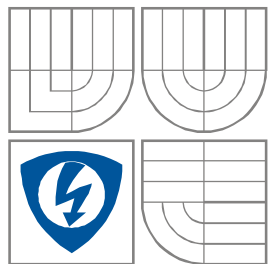


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NOVÉ OBLASTI APLIKACE ULTRAZVUKU V MIKROELEKTRONICKÝCH TECHNOLOGIÍCH

NEW AREAS OF THE ULTRASONIC APPLICATION IN MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Martin Buršík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO, 2014

Abstrakt

Tato práce se zabývá depozicí speciálních tixotropních materiálů určených pro mikroelektronické technologie. Cílem práce je vývoj nové metody optimalizace dávkovacího procesu za účelem dosažení rozlišení tisku pod 100 μm . Práce obsahuje vývoj speciální dispensní hlavice (UZD) využívající působení ultrazvukové energie. Doložené výsledky dokumentují možnosti nově vyvinuté metody, která je schopna tisknout tixotropní materiály s rozlišením 65 μm . Oproti jiným metodám dosahuje těchto výsledků s běžně využívanými materiály pro tlustovrstvovou technologii s velikostí částic do 5 μm .

Klíčová slova

Ultrazvuk, nanášení, reologie, optimalizace, tisk, tlustovrstvová technologie.

Abstract

Doctoral thesis deals with the deposition of special thixotropic materials for microelectronic technology. The aim of the work is the development of the new method optimizing the dosing process in order to achieve a print resolution of better than 100 microns. The work includes the development of a special dispensing head (UZD) using the influence of ultrasonic energy. These results demonstrate the possibility of a newly developed method that is able to print thixotropic materials with a resolution of 65 microns. Compared to other methods achieves these results with the commonly used materials for thick film technology with particle size up to 5 microns.

Keywords

Ultrasonic, deposition, rheology, optimizing, print, thick film technology.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma *Nové oblasti aplikace ultrazvuku v mikroelektronických technologiích* jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele 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 disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. října 2014

autor práce

Bibliografická citace

BURŠÍK, M. *Nové oblasti aplikace ultrazvuku v mikroelektronických technologiích*. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 75 stran. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Obsah

Abstrakt.....	2
Klíčová slova	2
Abstract	2
Keywords	2
Prohlášení.....	3
Bibliografická citace	3
Obsah	4
1 Úvod.....	5
2 Současný stav a vymezení oblasti disertace	6
2.1 Vybrané nevakuové procesy pro depozici viskózních materiálů	6
2.1.1 Sítotisk	6
2.1.2 Jet dispensing	6
2.1.3 Dispensní tisk	7
2.2 Výběr konkrétní metody pro aplikaci přídavné ultrazvukové energie	7
2.3 Hlavní parametry dispensního tisku	7
2.3.1 Rozdělení parametrů dispensního procesu	7
2.3.2 Optimalizační parametry tisku	8
3 Výsledky disertační práce	10
3.1 Vlastní analýza řešení	11
3.1.1 Vliv ultrazvuku.....	11
3.1.2 Volba piezokeramických rezonátorů.....	12
3.1.3 Rezonanční frekvence / amplituda	12
3.1.4 Příprava pro vývoj UZD.....	12
3.1.5 Poptávka po technologii (tisk s vysokým rozlišením).....	13
3.1.6 Technologické znalosti.....	13
3.2 Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk	13
3.2.1 Polohovací zařízení Fisnar F4200N	13
3.3 Nová metoda dispensního tisku.....	13
3.4 Základní princip ultrazvukové jednotky UZD	14
3.4.1 Parametry procesu dispense s UZ podporou	14
3.4.2 Základní funkční bloky UZD	14
3.4.3 Znázornění funkce UZD hlavice	14
3.4.4 Výpočet prodloužení piezokeramických rezonátorů	15
3.4.5 Model transportní kapiláry, simulace	16
3.5 Oblast působení vlivu UZ v transportní kapiláře	16
3.6 První vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD1	16
3.6.1 Realizace UZD jednotky	17
3.6.2 Shrnutí dosažených výsledků s UZD1	17
3.7 Druhý vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD2	17
3.7.1 Realizace UZD2	17
3.7.2 Shrnutí dosažených výsledků UZD2	18
3.8 Třetí vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD3.....	18
3.8.1 Realizace UZD3	18
3.8.2 Shrnutí dosažených výsledků s UZD3	20
3.9 Tisk pasty s UZD3	20
3.10 Rozlišení a parametrické vlastnosti UZ dispenseru.....	20
3.10.1 Dosažené parametry tisku	21
3.10.2 Subrutiny pro optimalizaci tisku rohů motivu.....	21
3.11 Realizovaná ultrazvuková dispensní hlavice.....	21
3.11.1 Jednotlivé vývojové stupně ultrazvukové dispensní hlavice	22
3.12 Srovnání standardních systémů se systémem UZD	23
3.13 Vyhodnocení vlivu UZD systému na tisk tixotropních materiálů	23
3.14 Výsledky dosažené optimalizací dispensního tisku.....	23
3.15 Shrnutí výsledků doktorské práce	24
3.16 Patentování nové metody UZD dispense	27
4 Závěr	28
5 Literatura.....	30
Curriculum Vitae.....	32

1 Úvod

Současný vývoj mikroelektronických technologií je charakterizován novými materiály a procesy, u nichž však existují určité limity způsobené fyzikálními vlastnostmi používaných materiálů. Tyto hranice se týkají hodnot *mechanické pevnosti*, *elektrické vodivosti* a *transparentnosti*, ale také například *rychlosti rozpouštění*, *průtoku*, *viskozity* apod. Jednou z oblastí, kde je požadováno zlepšování rozlišení, je depozice viskózních materiálů nevakuovými metodami. Tato práce se zabývá novou metodou zaměřenou na zvýšení rozlišení s *využitím ultrazvuku* pro viskózní materiály. Proto studium účinků ultrazvuku ve zvolené oblasti tvoří výchozí část této práce. Obecně je z pohledu mikroelektroniky ultrazvuk využíván v mnoha směrech. Je to například pájení, mytí a sváření. V této práci je pozornost zaměřena na oblast depozice viskózních materiálů.

V mikroelektronice jsou pro depozici materiálů využívány různé metody. Nejčastější jsou sítotisk a šablonový tisk, dispensní tisk a jet dispensing. Tyto jsou aplikovány zejména pro nanášení pájecí nebo tlustovrstvové pasty, lepidla, tmelů a jiných materiálů s tixotropním chováním. Tixotropie je reologická vlastnost popisující dynamickou změnu viskozity během působení tlaku potažmo teploty a tření částic uvnitř materiálu. V mikroelektronických procesech nanášení tixotropních materiálů je stěžejní minimální objemové množství nanášeného materiálu, případně rozlišení konkrétní metody. Z tohoto důvodu je práce orientována na vývoj metody umožňující zvýšení rozlišení při nanášení tixotropních materiálů, kde jsou neustále kladeny požadavky na zvýšení hustoty integrace.

Působení ultrazvuku je obecně velmi úzce spjato s konstrukcí ultrazvukové jednotky, která v principu realizuje změnu elektrické energie z generátoru elektrického signálu na mechanické kmity piezokeramických elementů. Tyto jsou dále transponovány do různých typů deformace aktivních součástí ultrazvukových jednotek, jako je například ohyb membrány, redukce světlosti ventilu, pohyb elektrod apod. Mechanické kmity, které jsou výsledkem budícího signálu, lze soustředit s požadovaným výkonem do určených oblastí. Takto koncentrované mechanické kmity s frekvencí od jednotek KHz až po jednotky MHz lze využít v kombinaci s vhodným konstrukčním uspořádáním k velmi jemnému ovlivnění požadovaných parametrů s odlišnou fyzikální podstatou.

Ultrazvuk ve formě mechanických kmitů představuje velmi účinný způsob s dostatečnou selekcí pro lokalizaci jeho účinků. Ultrazvukový přenosový systém (akustický transformátor) působí jako *koncentrátor* a *vedení* mechanických kmitů k oblasti, v níž je požadováno ovlivnění určitého druhu energie. Vysvětlení účinků ultrazvukového působení v některých aplikacích lze demonstrovat na *čistících procesech* v mikroelektronice. Podrobíme-li mycímu procesu DPS s vysokou hustotou integrace, nejsme schopni použitím běžných postřikových systémů, případně ponorných nádrží, mýt komponenty efektivně v reálných časech. Aplikace ultrazvuku v mycích procesech dokáže stísněné prostory na DPS „zpřístupnit“ narušením soudržnosti molekul mycího média. Tímto způsobem ovlivňuje viskózní silové účinky v objemu mycí kapaliny a dovoluje jí proniknout mezi *jednotlivé komponenty*, pod *čipy BGA*, *SMD součástky*, apod.

Dále typické procesy, kdy je ultrazvukové působení hlavním parametrem působícím v procesu. K demonstraci této funkce nám může posloužit proces *kontaktování ultrazvukem*. U tohoto procesu je ultrazvuk využíván pro samotné vytváření sváru.

Předmětem této práce je rozšíření oblasti aplikace ultrazvukových procesů do technologie *dispensního nanášení tixotropních materiálů*. Z hlediska zaměření pracoviště ústavu

mikroelektroniky zabývajících se hybridními technologiemi je reologie materiálů perspektivní oblastí pro zde realizované tlustovrstvové procesy.

Vývoj optimalizace tisku tixotropních materiálů byl vyvolán snahou navýšit rozlišení tisku dispensní metodou z důvodu možnosti tisku nízkého počtu vzorků bez nutnosti tisku pomocí sítotiskového zařízení. Požadavkem bylo zefektivnit procesy vytváření vzorkového množství substrátů s rozlišovací schopností sítotiskového zařízení 200 μm . Z hlediska využití tlustovrstvových materiálů bylo možné využít stávajících znalostí reologického chování TLV past. Pro tlustovrstvové materiály byl postupně vyvinut ultrazvukový optimalizační princip, pomocí kterého je možné tisknout s rozlišením lepším než pomocí sítotisku (pod 100 μm). Tato metoda je určena přímo pro dávkování médií s viskositou ve stovkách Pa.s. Zároveň je však požadavkem na tisk motivu s vysokým rozlišením stanoven vnitřní průměr transportní kapiláry. Tato skutečnost protichůdně nutí zmenšovat průměr kapiláry a snahu o dávkování stejného média s co nejnižším tlakem. Z tohoto důvodu jsem pro optimalizaci procesu použil ultrazvukovou podporu redukující tření mezní vrstvy dávkovaného média uvnitř kapiláry. [1], [2], [3], [4], [5]

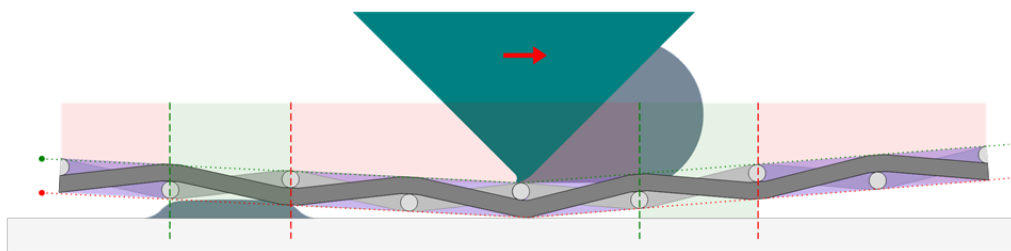
2 Současný stav a vymezení oblasti disertace

2.1 Vybrané nevakuové procesy pro depozici viskózních materiálů

Procesy pro nanášení viskózních materiálů jsou charakterizovány fyzikálním způsobem depozice dávkovaného média. Vybrané depoziční procesy, z nichž vychází technologie vyvinutá v rámci této disertační práce, principiálně rozdělují hlavní technologické fáze depozice.

2.1.1 Sítotisk

Sítotisk je první vybraný proces, který je charakteristický pro hybridní tlustovrstvovou technologii. Tato metoda představuje z hlediska reologických poměrů dávkovaného materiálu proces, během kterého pasta z výchozích hodnot viskozity, v okamžiku průchodu skrze síto právě pasírováním, redukuje svoji viskozitu a dochází tak k řidnutí a snazšímu přenosu požadovaného motivu na substrát. Obr. 2.1 zobrazuje proces nanášení, přičemž síto zde zastává funkci redukce viskozity. [1], [2], [6]



Obr. 2.1 Průběh nanášení pasty pomocí sítotisku, detail - těrka tiskne pastu skrz síto

2.1.2 Jet dispensing

Další metodou nanášení je *jet dispensing*. Ten je nasazován ve všech oblastech vyžadující specifické vlastnosti materiálů, které však dovolují malé částice v objemu pasty/inkoustu. Svým charakterem je tato metoda určena pro miniaturizaci a možnosti depozice materiálů do oblastí s hustou zástavbou. Metoda nachází uplatnění zejména při požadavku na vysoké rozlišení, kdy využívá inkousty s nanočásticemi apod. Metoda je schopna nanášet čáry

od šířky řádově jednotky μm s nutností použití speciálních materiálů. Technologii *jet dispensingu* blíže specifikují uvedené publikace z konferencí. [1], [7], [8], [9], [10], [11], [12]

2.1.3 Dispensní tisk

Třetí metoda se parametricky řadí mezi tyto dvě rozdílné techniky nanášení a z každého procesu přejímá určité vlastnosti. Jedná se o metodu *dispensního tisku*, která je založena na aplikaci pasty z kartušového zásobníku skrze kapiláru na substrát s požadovaným výtlačem. Oproti výše uvedeným metodám je dispensní tisk schopen kombinovat dílčí parametry. Dispensní tisk umožňuje tisknout vrstvy o tloušťkách v řádu desítek μm , přičemž stejných parametrů je možné dosáhnout *sítotiskem*. Naopak *jet dispensing* poskytuje tisk velmi tenkých vrstev s vysokým rozlišením. Úkolem této práce je posunout možnosti *dispensního tisku* z důvodu požadavků na tisk standardních materiálů s možnostmi vysokého rozlišení. Jedná se zejména o kombinaci vysokého rozlišení čára/mezera, kdy je dispensní tisk po optimalizaci schopen dosahovat šířky čáry pod $100\ \mu\text{m}$. Konkrétně se jedná o tisk pomocí pneumatického systému s optimalizační hlavou. [1], [2], [6], [11], [12], [13]

2.2 Výběr konkrétní metody pro aplikaci přídavné ultrazvukové energie

Vybrané depoziční procesy představují hlavní fyzikální principy pro nevakuovou depozici viskózních materiálů. Z jejich popisu a znalosti lze rozhodnout o vhodném principu, pro který bude znamenat přídavná ultrazvuková energie optimální prostředek pro dosažení lepších procesních parametrů.

Sítotisk prostřednictvím prostupu pasty sítom viskozitu redukuje v dostatečné míře a jeho hranice rozlišení závisí zejména na průměru drátů a následně světlosti použité síťoviny.

Metoda *Jet dispensing* je metoda využívající speciální materiály, s nimiž je možné dosahovat vrstev s vysokým rozlišením. Technologie *Jet dispensing* však pro vysoké rozlišení vyžaduje média s nízkou viskozitou, přičemž standardní TLV materiály nelze využívat bez speciálních úprav.

Disertační práce je zaměřena na aplikaci ultrazvukové energie, přičemž rozbořením fyzikálních principů jednotlivých procesů lze touto úpravou právě metodu *dispensního tisku* efektivně zoptimalizovat. Dispensní tisk je využíván pro depozici viskózních materiálů a ve spojení s tixotropním chováním lze tuto metodu hlouběji optimalizovat. V kapitole v disertační práci je uveden přehled jednotlivých fází procesu depozice. Právě fáze *transportní* a *depoziční* je v procesu *dispensního tisku* stěžejní a vymezuje lokální působení přídavné energie do oblasti konce transportní kapiláry, jež mají rozhodující vliv na dosahované rozlišení. [1], [2], [6], [11], [12]

2.3 Hlavní parametry *dispensního tisku*

Dispensní systémy je možné charakterizovat jak podle parametrů do procesu vstupujících, tak podle parametrů tiskového výstupu. Parametry tiskového depozičního procesu lze tedy rozdělit na parametrické skupiny podle vlivu na výslednou kvalitu depozice.

2.3.1 Rozdělení parametrů *dispensního procesu*

Vstupní parametry jsou zpravidla závislé na požadavcích daného procesu. Z toho vyplývá, že tyto parametry týkající se zejména reologie dávkovaného média a geometrických vlastností substrátu, jsou parametry výchozí a nelze je měnit. Naopak výstupní parametry jsou parametry požadované, kterých je

zapotřebí dosáhnout. Samozřejmostí je kvalita požadovaného tiskového výstupu, a vysoké rozlišení je specifickým důsledkem požadavků na miniaturizaci. Spotřeba dávkovaného média je spjata zejména s použitím vzácných kovů, jako je platina, zlato, stříbro apod., které jsou součástí tlustovrstvových past.

Tabulka 1 Zvolené parametry dispensního tisku

Vstupní parametry	Procesní parametry	Výstupní parametry
Dávkované médium	Tiskové zařízení	Tiskový výstup
velikost částic	vnitřní průměr kapiláry	kontaktní metoda
Viskozita	vzdálenost kapilára - substrát	vysoké rozlišení
tixotropní chování	pohyb v ose X, Y, Z	Dávkované médium
Substrát	fixace substrátu	Spotřeba
Rovinnost	tlakové poměry	
Drsnost	výšková korekce	

Právě procesní parametry umožňují transformaci reologických poměrů dávkovaného média za účelem docílení požadovaného tiskového výstupu. Prakticky všechny parametry se týkají tiskového zařízení. To musí být schopno zajistit v dostatečné přesnosti jindy neuvažované parametry, které s takto vysokým rozlišením je nutné nejen uvažovat, ale také optimalizovat. [2], [11], [12], [14], [15]

2.3.2 Optimalizační parametry tisku

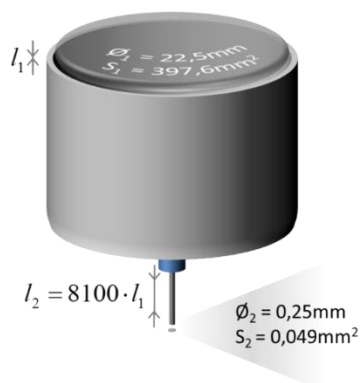
Pro optimalizaci dispensního tisku lze standardně využít procesní parametry tiskového zařízení. V této práci se soustředím na parametry dispensního tisku, které jsou běžně dostupné u tlakových dispenserů, ale pro optimalizaci tisku velmi tenkými kapilárami (vnitřní průměr do 100 μm) navíc přidávám optimalizační parametr, který byl odvozen v průběhu řešení disertační práce. Standardní parametry jsou:

- tlakové poměry pneumatického systému
- vnitřní průměr kapiláry
- vzdálenost kapilára – substrát.

Nový, pro tento typ dispenseru specifický parametr je *ultrazvuková energie*, aplikovaná prostřednictvím mechanického kmitání na transportní kapiláru. Tento parametr je výsledkem analýzy chování tixotropních materiálů v průběhu nanášení a umožňuje posunutí limitů rozlišovací schopnosti současných tlakových dispenserů.

a) Tlakové poměry

Základní uspořádání dispenseru je odvozeno od tlakového principu dispense. Tlak je aplikován přes píst prostřednictvím vzduchové mezery na hladinu dávkovaného materiálu. Objemově je roz distribuován tlak až k vyústění dispensního zásobníku, kde jsou dle hydraulického odvození známé konkrétní podmínky pro tok dávkovaného materiálu.



Použité označení:

- S_1 vnitřní průřez zásobníku dispenseru
- S_2 vnitřní průřez transportní kapiláry
- $\varnothing_1$ vnitřní průměr zásobníku dispenseru
- $\varnothing_2$ vnitřní průměr transportní kapiláry
- L_1 snížení hladiny v zásobníku dispenseru
- L_2 posun pasty v transportní kapiláře

Obr. 2.2 Hydraulické podmínky pro dispensi

Vztahy pro výpočet poměrů uvnitř dispenseru:

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 = 3,14 \cdot (11,25 \cdot 10^{-3})^2 = 397,6 \text{ mm}^2 \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{397,6 \text{ mm}^2}{0,049 \text{ mm}^2} = 8100 \Rightarrow K = \frac{S_1}{S_2}$$

$$S_2 = \pi \cdot r_2^2 = 3,14 \cdot (0,125 \cdot 10^{-3})^2 = 0,049 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{l_2}{l_1} = 8100 \Rightarrow l_2 = 8100 \cdot l_1$$

Rovnice 2.1

... kde K je tlaková citlivost dispenseru

Rovnice 2.1 odvozuje vzorec pro tlakovou odezvu dispenseru, který jsem stanovil jako poměr vnitřního průřezu zásobníku- S_1 a vnitřního průřezu transportní kapiláry. Tímto parametrem pak lze hrubě nastavit tlak, rychlost posuvu a ostatní parametry dispenseru.

Obr. 2.2 demonstruje tlakovou citlivost dávkování v závislosti na vnitřním průměru kapiláry. V praxi se setkáváme s minimálním tlakem, který je zapotřebí pro tokovou odezvu systému. Tento tlak je výsledkem zejména veškerého hydraulického odporu systému. Hydraulický odpor způsobený smykovým třením představuje převládající část protichůdných sil, které představují ofsetový posun tokové odezvy při určitém podlimitním tlaku.

b) Vnitřní průměr kapiláry

Průměr dávkovací kapiláry je parametr přímo závislý na typu dávkovaného média. Médium totiž obsahuje částice, které jsou mimo jiné definovány svou maximální velikostí (parametr *particle size*). Z technologických poznatků je doporučeno udržovat poměr průměru dávkovací kapiláry a maximální velikosti částic na hodnotě větší než 5. Tato podmínka je často využívána například při volbě světlosti síta v kombinaci s konkrétní pastou.

Vnitřní průměr kapiláry dále samozřejmě ovlivňuje minimální šířku tisknutelné čáry a tlak potřebný pro tokovou odezvu systému. Se snižujícím se vnitřním průměrem kapiláry navyšujeme rozlišení tisku, při kterém však současně roste tlak pneumatického okruhu dispenseru. Poměr vnitřního průměru kapiláry a šířky tištěné čáry ale není se snižujícími se rozměry konstantní. Složení dávkovaného materiálu a tlak pneumatického systému dispenseru mají značný vliv na tyto poměry a se snižujícím se průměrem kapiláry (pod 100 μm) již není možné pracovat s nízkými tlaky přibližně do 3 atm.

c) Vzdálenost kapilára – substrát (odstup)

Tato vzdálenost je v souvislosti s reologickými parametry tištěných materiálů stěžejní pro bezchybný tisk (kontinuální tisk čáry se stabilním průřezem a tvarem). Ve srovnání se stabilitou parametrů jako jsou *tlak* nebo *rychlost posuvu* je hodnota *odstupu* mnohem více problematická z hlediska její stabilizace na konstantní úrovni. Tisk s rozlišením pod 100 μm metodou tlakového dispenseru je problematický právě z hlediska odstupu tiskové hlavičky od substrátu. Tento parametr musí být udržován v optimálním poměru vzhledem k *tisknutelné tloušťce* vrstvy a její *šířce* v souvislosti s *viskozitou materiálu* a *adhezí k substrátu*. Při tisku s kapilárou o vnitřním průměru pod 50 μm je odstup od substrátu optimální udržovat na hodnotě 50 μm s přesností $\pm 1 \mu\text{m}$. Změna odstupu o více než 3 μm vykazuje problémy, pokud udržujeme ostatní parametry (tlak, přídavná energie a rychlost posuvu) konstantní.

Z tohoto důvodu hodnotu *odstupu* není možné ponechat pouze na přesném polohování v rovině XY, jelikož nerovnost sériově dodávaných substrátů Al_2O_3 se standardně pohybuje okolo 50 μm na vzdálenosti 50 mm. Proto je nutné v ose Z provádět korekci pro planparalelní pohyb s povrchem substrátu a docílit tak konstantní hodnoty *odstupu* v řádu jednotek μm .

d) Optimalizace viskosity pasty ve výstupní kapiláře (nová metoda)

Ve výstupní kapiláře z fyzikální podstaty již bez dodatečných úprav dochází k redukci viskozity a tím k optimalizaci reologie dávkovaného materiálu. Tento vliv je však dostatečný pouze v případě, že využíváme standardní kapiláry s průměrem nad 150 μm . Při použití jemnějších kapilár je nutné tento vliv zesílit a toho je možné dosáhnout právě přídavnou ultrazvukovou energií, jejíž aplikace je v této oblasti novou metodou ovlivňující pouze nezbytné množství materiálu na výstupu. Jedná se o optimalizaci viskozity pasty v okamžiku separace dávkovaného množství materiálu od výstupu kapiláry prostřednictvím mechanických kmitů na rozhraní mezní vrstvy pasta – stěna kapiláry.

3 Výsledky disertační práce

Cíl práce:

Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie

Dílčí cíl A:

Výzkum vlivu ultrazvukového působení na chování tixotropních materiálů

Realizace:

Pro dosažení tohoto cíle bylo vytvořeno pracoviště dispensního tisku s možnostmi realizace tlustovrstvových vzorků a jejich následné měření na pracovišti.

Po ověření tixotropního chování dávkovaného materiálu během tisku bylo nutné zařízení optimalizovat pro tisk s vysokým rozlišením.

Dílčí cíl B:

Návrh a konstrukce dispensní hlavice s ultrazvukovou optimalizací

Realizace:

Na základě testů tisku standardním dispenserem byl proveden návrh ultrazvukové dispensní hlavice (UZD).

Konstrukce UZD dle návrhu a její následná optimalizace na základě testování. V práci jsou uvedeny 3 vývojové stupně UZD.

Detailní popis jednotlivých vývojových stupňů z hlediska požadované funkce.

Dílčí cíl C:

Aplikace ultrazvukového principu pro soustředění přídavné energie v místě dávkovací kapiláry, která bude cíleně ovlivňovat parametry tisku.

Realizace:

Tisk pasty s vývojovým stupněm UZD3.

Zkušební tisky, programové subrutiny pro tisk, optimalizace UZD hlavice, výroba dílů pro tiskové zařízení.

Srovnání s výsledky sítotiskových a dispensních procesů.

Dílčí cíl D:

Optimalizace tokové křivky nanášeného materiálu uvnitř dispensní jehly.

Realizace:

Rozbor technologického procesu dispense a toku kapilárou.

Popis vlivu dynamického tření na mezní vrstvu dávkovaného materiálu.

Dílčí cíl E:

Simulace parametrického modelu proudění média kapilárou.

Realizace:

Byla provedena základní simulace proudění média kapilárou o průměru 30, 50 a 100 μm . Výsledky byly porovnány.

3.1 Vlastní analýza řešení

3.1.1 Vliv ultrazvuku

Myšlenka aplikace ultrazvukové energie za účelem ovlivnění reologických vlastností pasty vznikla na základě testů působení ultrazvuku na objemové množství pasty v kádince. Tento test byl prováděn v laboratoři pouzdrění a propojování Ústavu mikroelektroniky na VUT v Brně. Měřením bylo zjištěno, že pro tlustovrstvovou technologii z hlediska temperování materiálu jsem schopen tento proces urychlit v ultrazvukové myčce. Myčka prostřednictvím vodní lázně přenáší kmity na kelímek s pastou, a tím dochází k prohřívání jeho obsahu.

Na základě těchto testů jsem začal studovat vliv ultrazvuku na tixotropní materiály. Nejdříve jsem se musel seznámit s reologickými vlastnostmi piezokeramických rezonátorů. K tomu bylo možné využít konstrukčních dílů pro kontaktovací zařízení (wire-bonding), a to **akustický transformátor**, obr. 3.1. Toho jsem využil pro měření rezonanční charakteristiky uvedené na obr. 3.2.

Měření rezonanční frekvence probíhalo na základě měření úbytku napětí na sériovém odporu, který indikoval protékající proud rezonančním systémem. Měření bylo provedeno pomocí funkce krokování frekvence od 1 Hz do 60 kHz, přičemž hodnoty byly zaznamenávány s rozlišením 100 Hz, přičemž oblasti napěťových peaků byly proměřeny individuálně s rozlišením až 1 Hz. Tyto maxima znamenají zvýšený proudový odběr piezokeramických rezonátorů, které převádějí elektrický signál na mechanické kmity o dané frekvenci.



Obr. 3.1 Přizpůsobený akustický transformátor ze zařízení pro wire-bonding

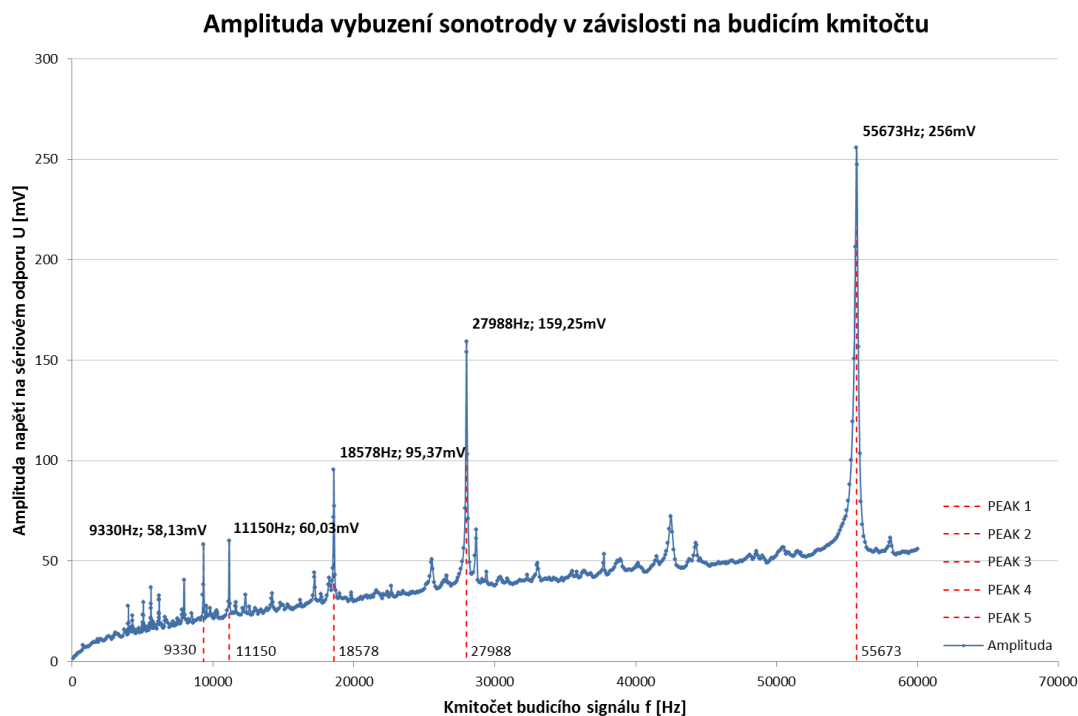
Frekvence budicího signálu byla na základě měření frekvenční charakteristiky na obr. 3.2 nastavena na jednotlivé naměřené hodnoty, které byly porovnávány z hlediska síly rezonance příkládáním kovové tyčinky k hrotu sonotrody. Pro měřenou sonotrodu byly použity frekvence uvedené v tabulce.

Tabulka 2 Rezonanční frekvence s hodnotami úbytku napětí na sériovém napětí

Rezonanční frekvence	9330 Hz	11150 Hz	18578Hz	27988 Hz	55673 Hz
Napěťový úbytek na seriovém odporu	58,13 mV	60,03 mV	95,37 mV	159,25 mV	256 mV

Tabulka 3 Parametry piezokeramických měničů Noliac Ceramics NCE80, Øo=20mm, Øi=10mm,t=4mm[18]

	f_s [kHz]	f_p/f_s	$ Z $ [Ω]	C_{33}^T [pF]	$\tan \delta$ $\cdot 10^{-4}$	ϵ_{3r}	k_{eff}	Q_m
max	73,3	1,077	34	600	26	1152	0,371	910
Min	72,9	1,071	30	574	23	1101	0,358	800
průměr	73,067	1,075	32,5	592	24,8	1136	0,367	845



Obr. 3.2 Naměřená rezonanční charakteristika akustického transformátoru

Řešení rezonančního systému pro UZD hlavici je uvedeno v kapitolách 3.6, 3.7 a 3.8. [1], [5]

3.1.2 Volba piezokeramických rezonátorů

Na základě měření a testů s akustickým transformátorem jsem provedl rešerši těchto metod a z hlediska optimalizace reologických vlastností tixotropních materiálů tato práce popisuje zcela novou metodou použití ultrazvuku v dispensních procesech. Po provedení průzkumu v oblasti dodavatelů jsem kontaktoval společnost **Noliac**, kde jsem na základě konzultací objednal **piezokeramické rezonátory** (materiál NCE80) [16], [17], [18]. Tento materiál vykazuje z hlediska použití optimální poměr amplitudy a napětí budícího signálu.

Konstrukce mechanického provedení ultrazvukové hlavice (UZD) pro soustředění mechanických kmitů do objemu dávkovaného média již probíhalo dle jednotlivých návrhů (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8) na základě vlastních myšlenek konzultovaných s kolegy. Vývoj práce byl také směřován na požadavky, které vyplývaly z mnoha konferenčních setkání se zahraničními kolegy a zástupci firem.

3.1.3 Rezananční frekvence / amplituda

Reznance systému a amplituda budících kmitů jsou parametry, které přímo souvisejí s konstrukčním uspořádáním, a není efektivní je předem detailně navrhovat. Vzhledem k nutnosti ověření samotného principu bylo nejvhodnější sestavit první UZD jednotku, která následně umožní posoudit naměřené parametry (kapitola 3.6.1). Parametry rezonanční charakteristiky byly měřeny dle postupu, který je uveden v kapitole 3.1.1.

Amplituda budícího signálu byla nejdříve odvozena od výstupu funkčního generátoru, a poté byl sestrojen zesilovač, kterým bylo možné dosáhnout požadovaného signálu (kapitoly 3.6.1, 3.7.1).

3.1.4 Příprava pro vývoj UZD

S významnou podporou vedoucího práce doc. Szendiucha jsem byl schopen připravit pracoviště pro výzkum vlivu působení ultrazvukové energie na chování tixotropních materiálů (kapitola 3.2). Návrh a vybavení pracoviště bylo připravováno na základě průzkumu technologie v dané oblasti. Pracoviště bylo vybaveno automatickým dispensním robotem Fisnar F4200N [11], optickou jednotkou pro sledování výstupu dispensního procesu, a mnoha funkčními doplňky, které jsem vyrobil v rámci řešení práce.

3.1.5 Poptávka po technologii (tisk s vysokým rozlišením)

Na základě účasti na konferencích ISSE, ESTC a EMPC, které se zabývají oblastí mikroelektronických technologií, technologických řešení a novými technologiemi jsem se v průběhu řešení této práce profiloval a technologické řešení směřoval k požadavkům kolegů ze zahraničních i českých univerzit a kolegům z průmyslu. Průmyslové partnery jsem kontaktoval také na veletrzích v Mnichově a Norimberku, kde každoročně udržujeme kontakt s technologickými novinkami.

Výsledky v této oblasti jsou orientovány zejména na miniaturizaci, která však dosahuje rozlišení pod 150 μm se stejnými nanášenými materiály. Vyšší rozlišení dosahované současnými metodami bylo také prezentováno, avšak kvalita tisku zdaleka nedosahuje kvality výsledků této práce (kapitola 3.12).

3.1.6 Technologické znalosti

Znalosti z oblasti dispense a tlustovrstvové technologie jsem získal v rámci studia na VUT v Brně. Souvislosti mezi dalšími oblastmi vývoje UZD byly řešeny v rámci konzultací, seminářů, a mnoha měření v rámci laboratoří UMEL VUT v Brně. V mnoha oblastech jsem využíval rady kolegy Ing. Řezníčka a Ing. Jankovského.

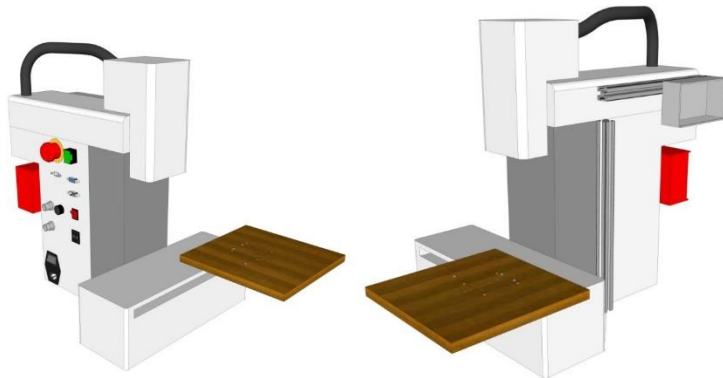
3.2 Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk

V průběhu vývoje metody pro nanášení TLV past s vysokým rozlišením bylo sestaveno pracoviště dispensního tisku a pro tuto oblast byla specifikována vhodná zařízení. Pracoviště je navrženo za účelem realizace testovacích struktur, měření parametrů a jejich optimalizace.

Pro polohování vyvíjené UZD hlavice byl zvolen poloautomatický polohovací robot F4200N. Zařízení je doplněno o dávkovací jednotku zajišťující distribuci tlakového vzduchu. Pracoviště je vybaveno optickým systémem pro online sledování procesu tisku.

3.2.1 Polohovací zařízení Fisnar F4200N

Dispensní robot Fisnar F4200N je využit z hlediska 3-osého polohování ultrazvukové dispensní hlavice.



Obr. 3.3 Dávkovací robot Fisnar F4200N, model pro konstrukci doplňků

Obr. 3.3 zobrazuje model konstrukce zařízení Fisnar F4200N a jeho úpravy. Pro dispensní robot bylo vyrobeno příslušenství uvedené v kapitole 3.15

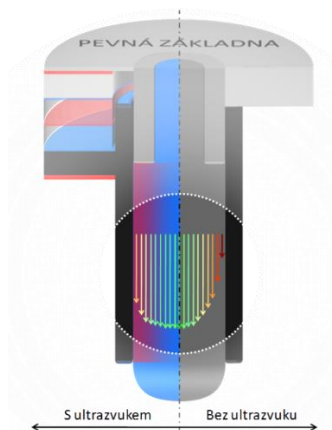
3.3 Nová metoda dispensního tisku

Dispensní tisk standardně znamená depozici materiálu ze zásobníku skrze transportní kapiláru na substrát. Na výstupu z kapiláry tvoří dávkované médium vrchlík, jehož tvar je závislý zejména na viskozitě dávkovaného média, tlaku a vnitřním průměru výstupní kapiláry.

Tento model funkce dispensního systému je dostačující pro systémy s rozlišením do 250 μm . Jakmile požadujeme tisk s vyšším rozlišením, rostou parazitní vlivy, které v důsledku vyšší míry integrace stále více ovlivňují kvalitu tisku. Zde je třeba uvažovat zejména vlastnosti dávkovaných médií, kdy je nutné počítat se vzájemnými vztahy mezi parametry viskózních materiálů, vnitřním průměrem výstupní kapiláry, tlaku pneumatického systému a vzdáleností kapilára – substrát.

U dispensních procesů s konfigurací pro tisk s vysokým rozlišením (pod 100 μm) je nutné uvažovat rostoucí vlivy jednotlivých parametrů. Na základě popisu optimalizačních možností dispensních parametrů uvedených v kapitole 2.3.2 je dále uveden princip nové metody UZD.

Nová metoda UZD je založena na přídavné energii působící prostřednictvím transportní kapiláry na dávkovaný materiál. Na transportní kapiláru jsou přenášeny mechanické kmity, které způsobují nárůst dynamického tření mezi kapilárou a mezní vrstvou pasty v průběhu jejího toku kapilárou. Toto tření v pastě vyvolává změny její reologie snižováním viskozity mezní vrstvy a tím umožňuje snazší průchod kapilárou za působení nižšího tlaku a dosažení rovnoměrnějšího tokového vrchlíku.



Obr. 3.4 Srovnání dispense s využitím ultrazvukové přídavné energie a standardního procesu

3.4 Základní princip ultrazvukové jednotky UZD

3.4.1 Parametry procesu dispense s UZ podporou

Dispense materiálů tenkou kapilárou je závislá na parametrech souvisejících s laminárním charakterem proudění.

Prvním podstatným omezením je **vnitřní průměr (d_{in})** kapiláry, který je z důvodu zvýšení rozlišení omezen na interval od 30 do 100 μm . Tento velmi malý vnitřní průměr kapiláry tak razantně zvyšuje citlivost systému na ostatní parametry.

Dávkované materiály jsou definovány svou **ždánlivou viskozitou (η)** a **tixotropním chováním**. Tento parametr není možné ovlivnit, ale je to vstupní parametr, od kterého se dále odvíjí nastavení celého systému.

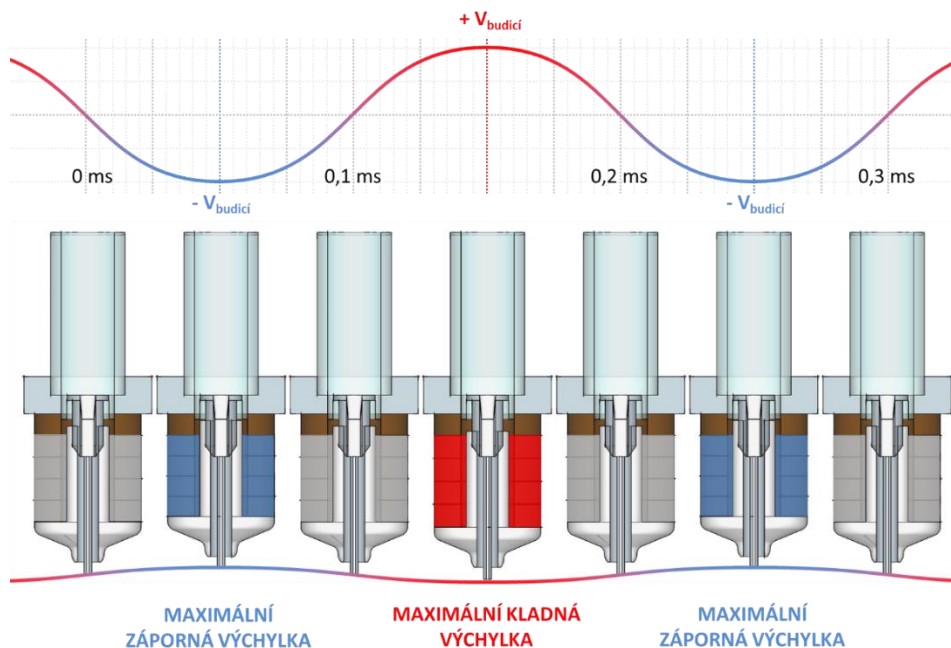
Citlivost a průchodnost dispense lze nastavit pomocí **tlakových poměrů (P)** uvnitř kapiláry, a **ultrazvukové podpory**. V souvislosti s těmito čtyřmi proměnnými probíhají změny charakteru laminárního proudění, respektive dochází k ovlivnění rozložení rychlosti tokových křivek v průřezu kolmém na osu toku kapilárou.

3.4.2 Základní funkční bloky UZD

Obecně zařízení využívající působení ultrazvuku pracují se **zdrojem signálu** a určitým elektronickým prvkem pro úpravu amplitudy signálu na požadovanou hodnotu, v našem případě **zesilovač**. Tento signál je následně přiveden na aktivní prvky, které jsou v případě této práce tvořeny **piezokeramickými rezonátory**. Aktivní prvky slouží pro převod elektrického signálu na mechanické kmity zajišťující požadovanou funkci zařízení. Mechanické kmity vyvolané na základě deformace rezonátorů je nutné transformovat do cíleného místa a k tomuto účelu je využíván **akustický transformátor**. Tato součást mechanicky spojuje zdroj mechanických kmitů a cílenou oblast, do které mechanické kmity přivádí. V případě UZD je cílem **transportní kapilára**, která svými mechanickými kmity již ovlivňuje reologické vlastnosti nanášeného materiálu prostřednictvím vzájemného styku v mezní oblasti.

3.4.3 Znázornění funkce UZD hlavičky

Na obr. 3.5 je znázorněna mechanická odezva ultrazvukové hlavičky prostřednictvím rezonančního systému na přivedený budicí signál. Sinusový signál zobrazuje 2 extrémy. + $V_{budicí}$, což je kladné budicí a - $V_{budicí}$, záporné budicí napětí. Při dosažení těchto extrémů zároveň dochází k maximálnímu vychýlení / rozměrové deformaci UZD systému. Tato deformace se projevuje sousými kmity transportní kapiláry.



Obr. 3.5 Mechanická odezva UZD na budicí signál

3.4.4 Výpočet prodloužení piezokeramických rezonátorů

Pro použitý materiál NCE 80 výrobce Noliac je parametr piezoelektrické konstanty $d = 240 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$. Poměrné prodloužení je v této práci označeno l_p .

$$\text{piezoelektrická konstanta} = \frac{\text{poměrné prodloužení piezokeramiky}}{\text{intenzita elektrického pole}}$$

$$l_p = d \cdot E$$

$$l_p = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \frac{\text{kV}}{\text{m}} = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{C}}$$

$$l_p = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \cdot 10^3 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}}$$

Rovnice 3.1 Poměrné prodloužení piezokeramik l_p

$$l_p = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m při } E = 10 \text{ V/mm}$$

$$\text{poměrné prodloužení piezokeramiky v rezonanci } l_R = Q_m \cdot l_p$$

Rovnice 3.2 Prodloužení piezokeramik v rezonanci l_R

Q_m je mechanický faktor kvality, který z hlediska piezokeramických rezonátorů dosahuje hodnoty až 1000. Tento faktor však dosahuje hodnoty 1000 v ideálních případech, samotných piezokeramik a bez zatížení. Mechanický faktor je silně ovlivněn konstrukcí funkčních bloků, které jsou pomocí piezokeramických rezonátorů uváděny do pohybu. Celkový mechanický faktor pak vykazuje pouze zlomek původního mechanického faktoru Q_m samotných piezokeramik. Z hlediska frekvenční charakteristiky UZ jednotky například obr. 3.2 je možné vidět, že faktor se pohybuje do hodnoty 5.

$$l_{pR} = 5 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

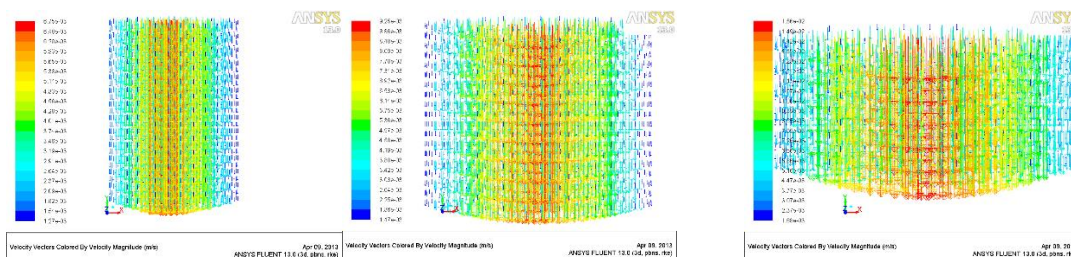
$$l_{pR} = 12 \text{ } \mu\text{m při } E = 10 \text{ V/mm}$$

Rovnice 3.3 Prodloužení piezokeramik sestavy v rezonanci

3.4.5 Model transportní kapiláry, simulace

Pro provedení simulace byl zadán průměr transportní kapiláry a tlak působící na materiál o určité viskozitě. Na základě těchto parametrů byla provedena simulace chování pasty v průběhu její depozice skrze kapiláru. Obr. 3.6 uvádí výsledky simulace toku média kapilárou, kde je patrné nehomogenní rozložení tokových křivek. Tento charakter tokových křivek je způsoben třením dávkovaného materiálu na mezní vrstvě (kapilára – médium). Tření je možné redukovat novou metodou využívající ultrazvuk ke generování mechanických kmitů, jak je uvedeno v kapitole 3.3.

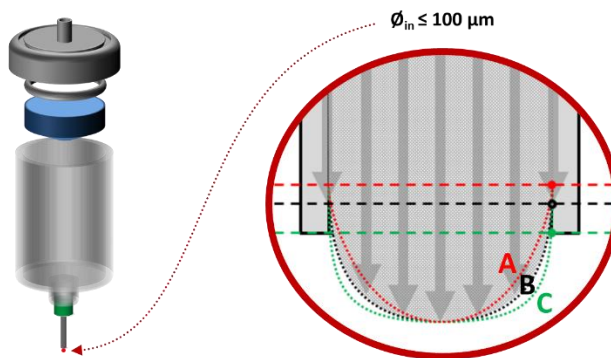
Vstupní parametry pro simulaci jsou parametry dispensního procesu. Jedná se o tlak, jehož hodnota pro simulaci byla nastavena na 1 atm. Viskozita dávkovaného média byla nastavena na hodnotu 200 Pa.s a vnitřní průměry kapilár jsou 30, 50 a 100 μm . Ostatní parametry pro simulaci jsou převzaty z materiálových konstant v simulačním programu, přičemž jako materiál kapiláry byla zvolena ocel.



Obr. 3.6 Simulace toku dávkovaného média skrze transportní kapiláru o průměru 30, 50 a 100 μm

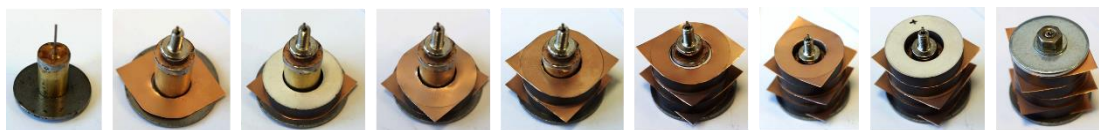
3.5 Oblast působení vlivu UZ v transportní kapiláře

Jak je uvedeno v kapitole 3.3, práce se zabývá optimalizací průtoku dávkovaného média skrze výstupní kapiláru. Obr. 3.7 vymezuje oblast, která je posledním stupněm možné optimalizace reologických vlastností média před jeho výstupem z dispensního systému. Detail na obr. 3.7 znázorňuje řez kapilárou, kde jsou ohraničeny tři oblasti (A, B, C). Hranice oblastí vymezují plochu vrchlíku vytlačeného materiálu za různých podmínek upravujících hydraulický tok. Tato oblast, která se nachází na samotném konci dispensního procesu, je vhodná pro lokální ovlivnění reologických vlastností pasty, jelikož zde ovlivněná pasta již bude deponována na substrát. Z tohoto důvodu byl tento prostor zvolen pro aplikaci mechanických kmitů.



Obr. 3.7 Parametry vyplývající z konstrukce systému a vlastností dávkovaného média (průměr, viskozita)

3.6 První vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD1

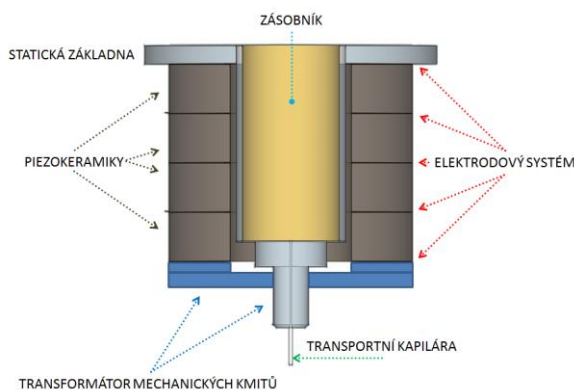


Obr. 3.8 Sestava UZD1

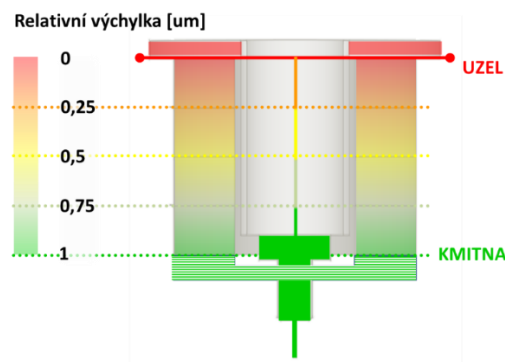
3.6.1 Realizace UZD jednotky

Konstrukce UZD jednotky

Statickou základnu tvoří kovová podložka, která je spojena s mosazným zásobníkem pájeným spojem. Výstup zásobníku je uzavřen měděným plechem o tloušťce 150 μm , který je také přiletován. Plechová membrána je ve svém středu opatřena výstupním otvorem o průměru přibližně 1000 μm , který slouží pro vsazení kapiláry o průměru 750 μm v membráně fixované dvousložkovým epoxidem. Kapilára byla osazena metrickým šroubem M3 provrtaným v ose průměrem 1000 μm . Šroub je na kapiláru nalepen pomocí dvousložkového epoxidu.



Obr. 3.9 Návrh modelu UZD1

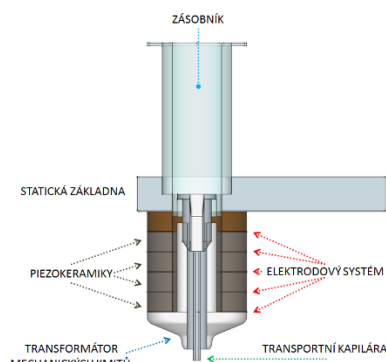


Obr. 3.10 Znáznornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD1

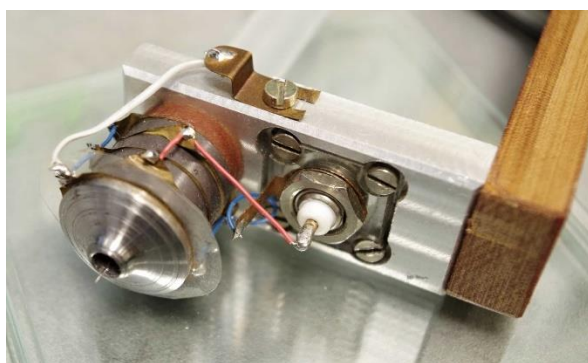
3.6.2 Shrnutí dosažených výsledků s UZD1

Na základě kontaktního testu rezonance bylo ověřeno dosažení přenosu kmitů s vysokou účinností až na transportní kapiláru, kde dochází k ovlivnění pasty. Konstrukční řešení UZD1 bylo svou jednoduchou konstrukcí určeno výhradně pro ověření principu. Právě jednoduchost konstrukce byla na úkor použitelnosti hlavice v běžném dispensním procesu. Z tohoto důvodu neumožňoval systém UZD1 jednoduchou záměnu kapiláry za účelem navýšení rozlišení. Univerzálnost řešení vyžaduje učinit kompromis mezi efektivitou přenosu ultrazvukové energie a možností použití standardních dílů (zásobníku a transportní kapiláry).

3.7 Druhý vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD2



Obr. 3.11 Návrh modelu UZD2



Obr. 3.12 Realizace UZD2

3.7.1 Realizace UZD2

Konstrukce UZD jednotky

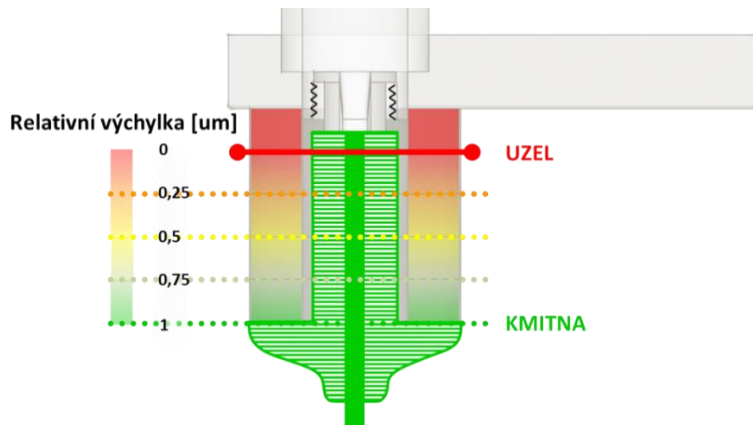
Statickou základnu tvoří duralový blok, který slouží zároveň jako nosný prvek pro celý systém. Kolmo je spojena s upevňovacím dílem do konzole na dispensním robotu. V těle základny je zapuštěn BNC konektor pro připojení budicího signálu (elektricky izolovaný od základny). Vodiče propojují kladný (červený)

a záporný (modré) pól rezonančního systému. Šedým vodičem je elektricky propojen transformátor mechanických kmitů se základnou.

Popis chování systému

Systém z hlediska funkce zaznamenal hlavní změnu v provedení transformátoru mechanických kmitů, který přenáší mechanické kmity na kapiláru ukotvenou uvnitř rezonančního systému. Uspořádání má hlavní výhody z hlediska možnosti použití kartuše s velkým objemem (průměr zásobníku), protože rezonanční systém je umístěn až na jeho výstupu.

Systém při testech vykazuje přenosy mechanických kmitů, ale systém kmity velmi utlumuje a není tak přenesena dostatečná energie z hlediska efektivity ultrazvukové podpory výtlačku pasty.



Obr. 3.13 Znáznornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD2

3.7.2 Shrnutí dosažených výsledků UZD2

Kontaktní test provedený na funkčním vzorku UZD2 indikuje vyšší útlum než u provedení UZD1. Výtlač pasty byl však velmi málo ovlivněn a z toho důvodu bylo nutné přistoupit ke změně dispensního ústrojí od vyústění ze zásobníku. Transformátor mechanických kmitů potřebuje mechanicky tužší spojení kapiláry s dispensní kartuší, aby docházelo k rozměrové deformaci transportní kapiláry samotné. Přemístění zásobníku nad rezonanční systém a vnoření mechanického transformátoru do rezonančního systému naopak bylo zachováno v dalším vývojovém stupni UZD3. Kombinace těchto poznatků byla zapracována při vývoji UZD3.

3.8 Třetí vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD3

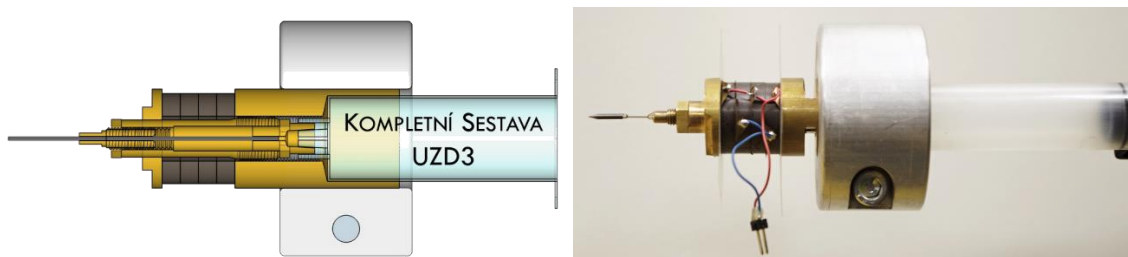
3.8.1 Realizace UZD3

Konstrukce UZD jednotky

Pro provedení UZD3 byl proveden kompletně nový návrh konstrukce. Tato změna umožnila zachování možnosti umístění UZD jednotky na samotném výstupu dispensního zásobníku a zároveň zajištění efektivity přenosu mechanických kmitů na transportní kapiláru. Jednotlivé fáze složení sestavy UZD3 znázorňuje obr. 3.15, kde jednotlivé součásti sestavy jsou označeny čísly – viz. Tabulka 4.

Sestava UZD3 Kompletní sestava

Tato konstrukce ve výsledné podobě (obr. 3.14) umožňuje využití standardních dispensních zásobníků, ale z důvodu efektivity přenosu mechanických kmitů je nutné využití speciální kapiláry. Z hlediska rozlišení dávkovací metody však standardně nejsou k dispozici kapiláry o průměrech pod 100 μm , čímž je univerzálnost tohoto řešení prakticky maximální, kdy jsou využity všechny prvky dispensního systému. Tyto jsou pouze doplněny o speciální hlavici umístěnou na výstup dispensního zásobníku.

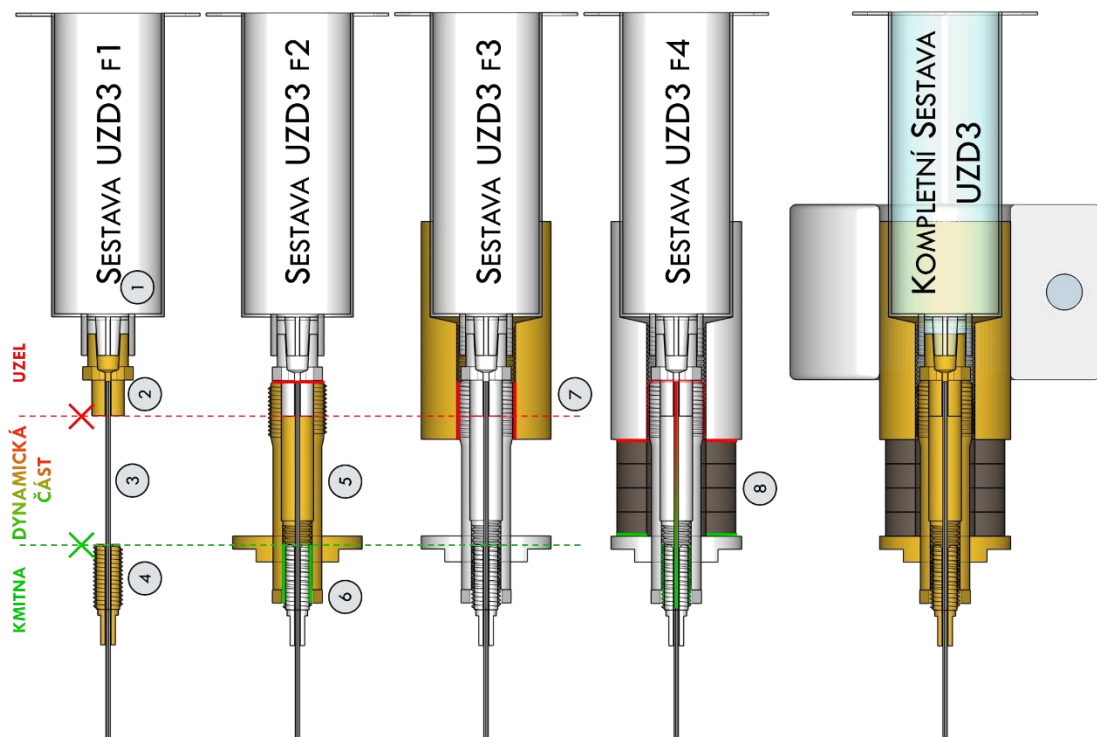


Obr. 3.14 Kompletní sestava UZD3, Model / Funkční vzorek

Kompletní sestava uvedená na obr. 3.14 je osazena duralovou konzolí, která je přizpůsobena pro montáž na dispensní robot Fisnar F4200N. Tím je umožněno testovat hlavici ve standardním dispensním procesu.

Tabulka 4 Označení součástí UZD3

Číslo	Součást
1	Dispensní zásobník
2	Mosazná výstupní příruba dispensního zásobníku
3	Ocelová transportní kapilára
4	Mosazná příruba pro spojení transportní kapiláry (3) a transformátoru mechanických kmitů (5)
5	Mosazný transformátor mechanických kmitů a šroub pro předeptnutí piezokeramických rezonátorů (8).
6	Mosazná aretační matice
7	Mosazné pouzdro sloužící jako statická základna prostřednictvím jeho fixace k transformátoru mechanických kmitů (5) a dispensnímu zásobníku (1).
8	Piezokeramický rezonanční systém



Obr. 3.15 Kompletace sestavy UZD3

Budicí systém

Budicí systém nedoznal změn v zesilovači signálu vedoucího z generátoru a to vzhledem ke stavu hlavice. Vzhledem ke stádiu konstrukčního provedení není prozatím možné definovat rezonanční frekvenci finálního

systému, a z tohoto důvodu je jako zdroj signálu nadále využíván generátor s možností nastavení libovolného průběhu buzení. Tento signál je poté zesílen již zmiňovaným provedením s OPA 445AU v kapitole 3.7.1. Piezokeramický rezonanční systém (8) je buzen střídavým signálem s průběhem sinus. Frekvence budícího signálu je závislá na mechanické konstrukci. Proto je v rámci vývoje tato hodnota spíše orientační a v rámci jednotlivých vývojových stupňů UZD1 - UZD3 se pohybovala od 9 kHz po 28 kHz.

3.8.2 Shrnutí dosažených výsledků s UZD3

Při návrhu konstrukce UZD3 byly zohledněny poznatky z testů UZD2 a proto bylo přistoupeno ke konstrukci hlavice, jejíž součástí je také transportní kapilára. Hlavice jako celek je poté prostřednictvím kuželové dosedací plochy spojena s výstupem dispensním zásobníkem a fixována závitem, přičemž na tento spoj je kladen pouze požadavek tlakové těsnosti.

Kontaktní test provedený na funkčním vzorku UZD3 již vykazuje vysokou intenzitu přenesených mechanických kmitů na transportní kapiláru. Tento výsledek byl zajištěn zejména celokovovou konstrukcí hlavice s lepenými spoji. Pozice jednotlivých komponent umožňuje horní polohu dispensního zásobníku.

3.9 Tisk pasty s UZD3

Jako reprezentant pro tisk byla zvolena tlustovrstvová, elektricky vodivá pasta 9912-K od výrobce ESL Europe. Tuto pastu jsem vybral z důvodu jejího širokého využití pro vodivé motivy pro HIO v laboratoři mikroelektronických technologií UMEL, VUT v Brně. Metoda ultrazvukové optimalizace tisku je schopna pracovat právě se standardními materiály pro TLV technologii, kdy umožňuje lokální vytvoření motivu s vysokým rozlišením.

Parametry tiskového zařízení

Kapilára, vnější průměr 150 μm , vnitřní průměr 75 μm . Rychlost posuvu 1200 $\mu\text{m/s}$, tlak pneumatického systému 1,2 atm, vzdálenost kapilára – substrát 50 μm .

Následující obrázek (obr. 3.16) dokumentuje vliv UZD hlavice na tisk pasty. V průběhu tisku byly všechny nastavované parametry neměnné, docházelo pouze aktivaci/deaktivaci UZ podpory.

Obr. 3.16 dokumentuje situaci, kdy v zelené oblasti byl tisk s ultrazvukovou podporou, proto je v zelené oblasti tištěná čára celistvá. Červená přerušovaná čára označuje hranici, kdy bylo vypnuto buzení UZ podpory. V červené oblasti je vidět nesouvislá tištěná čára, která je výsledkem nedostatečného výtlaku způsobeného neaktivitou buzení.



Obr. 3.16 Vliv vypnutí / sepnutí buzení ultrazvukové hlavice na tisk pasty

Druhá část dokumentuje situaci, kdy v červené oblasti byl pouze tisk bez ultrazvukové podpory, proto je v červené oblasti tištěná čára přerušovaná. Zelená přerušovaná čára označuje hranici, kdy bylo zapnuto UZ buzení hlavice. V zelené oblasti je vidět souvislá tištěná čára, která je výsledkem dostatečného výtlaku způsobeného navýšením efektivity tiskových parametry právě aktivním buzením hlavice.

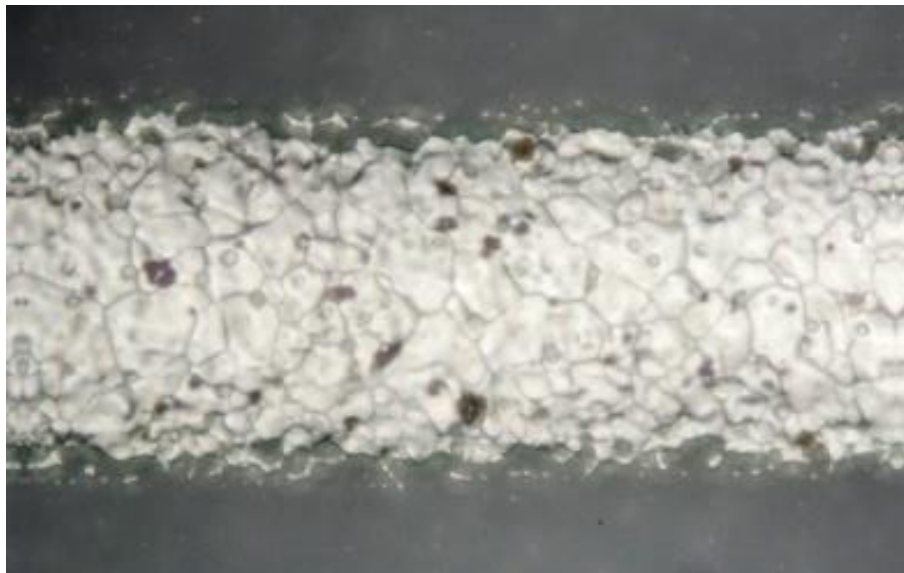
3.10 Rozlišení a parametrické vlastnosti UZ dispenseru

Z hlediska rozlišení tato metoda využívající UZD hlavici aktuálně dosahuje rozlišení čára – mezera 75 μm . Toto rozlišení je možné dosáhnout se standardní tlustovrstvovou pastou o velikosti částic do 5 μm . Dispenser je přitom osazen výstupní kapilárou o vnitřním průměru 42 μm .

Tyto parametry jsou z hlediska aktuálních potřeb výzkumných a experimentálních skupin výhodou oproti jiným běžně užívaným metodám (sítotisk, dispensing, šablonový tisk).

3.10.1 Dosažené parametry tisku

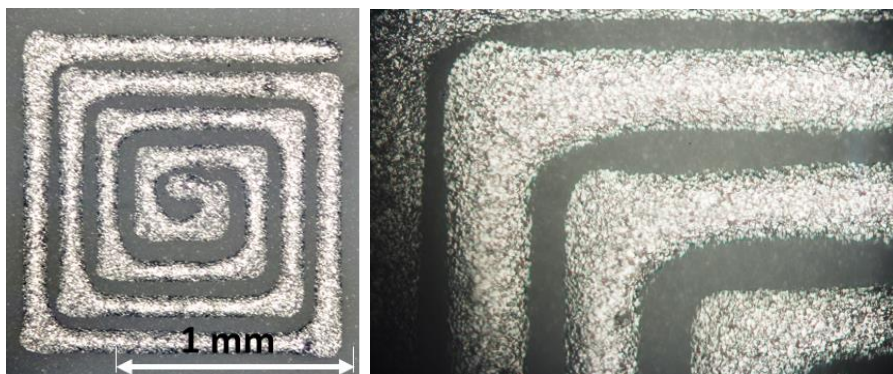
Parametry tisku dosahují stabilní šířky čáry 60 μm , kterou bylo možné bez dodatečných výškových procesních korekcí realizovat. Šířka tištěného motivu je v celé délce tisku pravidelná, s tolerancí $\pm 10\%$ tedy 12 μm . Do jisté míry lze zajistit toleranci pod $\pm 5\%$, ale přitom je třeba dodržet parametry tisku a tiskového zařízení uvedené v kapitole 2.3.



Obr. 3.17 Struktura tištěného motivu a pravidelnost jeho šířky

3.10.2 Subrutiny pro optimalizaci tisku rohů motivu

Tyto pohybové algoritmy souvisejí s problémem uvedeným v disertační práci, kde je popsán vztah mezi vztyčnou plochou dávkovaného média a povrchem substrátu. V souvislosti s vysokým rozlišením narůstá vliv změny adheze, kdy snížení adheze menší vztyčné plochy je nutné kompenzovat snížením adheze na výstupu z transportní kapiláry pomocí principu UZD (kapitola 3.3).



Obr. 3.18 Provedení rohů bez optimalizace trajektorie (varianta A)

3.11 Realizovaná ultrazvuková dispensní hlavice

Nová metoda optimalizace reologických vlastností dávkovaného média využívá speciální hlavici (UZD) vyvinutou v rámci disertační práce. Hlavice byla vyvinuta v rámci několika vývojových stupňů.

3.11.1 Jednotlivé vývojové stupně ultrazvukové dispensní hlavice



Obr. 3.19 Jednotlivá provedení UZD1, UZD2, UZD3

Tabulka 5 Srovnání jednotlivých provedení UZD

UZD1	+ Efektivita přenosu kmitů (Cu membrána / pájený spoj)
	+ Velmi malé rozměry
	- Improvizované provedení zásobníku
	- Problematická konstrukce (reprodukovatelnost)
	- Verze bez mechanických prvků pro přizpůsobení
UZD2	+ Univerzálnost řešení (kartuše, kapilára)
	+ Malé rozměry
	+ Snadná aplikace na polohovacím robotu
	- Vysoký útlum mechanických kmitů (plastová příruba kapiláry)
	- Průměr kapiláry je omezen (komerčně dostupné až nad 100 μm)
UZD3	+ Použití standardní kartuše
	+ Efektivita přenosu kmitů (kovové díly + 2 epoxidové spoje)
	+ Dosažitelné rozlišení, lepší než 60 μm
	- Speciální konstrukce / díly
	- Větší rozměr
	- Vyšší hmotnost (292 g)

Tabulka 5 uvádí srovnání jednotlivých vývojových stupňů UZD, přičemž jsou barevně rozlišeny jejich zásadní klady a zápory. V průběhu stavby jednotlivých vývojových stupňů UZD byla nejdříve ověřována doslova základní funkčnost sestavy, následně efektivita uspořádání jednotlivých dílů a jejich materiálové provedení. Po ověření vlivu pomocí funkčního vzorku UZD1 byl vyvinut univerzální UZD2 s možností využití standardních dílů tlakových dávkovacích systémů.

Systém UZD3 sloučil potřebnou efektivitu přenosu kmitů závislou zejména na použitých materiálech. Pro jednoduchost použití s běžnými dispensery je zachováno použití běžných kartuší. Za těchto podmínek je UZD3 schopna dosáhnout výsledků s rozlišením lepším než 60 μm při využití standardních TLV past (velikost částic do 5 μm , viskozita 200 Pa.s)



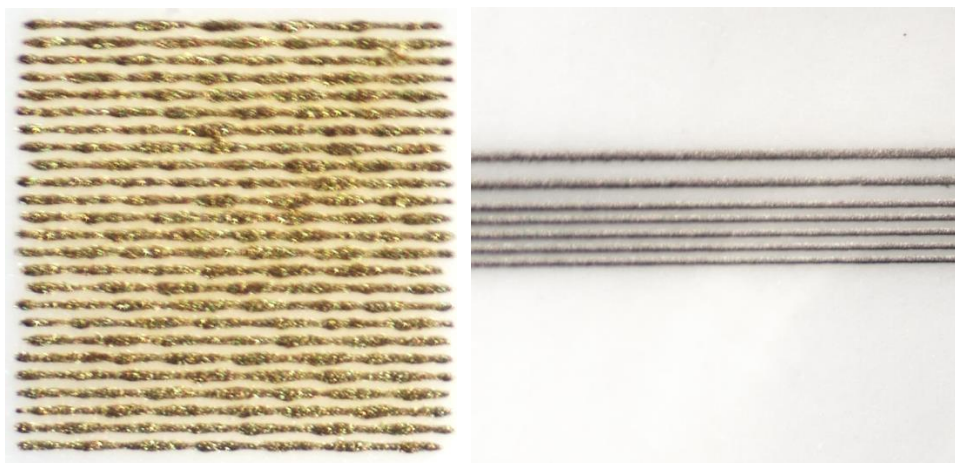
Obr. 3.20 Reálné provedení kapiláry s vnitřním průměrem 250 μm (vlevo) a 42 μm - kapilára wire-bonding (vpravo)

Vzdálenost kapilára – substrát / korekce osy Z – parametr dávkovacího systému

Tento parametr je nutné snižovat vzhledem ke snaze minimalizovat objemové množství nanášeného média. Vzhledem k aktuální hodnotě odstupe přibližně 50 μm při tisku s UZD3 a známou nerovností povrchu keramických substrátů je nezbytné používat alespoň softwarovou korekci tiskových dat pro osu Z, která zajistí stabilní podmínky pro tisk. Pro vzdálenosti menší než 25 μm je nezbytné již využívat automatizovanou optickou nebo pneumatickou jednotku výškové korekce UZD hlavice.

3.12 Srovnání standardních systémů se systémem UZD

Následující obrázek nabízí srovnání výsledku tisku pomocí UZD 3 a výsledku tisku pomocí sítotiskové technologie s vysokým rozlišením (75 μm). Tyto sítotiskové výsledky jsou v současné době světovými výrobci prezentovány jako maximální dosažitelné rozlišení. [19], [20]



Obr. 3.21 Nafocené vzorky: vlevo sítotisk Heraeus C5810 L03-02, rozlišení 75 μm , vpravo nová metoda UZD3 65 - 75 μm

Obr. 3.21 uvádí názorné srovnání výsledku. Detaily tištěného motivu jsou zobrazeny na následujícím obrázku, kde je patrný vliv síťoviny při tisku s rozlišením pod 150 μm . Výsledek UZD3 není mezní hranice rozlišení dispensního tisku. Tisk s vyšším rozlišením pod 75 μm však již vyžaduje optimalizaci.

3.13 Vyhodnocení vlivu UZD systému na tisk tixotropních materiálů

UZD systém realizovaný v rámci této práce **prokázal vliv** na dávkovaný materiál, přičemž poslední vývojový stupeň UZD3 dosahuje tiskového rozlišení pod 75 μm . Doposud v rámci řešené problematiky je dosahováno rozlišení 150 μm , přičemž vyššího rozlišení se dosahuje nepřímo leptáním, případně vypalováním požadované struktury laserem.

Vliv UZD jednotky na dávkovaný materiál lze vysvětlit následovně. Transportní kapilára s vnitřním průměrem pod 100 μm klade uvedeným materiálům (velikost částic 5 μm , viskozita 200 Pa.s) velký **hydraulický odpor**. Ten je možné redukovat, a právě takový vliv nabízí UZD jednotka změnou viskozity v mezní vrstvě **kapilára – pasta**. Tím zvyšuje **míru propustnosti** kapilár s malými vnitřními průměry. Zároveň je nutné řešit vzhledem ke změně reologických parametrů dávkovaného média rostoucí vliv ostatních parametrů tiskového procesu, které souvisejí také s vyšším rozlišením. Jedná se zejména o odstup kapiláry od substrátu, kde se pohybujeme již na rozmezí 30 – 50 μm . Nezanedbatelné je také řešení trajektorie tiskové hlavice (kapitola 3.10.2). Speciální polohovací algoritmy pro jednotlivé části tištěného motivu zajišťují kompenzaci vlivů vyplývajících z adhezní podmínky uvedené v disertační práci.

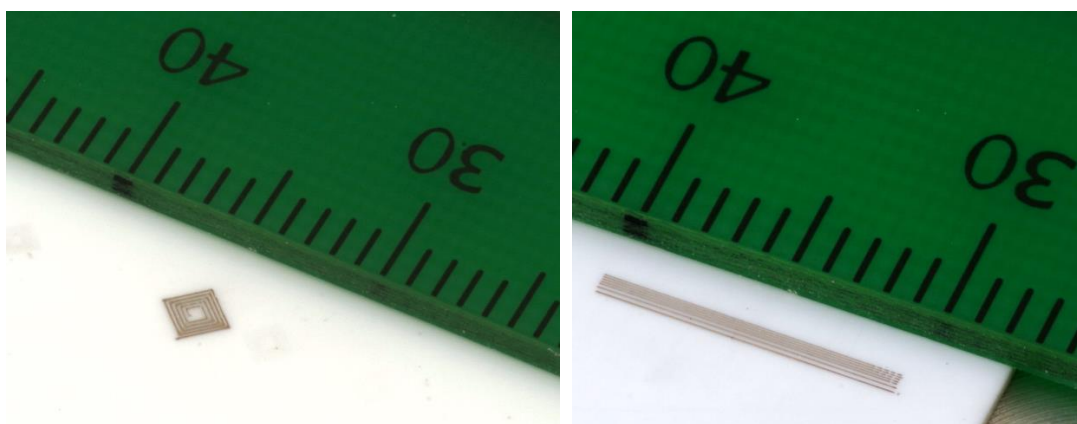
3.14 Výsledky dosažené optimalizací dispensního tisku

Obr. 3.22 dokumentuje tisk s kapilárou o vnitřním průměru 42 μm a tiskovým rozlišením 75 μm . Tyto výsledky zároveň dokumentují pravidelnost šířky čáry, která je ve srovnání se sítotiskem značnou výhodou (obr. 3.21).



Obr. 3.22 Tisk čar s mezerami 200/100/75μm, rychlost 1,5 mm/s, šířka čáry 75 μm, minimální mezera 25 μm.

Pro názornou ukázkou obr. 3.23 uvádí srovnání tištěného motivu pomocí UZD3 s milimetrovým měřítkem. První případ je cívka a druhý případ jsou čáry s rozlišením 75 μm, které obsahují startovací sekvenci v podobě přerušovaného tisku, který přechází po sepnutí UZD jednotky v tisk bez přerušení.



Obr. 3.23 Testovací motivy

3.15 Shrnutí výsledků doktorské práce

Doktorská práce dosáhla v plné míře splnění zadaného cíle „Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie“.

Výsledné parametry tisku dokumentují úspěch dané metody v předepsaných aplikacích v tlustovrstvové technologii. Zde tato nová metoda umožňuje dosažení rozlišení **při tisku TLV past 75 μm**, rychlostí přibližně 1,2 mm/s. Oproti tomu síťotiskové metody dosahují podobné kvality tisku **až při rozlišení 250 μm** a více. Metody umožňující toto vysoké rozlišení, například *jet dispensing*, naopak neumožňují dosažení ostatních parametrů tisku (tloušťka a rovnoměrnost).

Dílčího cíle „Výzkum vlivu ultrazvukového působení na chování tixotropních materiálů“ bylo dosaženo postupným modelováním, simulací i praktickými výsledky. Tyto části práce jsou uvedeny v kapitolách 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.

Cíl „Návrh a konstrukce dispensní hlavice s ultrazvukovou optimalizací“ byl splněn v přímé návaznosti na výzkum UZ principu optimalizace. Kapitoly 3.6, 3.7 a 3.8 popisují realizaci jednotlivých vývojových stupňů UZD jednotek.

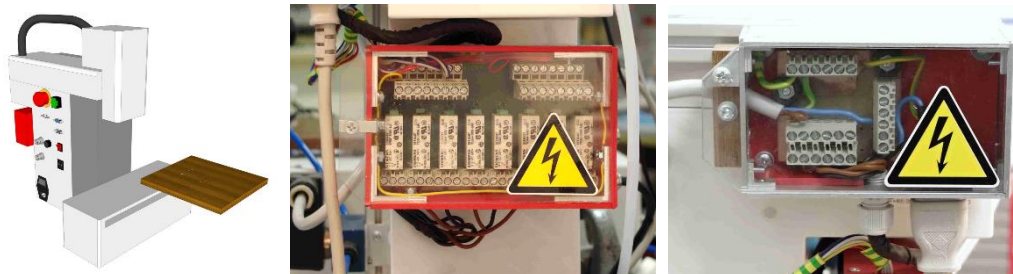
Cíl „Aplikace ultrazvukového principu pro soustředění přídavné energie v místě dávkovací kapiláry“ je realizován prostřednictvím UZD jednotek vlastní výroby. Ultrazvuková optimalizace je popsána v kapitolách 3.9, 3.10 a 3.12. Tyto kapitoly popisují vliv UZ podpory a nabízejí srovnání výsledků tisku se síťotiskovým výstupem, kde je patrné dosažení kvalitnějšího výstupu tištěného pomocí UZD3 (obr. 3.21)

„Optimalizace tokové křivky nanášeného materiálu uvnitř dispensní jehly“ je další dílčí cíl práce, který prakticky popisuje chování tixotropního materiálu v transportní kapiláře dispensního procesu. Materiál je přídavnou energií ovlivněn z hlediska rozložení tokových křivek, což je blíže popsáno v kapitolách 3.2, 3.3.

Cíl „*Simulace parametrického modelu proudění média kapilárou*“ byl ve spolupráci s Ing. Psotou proveden pro tři hodnoty vnitřních průměrů transportních kapilár. Rozložení tokových křivek (kapitola 3.4.4) vykresluje nehomogenní charakter proudění uvnitř kapiláry, který přímo indikuje místo, kde dochází k ovlivnění rychlosti toku pasty / viskozity na základě jejího tixotropního charakteru.

Tato kapitola uvádí přehled hlavních fází vývoje ultrazvukové dispensní metody.

Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk



Obr. 3.24 Úpravy dispensního robotu F4200N (kapitola 3.2)

Parametry zařízení pro dispens:

- **Spínací skříň** obsahuje 8 releových spínaných větví připojených na vstupně výstupní rozhraní dispensního robotu
- **Rozváděčová skříň** slouží pro napájení spínaných větví napětím 230 V~



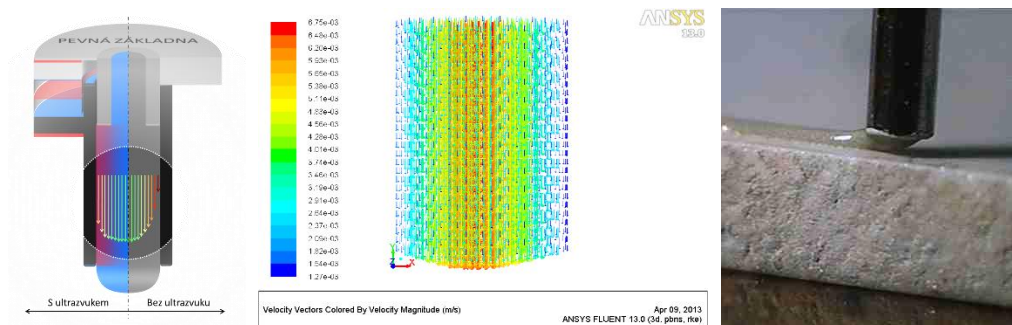
Obr. 3.25 Jednotlivé provedení fixačních stolků (kapitola 3.2)

Parametry fixačních stolků:

Tabulka 6 Parametry vyrobených fixačních stolků

	Kartitový fixační stůl	Duralový fixační stůl
Maximální velikost substrátu	10 x 10 mm	5 x 5 mm
Způsob fixace	Vakuová	Vakuová
Dorazy	Statické ocelové	Excentrické ocelové
Rovinnost	20 μm / 1 cm	2 μm / 1 cm

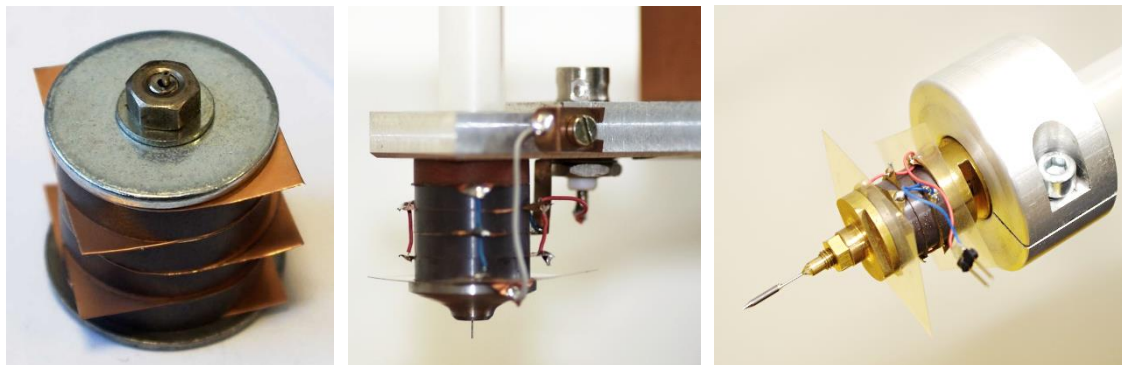
Návrh nové metody, testování, simulace



Obr. 3.26 Návrh provedení UZD jednotky, simulace, tisk (kapitoly 3.3, 3.4, 3.5)

Návrh nové metody pro ultrazvukovou optimalizaci vycházel z prvotní myšlenky během práce s TLV materiálem, následoval návrh funkčního modelu se základní simulací proudění v kapiláře. Dále byly

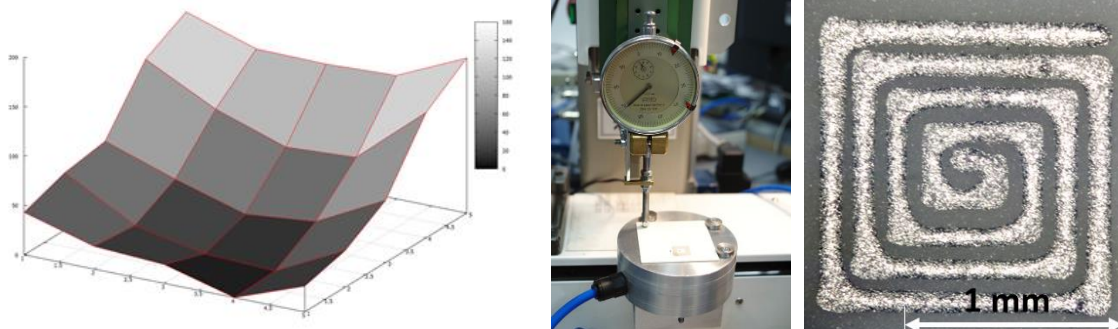
prostudovány zdroje mechanických kmitů (piezokeramické materiály), které byly zvoleny jako funkční prvky pro stavbu UZD. Vyrobil jsem UZD jednotky, které jsem postupně optimalizoval za účelem získání co nejvyšší efektivity a optimálního konstrukčního uspořádání.



Obr. 3.27 Provedení UZD1, UZD2, UZD3 (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8, 3.11)

Tyto vývojové stupně byly optimalizovány na základě vlastních myšlenek, které vycházely z požadavků na danou technologii. Zejména se jednalo o zvýšení rozlišení běžných metod (hraniční 150 μm) společně s dosažením opakovatelnosti. Vývojový stupeň UZD3 splnil požadavky na tuto technologii.

Měření, funkční doplňky



Obr. 3.28 Korekční jednotka osy Z, subrutiny pro tisk rohů.

V průběhu vývoje a následného testování technologie i dílčích konstrukčních uspořádání byly zjišťovány nové technologické hranice, kterými je třeba se dále zabývat pro možnosti dosažení rozlišení pod 50 μm . Za tímto účelem bylo provedeno několik testování, návrhů a měření v oblasti rovinnosti substrátu, korekce pohybu v ose Z, čistící proces kapiláry, řízení tlaku i optimalizační algoritmy pro tisk rohů.

Výsledné tisky



Obr. 3.29 Ukázka tisku s rozlišením 75 μm

Je zřejmé, že z provedených měření plyne:

Výsledné parametry tisku dokumentují splnění cíle doktorské práce vytvořením nové metody v předepsaných aplikacích v tlustovrstvové technologii. Zde tato nová metoda umožňuje dosažení rozlišení při tisku TLV past 75 μm , rychlostí přibližně 1,2 mm/s. Parametry tiskových výstupů metody využívající ultrazvukovou optimalizaci toku média transportní kapilárou jsou co do kombinace parametrů komerčními metodami nedosažitelné. Jedná se o *tiskové rozlišení, tloušťku nanášené vrstvy, použití standardních materiálů z oblasti TLV past a míru shody tištěného motivu s návrhem.*

3.16 Patentování nové metody UZD dispense

Číslo přihlášky: 2010-858

Číslo dokumentu: 303451

Datum přihlášení: 24.11.2010

Název: **Nanášecí ústrojí dispenzního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů**
(EN: Dispersion device application mechanism for selective application of viscous materials)

Příhlašovatel/Maji tel: Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ

Původce: Szendiuch Ivan Doc. Ing. CSc., Brno, CZ
Buršík Martin Ing., Zlín, CZ
Jankovský Jaroslav Ing., Brno, CZ
Řezníček Michal Ing., Nadechlevice, CZ

4. - poplatek zaplacen

MPT: B 05 C 5/00

Datum zveřejnění: 19.09.2012

Datum udělení patentu: 08.08.2012

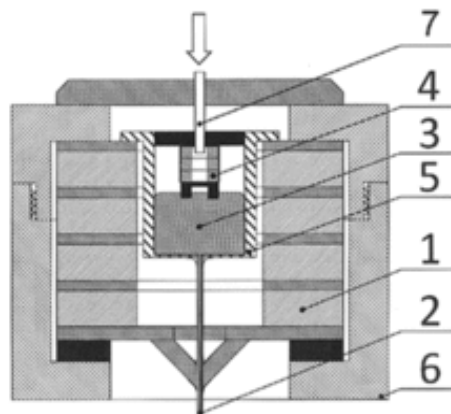
Datum publikace patentu: 19.09.2012

Stav: Platný dokument

Druh: PV národní s žádostí o udělení patentu

Anotace (CZ): Nanášecí ústrojí (6) dispenzního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů na organické i anorganické substráty v elektronice a strojní výrobě, které je opatřeno nejméně jedním zdrojem ultrazvuku (1, 4), kde zdroj ultrazvuku (1) je spojený s nanášecí kapilárou (2) a přídatný zdroj ultrazvuku (4) je umístěn na nádobce (5) s nanášeným materiálem (3).

Anotace (EN): The present invention relates to a dispersion device application mechanism (6) for selective application of viscous materials to both organic and inorganic substrates in electronics and mechanical production, wherein the device is provided with at least one ultrasound source (1, 4) wherein the ultrasound source (1) is connected with an application capillary (2) and the additional ultrasound source (4) is located on a tank (5) containing material (3) to be applied.



V průběhu vývoje nové metody byla podána patentová přihláška nové metody nanášení využívající ultrazvuku (24.11.2010). Patent byl udělen 08.08.2012. Jednalo se o udělení českého patentu. [25]

4 Závěr

Cíl práce:

Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie.

Disertační práce řeší **optimalizaci nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie**. V rámci práce byla nastudována problematika jak z literárních zdrojů (uvedeny vždy na konci daných kapitol), tak z účasti na konferencích. S využitím těchto zkušeností z oblasti tlustovrstvových technologií byla navržena nová metoda pro aplikaci přídavné UZ energie do objemu média dávkovaného pomocí dispensního pneumatického systému (kapitola 3.3). Vývoj technologického provedení tiskové hlavice s ultrazvukovou podporou lze rozdělit do jednotlivých kroků, které vytvořily podmínky pro výzkum jednotlivých vlivů působících v dispensním procesu.

V první fázi jsem **vytvořil pracoviště** pro dispensní tisk. Toto jsem dále přizpůsobil pro ovládání funkčních bloků doplňujících standardní funkce dispensního robota. Dispensní robot tak byl vybaven příslušenstvím umožňujícím tisk s vysokým rozlišením, zejména fixačním stolem a spínací elektronikou pro automatizaci procesu. (kapitola 3.2).

Současně probíhal **návrh nové metody** pro aplikaci UZ energie. Ta je v procesu aplikována jako optimalizační funkce. Výsledkem návrhu této metody bylo **konstrukční uspořádání** rezonančního systému s popisem jeho vlivu na reologické vlastnosti pasty. Na tomto pracovišti jsem provedl první testy chování tlustovrstvových materiálů v dispensním procesu, které pomohly charakterizovat materiály a stanovit oblasti vhodné pro **optimalizaci procesu**. Výzkum a ověření vlivu UZ působení na chování tixotropních materiálů byl realizován na základě testů s prvotními funkčními vzorky UZD hlavice, které vykazovaly schopnosti přenosu mechanických kmitů a také vliv těchto kmitů na reologické vlastnosti pasty. Ověření chování pasty uvnitř transportní kapiláry bylo také ověřeno simulací proudění viskózních látek v programu *Ansyes Fluent* (kapitoly 3.3, 3.4, 3.5).

Realizační fáze popisuje tři vývojové stupně UZD (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8), přičemž třetí vývojový stupeň je schopen tisknout testovací vzorky tisku s dosaženým **rozlišením pod 100 μm** . Ultrazvuková dispensní hlavice UZD3 je přizpůsobena pro použití s komerčním polohovacím robotem, a je možné s ní provádět tisk standardním dispensním systémem.

Optimalizační rutiny jednotlivých součástí pro tiskový proces byly zpracovány pro konkrétní součásti. Základní parametry, jež bylo nutné optimalizovat, jsou uvedeny v kapitole 3.10. Tyto kapitoly se věnují navrženým postupům optimalizace.

Shrnutí parametrických vlastností výsledného vývojového stupně UZD3 jsou uvedeny v kapitole 3.11, která shrnuje jednotlivé **vývojové stupně** a srovnává jejich vlastnosti. Kapitola se věnuje také doporučení dalšího vývoje. Jednotlivé funkční doplňky jsou schopny posunout možnosti této metody na rozlišení pod 50 μm , kdy je však nutné respektovat nutnost kombinace speciálních vlastností systému.

Poslední část práce se věnuje **hodnocení** tiskových výstupů, **shrnutí** postupu vývoje metody ultrazvukové optimalizace tisku a jejímu srovnání se standardními procesy.

Práce splnila stanovené cíle dosažením rozlišení pod 100 μm . Navržená a vyrobená UZD hlavice umožňuje tisknout motiv s čarami s **rozlišením 75 μm** . Zařízení je konstruováno pro nanášení standardních tixotropních materiálů, umožňující změnu reologických vlastností v průběhu dávkovacího procesu. Tyto materiály jsou běžně užívány v tlustovrstvové technologii, pro kterou je nově vyvinutá metoda určena.

Metoda je navržena pro použití na stávajících dispensních systémech bez nutnosti úprav. Jednoduchá aplikovatelnost této metody je zajištěna komplexním řešením UZD hlavice vzhledem k dávkovanému médiu a lokálnímu působení ultrazvuku až v samotném vyústění transportní kapiláry.

Parametry tiskových výstupů nové metody využívající ultrazvukovou optimalizaci toku média transportní kapilárou jsou co do kombinace parametrů komerčními metodami nedosažitelné. Jedná se o *tiskové rozlišení, tloušťku nanášené vrstvy, použití standardních materiálů z oblasti TLV past a míru shody tištěného motivu s návrhem*.

Výsledky dosažené během řešení jednotlivých cílů této práce jsem kontinuálně publikoval mimo jiné na následujících mezinárodně uznávaných konferencích: 42nd International Symposium on Microelectronics IMAPS 2009 [13], 18th European Microelectronics and Packaging Conference EMPC 2011 [21], 4th Electronic System-Integration Technology Conference ESTC 2012 [23], 36th International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE 2013, 19th European Microelectronics and Packaging Conference EMPC 2013 [24].

Práce byla podporována v rámci interních grantů Ústavu mikroelektroniky VUT v Brně:

FEKT-S-11-5/962 Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů

FEKT-S-14-2168 Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice

Pro tuto novou metodu optimalizace dispensního tisku byla 24.11.2010 podána patentová přihláška s názvem ***Nanášecí ústrojí dispensního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů.*** [25] Tento patent byl ***udělen 08.08.2012.***

Vlastní autorský podíl na uvedených publikacích se pohybuje na úrovni 60%. Při jejich tvorbě jsem problémy diskutoval s kolegy, kteří jsou v publikacích uvedeni jako spoluautoři.

5 Literatura

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [2] HILL, McGraw. *Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronic; A Practical Sourcebook for Designers, Fabricators*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 978-0070266803.
- [3] PITT, By Malcolm Haskard. *Thick-film technology and applications*. Vyd. 1. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 1997, 379 s. ISBN 09-011-5035-5.
- [4] PITT, Ed. by Keith. *Handbook of thick film technology*. 2. ed. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 2005, 379 s. ISBN 09-011-5042-8.
- [5] HARMAN, George G a George G HARMAN. *Wire bonding in microelectronics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2010, xx, 426 p. ISBN 978-007-1476-232.
- [6] Heraeus Group, 2013, (25.6.2013)
dostupné z WWW: http://heraeus-circuits-components.com/en/home/circuits_and_components.aspx
- [7] FELBA, Jan. Inkjet printed electrically conductive structures for microelectronics. In: *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, 2011, s. 6-11. ISBN 978-1-4577-2111-3. DOI: 10.1109/ISSE.2011.6053540. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6053540>
- [8] LUO, Wenjian a Guiling DENG. Simulation analysis of jetting dispenser based on two piezoelectric stacks. In: *2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2013, s. 738-741. ISBN 978-1-4799-0498-3. DOI: 10.1109/ICEPT.2013.6756571. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6756571>
- [9] SHAN, Xiuyang; CHEN, Yun; PENG, Xianan; LI, Hanxiong, "Modeling of laminar fluid flow in jet dispensing process. In: *2014" International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2014, s. 276-279. ISBN 978-1-4799-4707-2, DOI: 10.1109/ICEPT.2014.6922653. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6922653&isnumber=6922536> URL:
- [10] KISIC, Milica, Bojan DAKIC, Mirjana DAMNJANOVIC, Aleksandar MENICANIN, Nelu BLAZ a Ljiljana ZIVANOV. Design and simulation of 13.56 MHz RFID tag in ink-jet printing technology. In: *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2013, s. 263-267. ISBN 978-1-4799-0036-7. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648254. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648254>
- [11] Viewegh dosing specialist, (14.5.2011) dostupné z WWW: <http://www.dosieren.de/>.
- [12] Al Lewis, Asymtek A Nordson Company, (9.3.2014)
Dostupné z WWW: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/adhesive-dispensing/support/Literature/Pages/PublishedArticles.aspx>
- [13] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; HLADÍK, J. *Deposition of Thick Film Fine Line Patterns by Direct Writing*. 42nd IMAPS 2009. San Jose, USA, IMAPS USA. 2009. p. 10 - 14.
- [14] ElectroScience Thick-Film Materials & Ceramic Tapes, 2012, (6.7.2013)
dostupné z WWW: <http://www.electroscience.com/products.html>
- [15] Epoxy Technology, Epoxy Adhesive Application guide, 2012, (6.7.2013)
dostupné z WWW: http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhesive_application_guide.pdf
- [16] YANG, E. H., A Piezoelectric Microvalve for Micropropulsion, (10.6.2014)
dostupné z WWW: http://www.noliac.com/Files/Billeder/Pdf/Pdf%20%20external/A_piezoelectric_microvalve_for_micropropulsion.pdf
- [17] Noliac piezo products, 2011, (12.10.2011) dostupné z WWW: <http://www.noliac.com/>
- [18] Noliac piezo products, 2011, (6.11.2011) dostupné z WWW: http://www.noliac.com/Files/Billeder/02%20Standard/Ceramics/Noliac_Ceramics_NCE_datasheet.pdf
- [19] LUNIAK, Marco, Klaus-Jurgen WOLTER, Mirjana DAMNJANOVIC, Aleksandar MENICANIN, Nelu BLAZ a Ljiljana ZIVANOV. Polymer thick film technology and its capability for medicine and sensor applications. In: *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2013, s. 70-73. ISBN 978-1-4799-0036-7. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648217. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648217>
- [20] MARKOWSKI, Piotr. Ceramic material. In: *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2005, s. 21. ISBN 0-387-23130-7. DOI: 10.1007/0-387-23314-8_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/0-387-23314-8_2
- [21] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; JANKOVSKÝ, J. Dispensing process with additional ultrasonic energy. In *Proceedings of 18th European microelectronics packaging conference EMPC 2011*. Brighton, UK, IMAPS-Europe. 2011. p. 476 - 479. ISBN 978-0-9568086-0-8.
- [22] SZENDIUCH, I.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J. The dispensing system with the support of ultrasonic energy. In *Proceedings of 4th ESTC 2012*. 1. Amsterdam, Medicongress. 2012. p. 131 - 134. ISBN 978-1-4673-4644-3.

- [23] BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J.; ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I. *New method for adjustment of elevation of the ceramic flatness for direct deposition*. Electronics Technology (ISSE), 2013 34th International Spring Seminar on Electronics. 2013. 2013(36). p. 6 - 7. ISSN 2161-2528.
- [24] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; JANKOVSKÝ, J.; ŘEZNÍČEK, M. *New method for deposition of thixotropic materials with resolution under 100 μm* . In EMPC 2013. 2013. Grenoble. France, IEEE. 2013. p. 1 - 4, ISBN 978-2-9527467-1-7.
- [25] BURŠÍK, Martin, Michal ŘEZNÍČEK, Jaroslav JANKOVSKÝ a Ivan SZENDIUCH. *Nanášecí ústrojí dispensního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů [patent]*. B 05 C 5/00. 24.11.2010. Česká republika. PV, 303451. Uděleno 08.08.2012. Zapsáno 19.09.2012. Dostupné z: <http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pta.detail>

Curriculum Vitae

Name: Martin BURŠÍK

Born: February 18th 1984 in Zlín

Contact: bursik@feec.vutbr.cz

Education

- 2003 – 06 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Bachelor study of Microelectronics and Technology
State exam passed in June 2006
Bachelor thesis *Plotting quality in small batch electrotechnic production*
- 2006 – 08 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Master study of Microelectronic
State exam passed in June 2008
Diploma thesis *Effectivity of cleaning methods in electronics and classification inc. ecology*
- 2008 – 12 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Ph.D. study of Microelectronics and Technology
State exam passed in June 2010

Experience

- x/05 – x/06 **VEMER ČESKÁ s.r.o.**
study stay
- 7/06 – **PBT Rožnov p.R., s.r.o.**
analysis and design of equipment for precision cleaning in microelectronics
- 8/08 – **BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Department of Microelectronics**
Wire bonding technology, dispensing system, hybrid integration technology,
- 8/12 – **CEITEC - Core facility Nanofabrication and Nanocharacterization**

Languages

English

Other activities

Consulting and advisories in the area of soldering, software and programming.