo prokázáno, že technologií TPC je možné realizovat spolehlivé a dobře elektricky i tepelně vodivé propojovací otvory skrz keramickou podložku, přičemž v průmyslovém měřítku je vhodné realizovat otvory s průměrem od 300 do 500  $\mu\text{m}$ .
2. Realizace vodivých motivů vytvořených technologií TPC na podložkách z nitridu hlinitého. V průběhu této části práce bylo realizováno několik experimentů týkající se TPC metalizace na

nitridu hlinitém. Provedenými experimenty bylo prokázáno, že adheze měděné pasty na  $Al_2O_3$  a AlN je dosaženo rozdílnými adhezními mechanismy.

3. Technologie odporových sítí s vodivým systémem z mědi vytvořeným technologií TPC. Provedenými experimenty bylo ověřeno, že odpory na bázi CuNi realizované kombinací sítotisku a AerosolJet jsou funkční. Nižších hodnot odporu lze dosáhnout postupným navyšováním tloušťky CuNi vrstvy nebo realizací podčtvercových struktur.

Lze konstatovat, že cíle dizertační práce byly splněny.

### **Stanovisko k výsledkům disertační práce a**

#### **k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Student kriticky zhodnotil výsledky své práce, zmínil i nezdárné kroky své práce, a to při plnění cílů 2 i 3, což je v oblasti vývoje nových materiálů často důležitá cesta a informace zejména pro všechny, kteří budou provádět výzkum v podobné oblasti.

Z výsledků dosažených v této práci jasně vyplývá, že technologie navržené a otestované v rámci této disertační práce umožní realizaci pokročilých výkonových substrátů nebo celých výkonových modulů, které nelze realizovat pomocí zavedených konvenčních technologií, což je velký přínos v této oblasti.

### **Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě**

#### **a jazykové úrovni disertační práce**

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práce je psána přehledně, pečlivě, bez většího množství překlepů.

Uvádím jen některá doporučení či poznámky:

Menší výhrady mám k citacím zdrojů uváděných informací, např. na str. 11 je celá stránka informací o keramických materiálech a teprve na konci několika odstavců textu je odkaz [1–3]. Asi by bylo vhodné u každé informace, či alespoň za každým odstavcem uvést odkud byla informace převzata. Takhle to vypadá, že byla převzata celá stránka textu a pak není jasné, ze kterého z uvedených zdrojů.

Malinko nestandardní je členění práce, zejména její Experimentální části a Výsledků.

Většinou bývá Experimentální část samostatným oddílem, na kterou navazují části Výsledky a jejich Diskuze. Zde je vždy do jedné části spojen shrnující popis experimentu i vlastní zhodnocení výsledků. Patrně tedy proto, že samotná práce je tvořena 3 kroky, kopírujícími Cíle práce a tedy i psaný text je rozdělen do 3 etap (částí) a v každé je pak nastíněn vždy popis experimentu v dané etapě a vzápětí jsou diskutovány výsledky dané etapy experimentu.

Na str. 34 a 35 je v textu nejprve odkaz na Obr. 25, poté teprve na Obr. 24.

Na str. 35 (řádek 9) není symbol pro konduktivitu napsán kurzívou.

V Tab. 7 jsou uvedeny parametry měděných vrstev, jak je popsáno nad tabulkou, jedná se o průměrné hodnoty ze dvou vzorků, u měření adheze průměrné hodnoty ze šesti vzorků. U těchto parametrů by tedy měla být uvedena odchylka stanovení. Totéž se týká parametrů v Tab. 8 a vlastně u všech uváděných hodnot stanovovaných parametrů ve všech tabulkách, ale i grafech. Z kolika stanovení byly určovány jednotlivé uváděné parametry?

Na str. 37: „*Líc testovacího motivu se skládá...*“ (chybí u ve slově motivu).

Jinak je ale práce zpracována pečlivě a grafická úroveň zpracování obrázků, grafů i tabulek je velmi dobrá.

### **Vyjádření k publikacím studenta**

Statement to student's publications

To, že student dosáhl významných výsledků v dané oblasti je zřejmé z jeho publikační činnosti. Student je autorem či spoluautorem 4 publikací s IF, kde na 3 je i prvním autorem, své výsledky dále publikoval na řadě národních i mezinárodních konferencí.

### **Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě**

Total evaluation and questions for defence

Disertační práce obsahuje velké množství nových a velmi cenných výsledků autora. Jde o velmi inovativní práci, která řeší aktuální téma a navrhuje technologie, které umožní realizaci pokročilých výkonových substrátů nebo celých výkonových modulů, což je velký přínos v této oblasti.

K dizertační práci mám několik formálních připomínek a otázek.

**Připomínky formálního charakteru:**

**Otázky:**

- 1) Student prezentuje velké množství práce, přípravu materiálů, spoustu metod (EDS, SEM, TGA, ...)... které z těchto prací opravdu dělal sám?
- 2) Na str. 25 je popsána metoda stanovení hustoty: „Hustota měděných vrstev byla změřena přesnou laboratorní váhou. Odlopnuté měděné vrstvy byly nejprve zváženy na vzduchu a poté v isopropanolu. Z těchto dvou hmotností byla vypočtena hustota měděných vrstev.“ Domnívám se, že tento popis není úplně přesný. Jak přesně toto stanovení opravdu probíhá?
- 3) V Tab. 7 jsou uvedeny parametry měděných vrstev, jak je popsáno nad tabulkou, jedná se o průměrné hodnoty ze dvou vzorků, u měření adheze průměrné hodnoty ze šesti vzorků. Jaké jsou odchylky stanovení těchto parametrů?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano  
yes

x

no

Datum

Date

6.6.2020

Podpis oponenta:

Signature of opponent





# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Hlína

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Substráty pro výkonovou elektroniku realizované technologií tlustých vrstev

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D

Oponent:

Opponent

prof. Ing. Václav Švorčík, DrSc.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Disertační práce zpracovává velmi aktuální téma, tj. problematiku výkonových substrátů. Zejména se zabývá výkonovými substráty realizovanými technologií tlustých vrstev (TPC). V první části práce jsou popsány konvenční výkonové substráty, keramické materiály používané pro jejich výrobu a výkonové substráty realizované technologií TPC. Experimentální část práce je zaměřena na pokročilé výkonové substráty realizované technologií TPC. V této části práce jsou popsány provedené experimenty a dosažené výsledky v oblasti vícevrstvých TPC struktur, TPC vrstev na keramických podložkách z nitridu hlinitého a odporových sítí kompatibilních s technologií TPC.

## Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Disertační práce je zpracována pečlivě. Experimenty byly navrženy tak, aby doktorand získal potřebný objem experimentálních dat. Analýzy, interpretace výsledků i jejich diskuse s dostupnou literaturou jsou zpracovány přehledně a promyšleně. Lze konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny.

## Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Experimenty, které provedl disertant v této práci, prokázaly, že technologií TPC lze realizovat vícevrstvé struktury s vyhovujícími elektrickými i mechanickými parametry, vodivé motivy s dostatečnou adhezí na podložkách z nitridu hlinitého a také plně tištěné tlustovrstvé rezistory s měděnými (TPC) vývody.

## Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práce je zpracována pečlivě, přehledně a systematicky. Grafická úroveň zpracování obrázků, grafů i tabulek je velmi dobrá. Text obsahuje velmi malé množství překlepů a formálních nedostatků a jazyková úroveň práce je dobrá, i když některé použité formulace působí kostrbatě (např. str. 35, „měděný meandr o délce 50 čtverců“). Z hlediska čtenáře je poněkud

problém, že práce nemá „klasickou“ strukturu. Formálně chybí kapitola Experimentální část a Výsledky a diskuse. Čtenář musí tyto údaje „hledat“. Ale potom v závěru uvádíte „v teoretické části“, „v experimentální části“, atd. a tím opět čtenáře matete.

### Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Publikační činnost disertanta je doložena: publikace v časopisech s impakt faktorem 4 práce, publikace ve sbornících mezinárodních konferencí 7 prací, publikace ve sbornících národních konferencí 3 práce, 3 funkční vzorky, 2 ověřené technologie, 1 užitný vzor. Všechny výstupy se přímo váží k tématu disertační práce. autorem. Dále disertant dokládá 1 práci ve sborníku mezinárodní konference a 1 výstup ve sborníku národní konference. Tyto výstupy vznikly po dobu studia disertanta a s tématem disertační práce přímo nesouvisí.

S ohledem na výše uvedené lze konstatovat, že doktorand doložil schopnost referovat o výsledcích disertační práce na mezinárodní úrovni a je schopen obhájit zvolené postupy a závěry vědecké práce před odbornou komunitou.

Počet publikovaných prací v mezinárodních časopisech lze považovat za dostatečný.

### Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Disertační práce obsahuje velké množství původních výsledků autora. Charakterizace připravených strukturů je komplexní. Prezentace a interpretace výsledků práce je adekvátní objemu získaných dat. K dizertační práci mám několik formálních připomínek a otázek.

#### Připomínky formálního charakteru:

1. karbid křemíku (SiC) – nazvěte ho „chemickým“ názvoslovím, když další materiály máte nazvané „chemicky“,
2. obr. 35, kde je vlevo a kde vpravo?
3. rozměry motivů a na dalších místech, např. 2×2 mm, je lépe psát 2×2 mm<sup>2</sup>.

#### Otázky:

1. jak je definována/charakterizována tlustá/tenká vrstva na substrátu?
2. nedochází k oxidaci Cu na keramice i na povrchu Cu vrstvy? Nedochází při výpalu a potom v praxi k oxidaci Ag a Cu past?
3. z jakých důvodů se někdy stanovuje u vzorků jejich plošný, někdy objemový odpor?
4. str. 35, „měděný meandr o délce 50 čtverců (Obr. 24)“, jaký je to rozměr, není lépe uvádět v SI jednotkách,
5. str. 36 „Odloupnuté měděné vrstvy byly nejprve zváženy na vzduchu a poté v isopropanolu. Z těchto dvou hmotností byla vypočtena hustota Cu vrstev.“ Můžete vysvětlit tento postup? Proč má Cu „o 13 % nižší hustotu než celistvá Cu“?
6. str. 50, „Zvýšení rezistivity a elektrické pevnosti bylo pravděpodobně způsobeno postupným odstraněním vlhkosti z dielektrické vrstvy nebo změnou vnitřní struktury dielektrické vrstvy během klimatických testů.“ Vážil jste vzorky před a po namáhání a jaká změna vnitřní struktury vás napadá?
7. obr. 54: „Odpor pokovených otvorů měřený během teplotních šoků“, umíte vysvětlit, proč mají záslosti tak „divoké“ průběhy?
8. ve výsledcích je uvedeno velké množství výsledků z různých analytických metod, které z nich prováděl disertant sám?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano yes	x	no
------------	---	----

Datum 5.6.2020

Date

Podpis oponenta:

Signature of opponent



# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

## Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Hlína

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektřinová technika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Substráty pro výkonovou elektroniku  
realizované technologií tlustých vrstev

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.

### Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

**Téma disertační práce je odrazem současných jevů v konstrukci výkonové elektroniky. Snahy o miniaturizaci a komplexnost řešení často narážejí na omezení plynoucí z vlastností aktuálně dostupných materiálů a technologií. V posledních letech se objevují nová řešení aplikující postupy známé z technologie tlustých vrstev. V kombinaci s keramickými podložkami lze vytvářet substráty pro výkonové obvody obsahující i nízkovýkonové řídicí obvody v jednom pouzdře. Právě těmito substráty se disertant Ing. Hlína ve své práci zabývá. Aktuálnost i disertabilnost tématu není třeba blíže rozvádět - plyne z výše uvedeného. Požadavky z oblasti koncentrované fotovoltaiky, LED světelných zdrojů, chytrých výkonových modulů aj. – to jsou potenciální odběratelé.**

### Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 07.07.2020

ZCU 015275/2020

listy: 4

přílohy:

druh:



zcupes13189df

Disertant vycházel jak z dostupných literárních pramenů (monografií), tak z internetu. Jednotlivé etapy experimentálních prací průběžně uveřejňoval (viz seznam publikací autora označených A1 až A4). Pro zjišťování základních mechanických a elektrických parametrů vzorků vyrobených v jednotlivých experimentálních etapách navrhl univerzální testovací obrazec, který důsledně používal. Ovšem i kromě jiných, navržených dle individuálních požadavků (elektrody pro měření elektrické pevnosti, plošky pro zjišťování síly v odtrhu j.).

**Stanovisko k výsledkům disertační práce a  
k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**  
Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Cíle disertační práce, ke kterým disertant dospěl po studijní etapě a analýze současného stavu poznání, ve stručném shrnutí uvádí v kap. 3.

Experimentální činnost je soustředěna na návrh a realizaci propojovacích struktur kompatibilních s technologií tištěných tlustých vrstev mědi (TPC) na keramických podložkách z korundu a z nitridu hlinitého a odporových sítí s tištěnými tlustovrstvovými rezistory s měděnými vývody. Specifikované cíle vycházejí z analýzy prezentované v kap. 2.

Předložená disertační práce v částech věnovaných experimentům (kap. 4, 5, 6) velmi detailně a srozumitelně popisuje prováděné dílčí kroky a uvádí dosažené výsledky. Text je doplněn grafy, tabulkami a mikrofotografiemi v provedení, které je třeba označit jako vynikající. Odborná úroveň svědčí o velmi zodpovědném přístupu doktoranda k zadanému tématu a, přihlédneme-li k přehledu publikací autora (položky A12 a dále), o zájem trvajícím, přesahujícím dobu nutnou k úspěšnému zakončení doktorandského studia.

Výsledky experimentů komentuje disertant v kapitole nazvané „Závěr“. Komentuje zde splnění jednotlivých cílů disertační práce. Cíl první – stanovení a ověření vícevrstevných TPC substrátů – byl splněn beze zbytku. Rovněž tak i cíl druhý – technologie vícevrstevných substrátů na podložkách z nitridu hlinitého. Třetí z cílů – technologie rezistorových sítí tlustovrstvou TPC byl rovněž splněn se tím, že se otvírá možnost realizace vícevrstevných systémů s podložkou z nitridu hlinitého pro moduly s vysokým výkonovým zatížením. Zde se uvažuje i možnost realizace odporových elementů pouze sítotiskem, bez nutnosti užít AJ, a to s novým typem past s upraveným složením.

**Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě  
a jazykové úrovni disertační práce**  
Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Čtenář se při čtení textu často zastaví nad jednoduchým a přitom nijak zdůrazněným užitým principem (např. určení hustoty mědi, stanovení proudové zatížitelnosti Cu vodičů) – v jednoduchosti je krása. (Disertant věnoval provedení práce velkou péčí. V celém textu jsem našel pouze dva překlepy!)

#### Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Seznam všech publikací doktoranda obsahuje 22 položek, včetně ověřených technologií, funkčních vzorků a užitných vzorů. Při posouzení obsahu podle názvu jen 2 položky jsou mimo téma disertační práce. Nejstarší publikace je z roku 2015 (B2), poslední z r. 2020. Z datace je zřejmé těžiště prací v letech 2018 – 2019. Z existence položek A15 – A20 lze usuzovat na zapojení doktoranda do pedagogické práce na katedře a do jiných vědeckovýzkumných činností.

#### Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence



Disertační práce pana Ing. Hlíny je systematicky členěná, logicky uspořádaná, psaná velmi kultivovaným českým jazykem. Již výše bylo podotknuto, se provedení grafických částí a celkovou formální úroveň je možné označit jako dokonalé.

K odborné části lze konstatovat, že stanovené cíle práce byly v plném rozsahu naplněny. Všechny dosažené výsledky lze považovat za původní, nové. Jsou i naznačeny další kroky k zavedení technologie TPC do praxe.

Předloženou disertační práci pana Ing. Hlíny doporučuji k obhajobě.

Otázky a k poznámky práci:

- 1) K přípravě rezistorů z konstantanu bylo použito zařízení AJ (Aerosol Jet) v kombinaci se sítotiskem. Z textu „není zřejmé co bylo tištěno sítotiskem a co AJ. Přitom jinde se uvažuje o úplném vynechání AJ.
- 2) Je reálná vlastní (na katedře) výroba konstantanové pasty?
- 3) Jak vypadá lankový závěs při zkoušce pevnosti v tahu? Prosím NÁKRES !
- 4) Poznámky k češtině – Psaní přídavných jmen začínajících číslovkou. Příklad: dvou systémový, dvou-čtvercový. Složené přídavné jméno píšeme dohromady, bez spojovníku! Příklad: čtyřčtvercový, 4čtvercový.

Doporučuji disertační práci k obhajobě  
I recommend the dissertation for the defence

<input checked="" type="checkbox"/>	x	<input type="checkbox"/>
ano yes		ne no

Datum  
Date

10.6.2020

Podpis oponenta:  
Signature of opponent

