

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh technologického procesu přípravy DPS**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ota DRUDÍK**  
Osobní číslo: **E11B0108P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh technologického postupu laboratorní přípravy DPS**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Seznamte se s laboratorním vybavením pro výrobu desek plošných spojů (DPS). Navrhněte vhodný technologický postup přípravy DPS a popište jednotlivé kroky výroby.
2. Navrhněte vhodný testovací motiv plošného spoje a prakticky ověřte všechny dílčí kroky laboratorní výroby DPS.
3. Na základě provedených testů zpracujte doporučení vhodných rozsahů klíčových procesních parametrů v jednotlivých fázích přípravy DPS.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

1. Mach, Pavel, Skočil, Vlastimil a Urbánek, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
2. Coombs, Clyde F., ed. Printed circuits handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-07-135016-0.
3. Kahle, P., Starý, J. Plošné spoje a povrchová montáž. VUT v Brně, 2003.
4. Katalogy a technické specifikace výrobců materiálů a zařízení (dostupné on-line).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Silvan Pretl**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na návrh technologického postupu přípravy DPS, konkrétněji na optimalizaci fotolitografického procesu.

Práce je rozdělena do dvou částí. První část rešeršní slouží jako úvod do problematiky. Část druhá se zabývá experimentem s jeho následným vyhodnocením pomocí naměřených výsledků.

Výstupem práce je optimální kombinace faktorů, které probíhají při fotolitografickém procesu, informace o rovnoměrnostech procesů, vliv faktorů na výslednou kvalitu procesů a porovnání mezi různými kombinacemi faktorů.

## **Klíčová slova**

Technologický návrh DPS, výroba DPS, fotolitografie, fotolitografický proces, optimalizace fotolitografie, optimalizace procesu.

## **Abstract**

The bachelor thesis solves problematic of design of PCB, focused on optimize the photolithography process.

Thesis is divided into two parts. The first part contains the problematic of the photolithographic process. The second one focuses an experiment with the following evaluation considering the measured results.

The outcome of the thesis is an optimal combination of factors, which are present in photolithographic process, information of a quality between the processes, the influence of the factors on the final quality of the process and comparison between different factor combinations.

## **Key words**

Design of PCB, PCB production, photolithography, photolithography process, optimization of photolithography, the process optimization.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Silvanu Pretlovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Poděkování patří také Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za výpomoc při zpracovávání výsledků a poskytnuté rady.

Poděkování dále náleží i mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>11</b>
1.1 DĚLENÍ DPS DLE MATERIÁLU .....	11
1.2 MĚDĚNÁ FÓLIE .....	12
<b>2 FOTOPROCESY .....</b>	<b>14</b>
2.1 TEKUTÉ A SUCHÉ REZISTY .....	14
2.2 NANÁŠENÍ FOTOREZISTŮ .....	15
2.3 OSVIT .....	17
2.4 VYVÍJENÍ .....	18
2.5 STRIPOVÁNÍ .....	18
<b>3 VYTVÁŘENÍ OBRAZCŮ NA SUBSTRÁTU .....</b>	<b>19</b>
3.1 SUBTRAKTIVNÍ PROCES .....	19
3.2 ADITIVNÍ PROCES .....	19
3.3 SEMIADITIVNÍ PROCES .....	19
3.4 LEPTÁNÍ .....	19
3.5 MOKRÉ LEPTÁNÍ .....	20
3.6 SUCHÉ LEPTÁNÍ .....	24
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>25</b>
4.1 NÁVRH MOTIVŮ .....	25
4.2 POPIS MOTIVŮ .....	26
4.3 PŘENESENÍ MOTIVŮ NA OSVITOVÝ FILM POMOCÍ FOTOPLOTU .....	28
4.4 FRÉZOVÁNÍ .....	29
4.5 PLÁN EXPERIMENTU .....	30
4.6 MĚŘENÍ .....	36
4.7 OVĚŘENÍ EXPERIMENTŮ .....	41
<b>5 VÝSTUP EXPERIMENTU .....</b>	<b>42</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>52</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>54</b>



## Seznam symbolů a zkratk

<i>CL1, CL2, CL3</i> .....	Motivy velkého kruhu
<i>CM1, CM2, CM3</i> .....	Motivy středního kruhu
<i>CS1, CS2, CS3</i> .....	Motivy malého kruhu
<i>RL1, RL2, RL3</i> .....	Motivy velkého čtverce
<i>RM1, RM2, RM3</i> .....	Motivy středního čtverce
<i>RS1, RS2, RS3</i> .....	Motivy malého čtverce
<i>LV1, LV2, LV3, LV4, LV5</i> .....	Motivy čar ve vertikální rovině
<i>LH1, LH2, LH3, LH4, LH5</i> .....	Motivy čar v horizontální rovině
<i>LL1, LL2, LL3, LM1, LM2, LM3, LR1, LR2, LR3</i> .....	Motivy žebříkovité struktury
<i>DPS</i> .....	Deska plošných spojů
<i>MP</i> .....	Míra podleptání

## Úvod

Desky plošných spojů jsou dnes součástí téměř každé elektroniky, s kterou se v životě setkáváme. Slouží nám k vhodnému propojení součástek mezi sebou pomocí vodivých cest. Způsobů výroby desek plošných spojů (dále jen DPS) je dnes mnoho. Cílem této práce bude zaměřit se právě na jeden z nich a otestovat pro něj parametry procesů. Konkrétní zaměření této práce bude optimalizace fotolitografického procesu, pod kterým si můžeme představit proces s přesností desítek mikrometrů, kde přenášíme geometrické obrazce z fotomasky na chemický fotorezist pomocí světla. Dalšími kroky, kterými jsou vyvolání a leptání, pak upravujeme vrstvu pod rezistem. Výstup testování nám určí, které faktory ovlivňují kvalitu DPS nejvíce a která kombinace faktorů je právě tou optimální.

Pro hodnocení kvality fotolitografického procesu byla zvolena kvantitativní charakterizace míry podleptání na vybraných elementech z celého navrženého testovacího motivu.

Základním předmětem v tomto experimentu bude substrát, který upravíme do potřebných tvarů menších přířezů pomocí frézy. Poté tyto přířezy projdou osvitem, vyvoláním a leptáním. Právě u těchto tří procesů bude ovlivněno pět různých faktorů a bude sledován jejich vliv na konečný výsledek. Těmito faktory jsou doba expozice, teplota vyvolání, doba vyvolání, teplota leptání a doba leptání.

# 1 Desky plošných spojů

Elektrické a mechanické vlastnosti desek plošných spojů jsou primárně nejvíce ovlivněny materiálem, ze kterého jsou zhotoveny. Nejčastěji se desky plošných spojů vyrábí fenolické, epoxidové nebo pryskyřicové v kombinacích s papírem nebo skleněnými vlákny. Dále se výjimečně ve speciálních případech využívají polyestery, melaminy, silikony, polysulfony a další. Plošné spoje se dělí na jednostranné (těmito se budu v této práci zabývat), oboustranné, nebo dnes v moderní technice nejvíce využívané vícevrstvé desky. Výhodou vícevrstvých desek je miniaturizace. Do výroby však vstupuje značnou mírou vysoká složitost. [1, 5, 7]

Funkcí desek plošných spojů je mimo propojení součástek vodivými cestami i jejich mechanické uchopení a s tím související miniaturizace. Dnešní technologie umožňují vyrábět vodivé cesty v řádech nanometrů a v malých rozměrech se pohybují i velikosti integrovaných obvodů.

## 1.1 Dělení DPS dle materiálu

DPS se dělí na základě materiálu, který je používán pro výrobu. Tyto materiály vybíráme převážně podle prostředí, ve kterém budeme DPS nadále využívat a podle podmínek, které budou na DPS působit. [2]

### Nejpoužívanější materiály pro DPS

Dnes nejpoužívanější typy materiálů pro plošné spoje jsou FR-2 (lepenka tvrzená fenolickou pryskyřicí) jehož výhodou je jeho pořizovací cena, FR-3 (lepenka tvrzená epoxidovou pryskyřicí) a především FR-4 (skelná tkanina tvrzená epoxidovou pryskyřicí). Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v Tab. 1. [2]

*Tab. 1 Vlastnosti základních materiálů pro DPS [2].*

Parametr / materiál	FR-2	FR-3	FR-4
Permitivita (1 MHz)	4,5	4,6	4,9
Elektrická pevnost (kV . mm <sup>-1</sup> )	60-70	60-65	35-65
Tepelná vodivost ( J . S <sup>-1</sup> . M <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	0,24	0,23	0,25
Součinitel teplotní roztažnosti (ppm . K <sup>-1</sup> )	11	13	11
Adsorpce vlhkosti (%)	0,8	0,75	0,35
Pevnost v tahu (Mpa . mm <sup>2</sup> )	88	83	280

Existuje mnohem více materiálů a každý z nich se vyznačuje svými specifickými vlastnostmi. Jeden z nich je například FR-5, který patří mezi nejdražší. Patří do skupiny laminátů vytvrzovaných epoxidovou pryskyřicí. Jejich největší výhodou je tepelná odolnost. [2]

Dalším používaným materiálem je poměrně levný FR-6, který má výhody v průhybu při teplotním namáhání. Tento materiál je ze skelně tkaniny tvrzené polyesterovou pryskyřicí. [2]

## 1.2 Měděná fólie

Měděná fólie je vytvářena elektrolytickým nanášením na nerezových bubnech a následně laminována na DPS. Jejím znakem je vysoká čistota Cu (99,5%). Měď by měla vykazovat i jistou míru pružnosti, aby nedocházelo k popraskání vlivem ohybu nebo jiného mechanického namáhání. [1, 2]

Faktorem, který nemůžeme v dnešní době zanedbat, je při výrobě desek plošných spojů cena. Cena se odvíjí od použitých materiálů po způsob výroby. Obecně platí, že při objemnější výrobě DPS je cena jedné desky levnější, než při výrobě menšího počtu DPS. V Evropě se dnes nevyskytuje příliš firem zabývajících se výrobou DPS z důvodu levné pracovní síly v Asii. [1, 14]

Realizace desek plošných spojů se dnes dělí z hlediska postupu vytváření vodivých cest na tři metody, jež jsou nazývány subtraktivní, aditivní a jejich kombinace semiaditivní [1]

V současné době převažuje metoda subtraktivní, která je založena na odleptávání vodivé vrstvy přes zhotovené masky fotolitografickou technikou. Tato metoda nám umožňuje zvládat poměrně složité propojovací obrazce a stále se vyvíjí. [1, 7, 14]

Druhou metodu nazýváme aditivní, která spočívá v postupném nanášení vodivých spojů chemicky, bezproudově, nebo chemicko-galvanickým způsobem. Z celkového objemu produkce se touto metodou vytváří desky jen z několika mála procent. [1, 6]

Značný podíl výroby je dnes tvořen výrobou jednovrstvých nebo dvouvrstvých desek plošných spojů. Postupem času ovšem začíná převažovat výroba vícevrstvých plošných spojů.

Tyto vícevrstvé plošné spoje vnášejí do technologií další procesy, jako je například prokovování. Vzhledem k stále se zmenšujícím rozměrům integrovaných obvodů se tímto směrem bude obor dále ubírat. [1, 6]

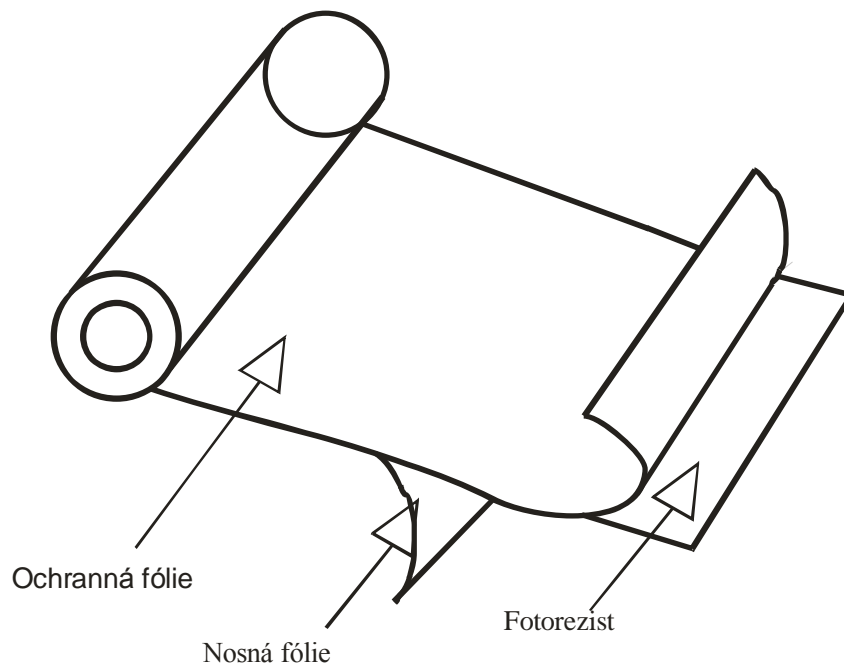
## 2 Fotoprocesy

Obrazce na desku přenášíme zpravidla světelnou expozicí. Záření se provádí přímo ultrafialovým světlem, přes filmovou matici ultrafialovým světlem nebo laserem. Novější technologie využívají rentgenového záření. [1]

Pro přenos motivů na desku je třeba fotocitlivé látky, která reaguje na osvit ať už vytvrzením u negativních rezistů (čímž mění svoji rozpustnost ve vývojkách, které rozpouštějí neosvícený fotorezist), nebo narušením u rezistů pozitivních (zde je světlem narušená vrstva ve vývoje rozpustná). Po vyvolání osvícené desky slouží zbylá vrstva jako odolný materiál vůči leptání. Z této funkce vyplývá název rezist. [1]

### 2.1 Tekuté a suché rezisty

Tekuté rezisty jsou nejstarší formou rezistů. Pracují na bázi polymerů, které jsou rozpustné v organických rozpouštědlech. Tyto fotopolymery po odpaření rozpouštědel vytvoří slabou přilnavou vrstvu na substrátu. Pokud tuto vrstvu osvítíme UV světlem přes filmovou matici s obrazcem, vytvoříme tak identický obraz s maticí. Tloušťku rezistu zde ovlivňujeme hustotou nanášení a použitou technologií. [1, 8]



**Obr. 1** Fotorezist na nosné fólii pokrytý ochrannou fólií [1].

Suché rezisty mají obecně stejné vlastnosti jako tekuté rezisty. Vyrábějí se v tloušťce 18  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  a šířce od 160 mm do 600 mm. Vrstva fotorezistu je nanášena na nosné fólii z polyesteru o tloušťce 17  $\mu\text{m}$  až 25  $\mu\text{m}$ . Nejlépe se nanáší pomocí vakuových laminačních zařízení, které zajišťují přizpůsobení povrchu desky a odstranění vzduchových bublin. Z druhé strany je vrstva fotorezistu pokryta ochrannou vrstvou polyetylenem o tloušťce 15  $\mu\text{m}$  až 75  $\mu\text{m}$ . Fotocitlivá vrstva se vytváří na nosné vrstvě z roztoku, poté je sušena a překryta ochrannou vrstvou (viz Obr. 1). [1, 4, 8]

## 2.2 Nanášení fotorezistů

Před jakýmkoli způsobem nanášením fotorezistů je nutné vyčistit a vysušit povrch substrátu. Tyto kroky jsou prováděny broušením speciálními kartáči, které odstraňují nečistoty za mokra.

### Možnosti nanášení rezistu

- Odstředěním,
- ponorem,
- stříkáním,
- sítotiskem,
- navalováním,
- elektroforeticky,
- clonovým ovrstvováním.

### Odstředění

Dříve patřilo mezi nejvyužívanější technologie při výrobě DPS. Používá se převážně pro ovrstvování polovodičových substrátů díky své vysoké kvalitě. Princip spočívá v nanesení určeného množství tekutého rezistu o dané hustotě do středu desky. Deska se umístí na odstředivku, která se s deskou začne otáčet a vrstva rezistu se tak rovnoměrně rozprostře po celé ploše substrátu. Poté se vrstva rezistu vysuší. Tloušťka vrstvy může být řízena hustotou rezistu a počtem otáček odstředivky a závisí na viskozitě roztoku, koncentraci roztoku a frekvenci otáček odstředování. [1, 6, 7]

## Ponor

Ovrstvení ponorem již v dnešní době není využíváno pro nanášení rezistu ve výrobě DPS. Nevýhodou je zde zdlouhavý proces a vysoká nestejnomyšnost nanesené vrstvy. Princip spočívá ve vertikálním ponoření desky do nádoby s rezistem a jeho následným pomalým vytahováním. Rezist se poté vysuší. Tloušťka rezistu je zde řízena jeho hustotou a rychlostí vytahování z nádoby. [1, 10]

## Stříkání

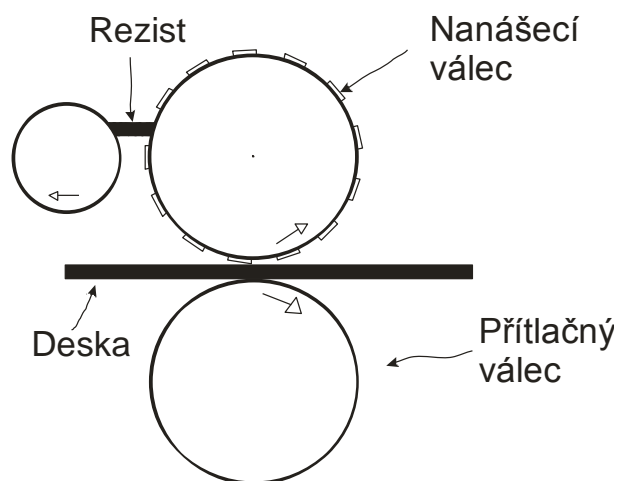
Bývala velice využívanou metodou i přes spoustu nevýhod. Princip spočíval v nanášení rezistů stříkáací pistolí. Rezist byl silně zředěný a kvalita se těžko řídila. [1]

## Sítotisk

Patří mezi často využívané technologie. Vhodnou volbou síta, hustoty rezistů a parametrů posuvu těrky lze dosáhnout kvalitních výsledků. Sítotisk dále dělíme na přímý a nepřímý. [1, 7]

## Navalování

Častý způsob pro nanášení tekutých rezistů. Princip spočívá v přenesení rezistu pomocí zvlněného nebo drážkového pružného povrchu válce (viz Obr. 2). Tloušťka vrstvy je ovlivňována přitlakem válce na desku. Tímto způsobem lze kvalitně nanášet tloušťky 2  $\mu\text{m}$  až 8  $\mu\text{m}$ . Největší výhodou této metody je, že rezist nezatéká do vyvrtaných otvorů, které se vrtají při potřebě prokovování. [1, 7]



Obr. 2 Princip navalování [1].



## **Elektroforetické nanášení**

Bývá využíváno v automobilovém průmyslu. Proces se podobá elektrolytickému procesu, jenom na místo Cu iontů lázeň obsahuje malé částičky rezistu. Deska, na kterou rezist nanášíme je připojena na opačný pól oproti elektrodám. Může být použit pozitivní i negativní rezist. Silou vzniklého elektrického pole se částičky rezistů pohybují k desce, kde se uchytí a změni svou strukturu na stabilnější formu. [1, 7]

## **Clonové ovrstvování**

Clonové lití je v poslední době velice rozšířené. Princip spočívá v nanášejíci hlavě s regulovatelnou štěrbinou, která je stejně široká jako dopravní pás, který nese ovrstvovanou desku. Ze štěrbin vyteká tenká vrstva rezistu v definovaném množství. Tloušťka vrstvy je ovlivňována rychlostí posuvu a viskozitou rezistu. [5]

## **Suché rezisty**

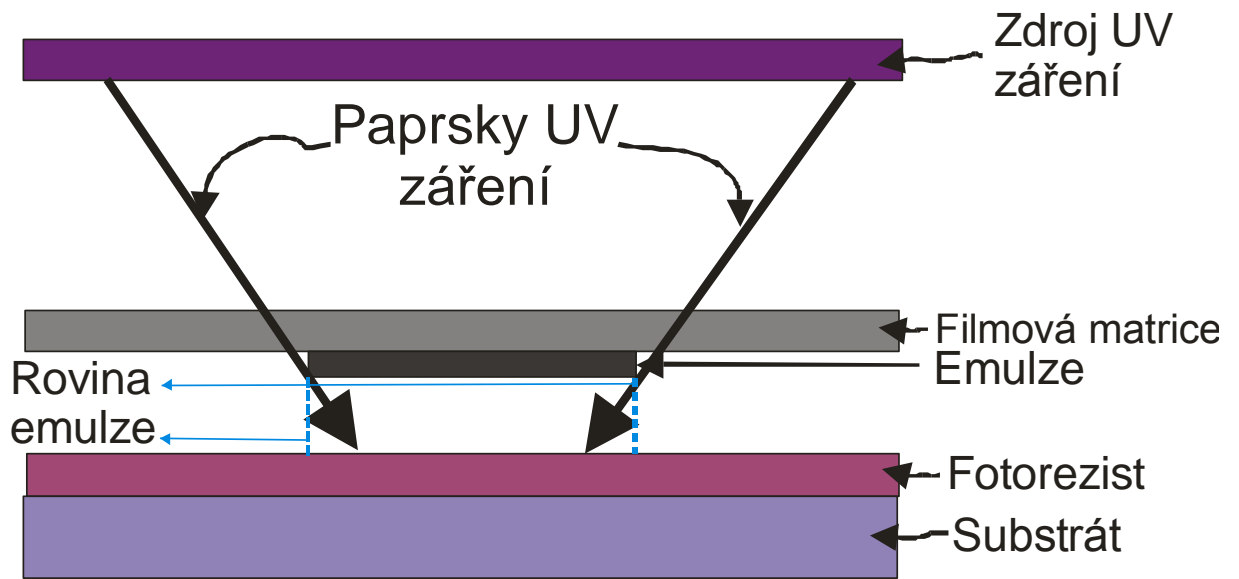
Suché rezisty se nanášejí na podložky laminací, tedy přitlakem zahřátých válců s pružným povrchem. Před přiložením rezistu je třeba sejmout nosnou polyesterovou folii. Ochranná polyetylenová folie se snímá až po expozici. Je zde možnost ovrstvovat desku fotorezistem z obou stran současně pomocí laminátorů. U této technologie využíváme vakuové prostory. [1, 8]

## **2.3 Osvit**

Fotopolymery jsou obvykle nejvíce citlivé na UV světlo o vlnové délce 300 nm – 400 nm. Zdrojem UV záření bývají nejčastěji výkonné výbojky. Ochranná polyetylenová vrstva působí jako filtr, a tak by světlo kratší vlnové délky nemělo prakticky vliv na polymerizaci. V místech, kde se pracuje s fotorezisty je osvětlení žluté, neboť jsou k němu fotorezisty necitlivé. [1]

Kvalitu procesu osvitu ovlivňují také kvality matric. Zejména místa, kudy nemá procházet světlo, musí být dostatečně zatemněna, aby nedošlo k nechtěnému ovlivnění rezistu. Naopak transparentní plochy by měly propouštět světlo dokonale. Zmíněné požadavky nejlépe splňují stříbrohalogenidové filmy, diazofilmy takové kvality většinou nedosahují. Vliv na kvalitu má také přilnutí fólie k fotorezistu, aby nedocházelo k podsvícení.

Matrice se přikládá na rezist tak, aby byla emulze ze strany rezistu. Příklad a vyjádření chyby nedostatečného přilnutí je vidět na Obr. 3, kde se záření dostává i pod vrstvu emulze. [1, 7]



**Obr. 3** Ukázka vznikající chyby podsvícením emulze při expozici.

## 2.4 Vyvíjení

Při nanesení slabé vrstvy fotorezistu se desky vyvíjí jednoduše ponorem do určené vývojky (např. NaCl) a po ukončení procesu se desky dobře opláchnou. U tlustších vrstev fotorezistů se vyvolává pomocí ostříku, který je intenzivnější. Na intenzitě při ponoření může přidat probublávání roztoku. Pro vyvíjení je nutné určit vhodný čas. Při příliš krátkém vyvolávání zůstávají zbytky rezistů a naopak při příliš dlouhém vyvolávání dochází k nedodržení geometrie přenášených obrazců. Rezisty mají polymerní charakter. Při vložení desky do vyvolávací lázně dochází k rozpouštění makromolekulárních polymerních látek. [7, 1]

## 2.5 Stripování

Poté, co splnil fotorezist svou funkci v procesu výroby desek plošných spojů, je třeba ho smýt. Ke smývání se používá určené rozpouštědlo. Provádí se opět pomocí ostříku. [1]

## 3 Vytváření obrazců na substrátu

V této kapitole budou uvedeny technologie měnící vodivostní charakter složek substrátu. Jedná se o odebrání nebo přidávání vodivých vrstev v požadovaném tvaru. Tyto technologie bývají rozděleny do tří skupin, kterými jsou skupiny subtraktivní, aditivní a semiaditivní.

### 3.1 Subtraktivní proces

Technologie založená na odebrání materiálu, v konkrétním případě této práce odebrání vodivého materiálu. Využití této technologie je velice široké a volíme ho dle nároků (přesnost, kvalita, cena, atp.), které klademe na výsledný produkt. [1, 3, 10]

Mezi nepoužívanější subtraktivní technologie patří např. mechanické, jako jsou broušení, vrtání a frézování, nebo chemické, kam řadíme zejména leptání ať už suché, nebo mokré. [1]

### 3.2 Aditivní proces

Zde přidáváme vrstvy daného materiálu k podkladu a tím např. vytváříme vodivé cesty. Aditivních procesů je více, než subtraktivních. Řadí se sem například sítotisk, máčení, postřik, lepení, pokovení, atd. [3, 10]

### 3.3 Semiaditivní proces

Specifický způsob výroby, kde využíváme subtraktivní i aditivní technologie. Aditivní proces v tomto procesu je pokovení neplátovaných izolačních systémů substrátu včetně vyvrtaných otvorů slabou vrstvou mědi (5  $\mu\text{m}$ ). Poté následuje subtraktivní proces, při kterém se odstraní materiál na určených místech za účelem vytvoření požadovaného motivu. Způsobů pokovování je mnoho, např. chemické bezrozpustné pokovení, napařování apod. [1, 3]

### 3.4 Leptání

Jedna z nejrozšířenějších subtraktivních technologií, bez které se dnes elektronika neobejde. Mimo více známého mokrého leptacího procesu se začíná stále častěji využívat leptání plazmou, které patří mezi leptání suché.

### 3.5 Mokrý leptání

Jinak také leptání chemické, které slouží k diferenciaci obrazců. Kvalitu leptání ovlivňujeme třemi faktory:

- ochrana oblasti rezistem, která nemá být leptána
- volba chemikálií, které dobře rozpouští odkrytý kov
- vhodná metoda aplikace

Tyto tři faktory musí být schopny řídit proces s dostatečnou přesností, bezpečností i efektivitou a současně splňovat požadavky na ekologii. [1]

#### Rezisty

Rezisty dělíme do dvou základních skupin: organické a kovové. Jejich použití se řídí dle požadavků na vlastnosti materiálů.

Organické rezisty jsou využívány při leptání jednovrstvých plošných spojů, vnitřních motivů vícevrstvých plošných spojů, nebo při jiných podobných technologiích. Kovové rezisty využijeme naopak při leptání vícevrstvých plošných spojů s prokovenými otvory. [1, 10]

Důležitým krokem, který musíme provádět před nanášením rezistu je příprava povrchu. Povrch nesmí obsahovat žádné nečistoty, být suchý a dostatečně přilnavý k rezistu. Před použitím je povrch vždy řádně očištěn. [1]

Organické rezisty na bázi organických pryskyřic mohou být tekuté nebo suché. Lze je nanášet selektivně např. sítotiskem, nebo pokud jsou fotocitlivé, mohou být nanášeny celoplošně. Požadovaný obrazec je pak tvořen osvětlením a vyvoláním. Nejpoužívanější materiály pro kovové rezisty jsou Sn, SnPb, Ni, SnNi a Au. Nanášejí se většinou elektrolyticky, ne příliš často bezproudým pokovením. [1, 10]

## Leptadla

Leptadla by měla splňovat požadované vlastnosti, kterými jsou :

- Odpovídající rychlost leptání,
- kompatibilita s rezistem,
- dobrá reprodukce geometrie obrazce,
- vhodná kapacita pro rozpuštěný kov,
- snadnost kontroly a regenerace,
- dobrá dispozice pro odpadové hospodářství,
- vhodná ekonomika.

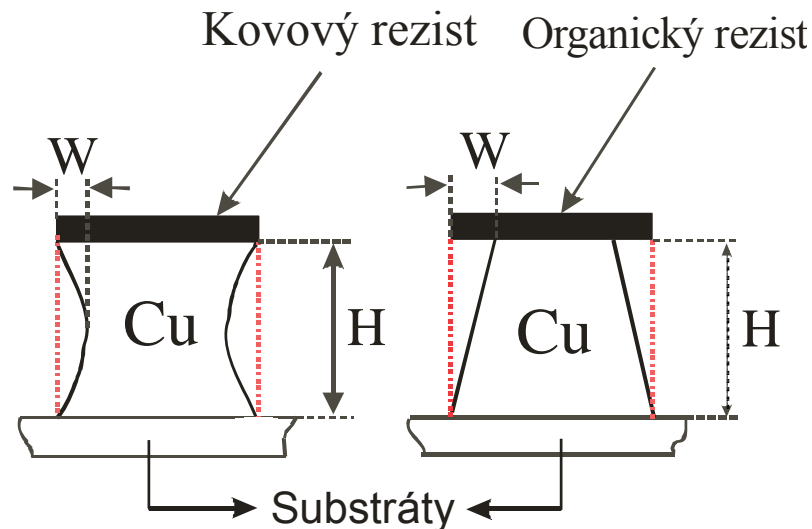
Právě tyto vlastnosti nám splňují tři používaná leptadla v elektrotechnice pro organické rezisty, kterými jsou: chlorid amonný, chlorid měďnatý a roztok peroxidu s kyselinou sírovou. [1]

Měď je potřeba oxidovat, aby byla rozpustná ve vodném roztoku. Nejnižší oxidační stav mědi je Cu (0). Tento stav musíme změnit na vyšší stupeň měďný (1), nebo měďnatý (2). Poté se stává měď rozpustnou. Z toho vyplývá následující požadavek na leptadlo: musí být dobrým oxidačním činidlem. Měďnaté ionty budou působit jako oxidační činidlo vůči kovové mědi a budou vytvářet další kovové ionty. Po takovém uspořádání mědi se přispívá k dalšímu leptacímu procesu. [1]

V procesu leptání reagují složky a reakční produkty zůstávají v roztoku. Vzájemná koncentrace potom určuje rychlost procesu. V roztoku se leptáním vytváří měďné ionty a se zvyšujícím se objemem těchto iontů klesá rychlost leptání. Příčinou je nedostatek oxidantu, který je pro proces leptání potřebný. Proto se doporučuje leptat za neustálého pohybu roztoku a omezit tak saturaci. [1, 9, 13]

Pokud je koncentrace měďných iontů vysoká v celém objemu leptadla, je rychlost leptání snížena a je třeba roztok vyměnit, nebo doplnit částí nového, čistého roztoku. Pro optimální leptání se neustále měří vyčerpanost lázně a dle tohoto parametru se roztok mění. I vyčerpaná lázeň nachází uplatnění, např. ve zpětném vytěžení mědi. [1, 9]

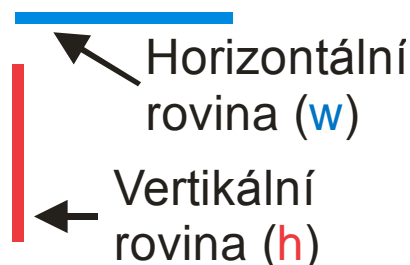
Hodnocení kvality leptání je možné až po jeho skončení na vyleptané desce. Ideálním případem by bylo, kdyby leptání mělo postupovat pod rezistem ve vertikálním směru s výsledkem kolmé stěny bez známky podleptání. Realita je ovšem jiná kvůli prostorovému charakteru leptadla. Typický případ reálného výsledku leptání zobrazuje Obr. 4. [1, 9]



Obr. 4 Zidealizovaný výsledek leptání [1].

Míra podleptání je při dodržování klíčových procesních parametrů předvídatelná. Je tím možná korekce již při návrhu a lze jej vhodným řízením snížit. Tyto aspekty jsou důležité zejména u tenkých vodivých cest. [1]

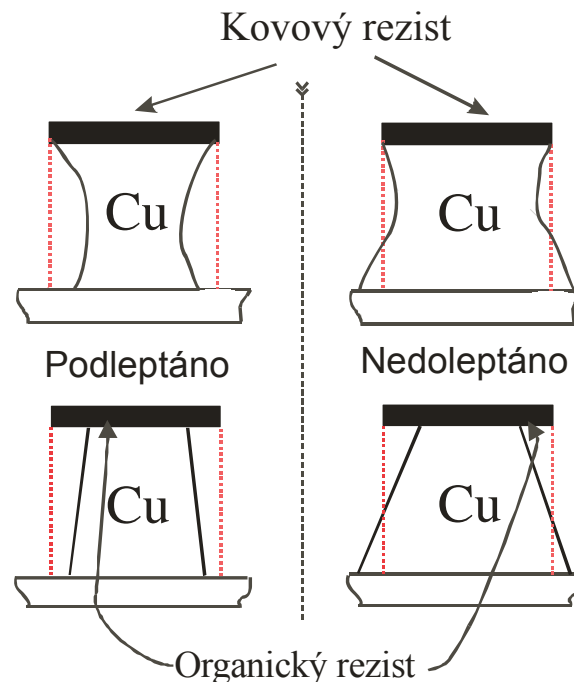
Míra podleptání je hodnocena podle poměru horizontální ( $w$ ) a vertikální ( $h$ ) roviny. Využíváme obě varianty –  $w/h$  nebo  $h/w$ . Preferujeme však  $w/h$ , aby s větší mírou podleptání číselná hodnota vzrůstala. Vysvětlení pro horizontální a vertikální rovinu je na Obr. 5. [1]



Obr. 5 Zobrazení horizontální a vertikální roviny

Cílem je provádět proces leptání tak, aby nedošlo k podleptání ani nedoleptání, jako můžeme vidět na Obr. 6, kde jsou znázorněny oba stavy. Na tvar leptu má vliv i druh použitého rezistu. Ten dává galvanickou ochranu mědi a zabraňuje tak leptání ze strany.

Tento vliv nabývá největší intenzity v místě rezistu a směrem od rezistu klesá. Tím vzniká typicky asymetrický tvar stěny. [1]



**Obr. 6** Podleptání a nedoleptání rezistů [1].

U organických rezistů nedochází ke galvanickému efektu vlivem elektrické neutrality. Míra bočního leptání je úměrná době leptání. Leptání postupuje seshora materiálů směrem dolů, což je i důvodem větší míry leptání nahoře a pozvolně klesá směrem dolů. [13]

Výrobci často užívají amoniakální leptadla s účinky chloridu amonného. Tato leptadla jsou kompatibilní s mnoha rezisty a jsou využívána pro vnější i vnitřní motivy. Většinou se zde využívá postřikových automatů k dosažení rychlosti a dobrého koeficientu podleptání. Těmito leptadly dosahujeme vysoké kvality. Nejstarším leptadlem pro plošné spoje je chlorid železitý. Jeho výhodou byla cena a vysoká leptací kapacita. Leptalo se ponorem nebo postřikem. Musí se zde řešit problém obtížné likvidace a regenerace. Mezi nejjednodušší leptadla patří chlorid měďnatý. Kromě chloridu je tvořen kyselinou chlorovodíkovou. Je kompatibilní se všemi organickými leptadly, kovové rezisty ale nenapadá. Je často využíván pro jedno nebo dvouvrstvé plošné spoje bez prokovených otvorů. Postřik je zde jediná vhodná metoda. Pro oxidaci je zde doplňován chlor (plynný nebo ve formě kyseliny chlorovodíkové s peroxidem vodíku). [1, 9]

## Leptací zařízení

Dříve se využíval nejvíce ponor pro svou jednoduchost. Přináší nám ovšem spoustu nevýhod co se týče výsledné kvality. Pro rychlejší a kvalitnější leptání se využíval při ponoru pohyb desek, později probublávání lázně. Velkým pokrokem byla metoda ostříku, dosažení vyšší kvality leptání. [1]

### 3.6 Suché leptání

Suché leptání, jinak nazývané také plazmové leptání. Pod plazmou si můžeme představit plyn složený z pohyblivých elektronů, iontů, radikálů a neutrálních částic. Plazma je médium se zvýšenou hustotou energie. [1, 14, 15]

Ionizací jedné molekuly vzniká pár nosičů, tzn. dva opačně orientované nosiče. Při opakované ionizaci vzniká více volných elektronů. Plazma i tak zůstává elektricky neutrální. [1, 14, 15]

Plazma je většinou tvořena jednoduchou ionizací. Hustota nosičů je dána rovnováhou mezi nosiči nových elementárních procesů a nosiči procesů zaniklých. Ke vzniku nosičů je zapotřebí velké energie, která může být dodána následujícími způsoby:

- teplotou
- elektrickým polem
- ozářením na energii bohatými částicemi nebo fotony

U mikroelektronických obvodů je použita plazma vzniklá obloukovým výbojem, tzv. nízkotlaká plazma (10 – 200) Pa. Tyto plyny mají nízké teploty, což nám umožňuje použití plazmy pro málo tepelně odolné materiály jako jsou fotorezisty. [1, 14, 15]



## 4 Experimentální část

Cílem experimentální části této práce bylo optimalizovat fotolitografický proces vytváření vodivého motivu v Cu fólii na organickém substrátu typu FR-2. Po navržení vhodného motivu prošel substrát třemi procesy. Prvním z nich byla expozice, druhým vyvolání a nakonec třetím procesem leptání. U těchto procesů byly testovány na navrhovaném motivu různé hodnoty vybraných procesních faktorů. Cílem experimentální práce bylo najít ideální kombinaci právě těchto faktorů a určit, které faktory jsou dominantní a pro kterou kombinaci faktorů je výsledek nejkvalitnější. Výsledky fotolitografického procesu byly vyhodnoceny na základě optické inspekce realizované pomocí mikroskopu Olympus, který je v příloze na Obr. 31.

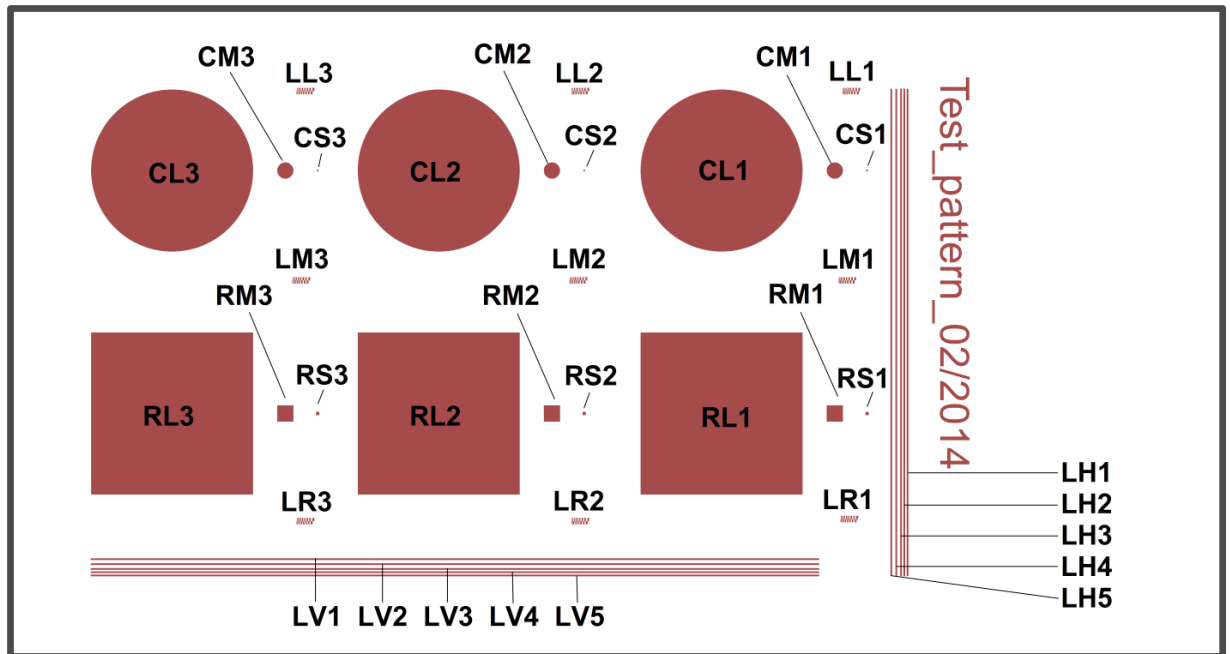
Obsah experimentu bude popsán v následujících bodech:

- Navržení motivů
- Popis motivů
- Přenesení motivů na osvitový film pomocí fotoplotru
- Dělení základního materiálu
- Plánování experimentu
- Realizace fotolitografického procesu
- Měření

### 4.1 Návrh motivů

Prvním krokem k začátku experimentu bylo navržení vhodných motivů na substrát, ze kterých získáme co nejvíce informací o procesech, které při experimentu nastanou. Jednotlivé procesy byly prováděny pro lepší sledovatelnost v kádinkách, které měly průměr o velikosti 60 mm. Procesní kádinky jsou v příloze na Obr. 30. Nerozřezaný substrát měl rozměry 200 mm × 150 mm. Z těchto rozměrů a rozměrů kádinky bylo vhodné nařezat substrát na deset přířezů s rozměry 75 mm × 40 mm. Horní technologický okraj přířezu byl 15 mm pro jeho uchycení seshora. Minimální vzdálenost motivů od kraje desky byla 5 mm, aby výsledný motiv nebyl ovlivňován krajem přířezu. Z těchto důvodů se nám místo pro motivy zmenšilo na 55 mm × 30 mm. Do těchto rozměrů byly zahrnuty všechny navržené motivy.

Výše popsaný přířez je znázorněn na Obr. 7 včetně navržených motivů. Ke každému z motivů byla přiřazena zkratka z anglického názvu. Pro lepší přehlednost je přířez znázorněn i v příloze na Obr. 26 ve větším rozlišení.



Obr. 7 Popis navržených motivů pootočený o 90°.

## 4.2 Popis motivů

### Horizontální čáry

LH (line horizontal), jejichž šířka je vždy 100  $\mu\text{m}$ . Mezery mezi čarami jsou 100  $\mu\text{m}$  – 200  $\mu\text{m}$ . Tento motiv nám podává informaci o rovnoměrnosti fotolitografického procesu (dále jen FLG proces) v horizontální rovině, o míře podleptání na této struktuře a o kvalitě odleptání mezer mezi těmito čarami.

### Vertikální čáry

LV (Line Vertical), jejichž tloušťka je vždy 100  $\mu\text{m}$ . Mezery mezi čarami jsou 100  $\mu\text{m}$  – 200  $\mu\text{m}$ . Tento motiv nám podává informaci o rovnoměrnosti fotolitografického procesu ve vertikální rovině, o míře podleptání na této šířce čar a o kvalitě odleptání mezer mezi čarami ve vertikální rovině.

### Žebřík

L (Leader) je struktura připomínající žebřík. První písmeno L značí strukturu – leader. Druhé písmeno, viz Obr. 6, značí umístění na destičce (L-left, M-middle, R-right). Číslo jedna

značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části. Jak můžeme vidět na Obr. 8, lze na této struktuře dobře sledovat míru chyby FLG procesu pomocí žebříkovité struktury, kde se měď dotýká pouze rohy a šířka čar se odspoda zvyšuje od 20  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ .



Obr. 8 Struktura motivu Leader.

### Kruh malý

CS (Circle Small) – nejmenší kruhy o poloměru 50  $\mu\text{m}$ . Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Jsou to rozměrově nejmenší kruhy na substrátu, na nichž můžeme sledovat, jak působí FLG proces na malou část osvícené mědi.

### Kruh střední

CM (Circle Middle) – středně velké kruhy o poloměru 0,5 mm. Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Sledujeme zde kvalitu FLG procesu na kruhové struktuře.

### Kruh velký

CL (Circle Large) – největší kruhy o poloměru 5 mm. Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Zde lze sledovat působení FLG procesu na velkou část osvícené mědi.

### Čtverec malý

RS (Rectangle Small) – nejmenší čtverce o straně 200  $\mu\text{m}$ . Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Opět zde můžeme sledovat chování malé části mědi čtvercové struktury při FLG procesu.

### Čtverec střední

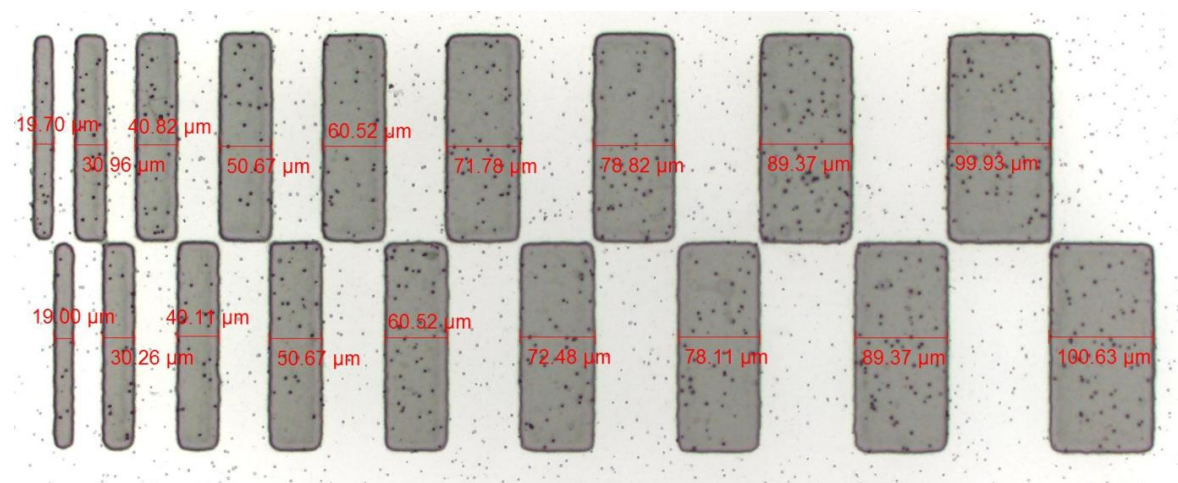
RM (Rectangle Middle) – středně velké čtverce o straně 1 mm. Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Sledujeme zde kvalitu FLG procesu na čtvercové struktuře.

### Čtverec velký

RL (Rectangle Large) – největší čtverce o straně 10 mm. Číslo jedna značí umístění v horní části, číslo dvě umístění ve střední části a číslo tři umístění ve spodní části substrátu. Zde lze sledovat působení FLG procesu na velkou část osvětlené mědi čtvercové struktury.

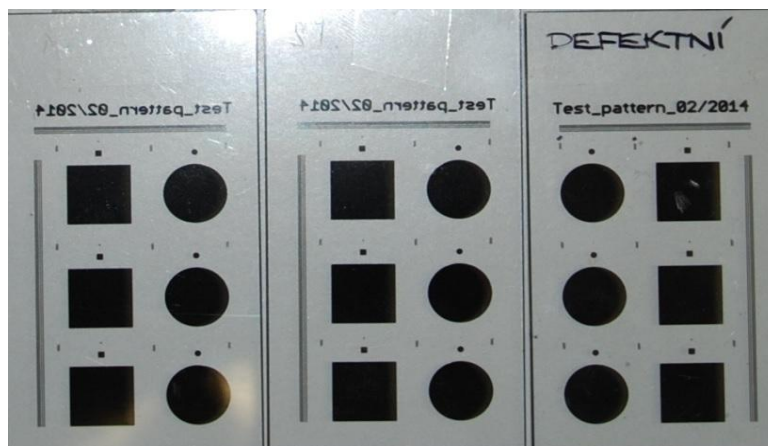
## 4.3 Přenesení motivů na osvitový film pomocí fotoplotru

Z motivů vytvořených v návrhovém softwaru Eagle pro desky plošných spojů, které jsou vidět na Obr. 7, byla sestrojena filmová matrice přenesením motivů pomocí fotoplotru. Už při tomto kroku byla viditelná chyba, která nastala nepřesnostmi fotoplotru. Tyto nepřesnosti zobrazuje Obr. 9, kde jsou chyby číselně vyjádřeny pomocí měření na mikroskopu. Míra chybovosti, které bylo u tohoto procesu dosaženo, je velice malá. Nepřesnosti rastru byly pouze s maximální chybou 1,5  $\mu\text{m}$ .



Obr. 9 Nepřesnosti fotoplotru.

Na Obr. 10 lze vidět konečný výsledek procesu na fotoplotru. Jsou zde zobrazeny tři filmové matrice ovrstvené emulzí, která zabraňuje průchodu ultrafialového světla při osvitě. Pomocí dvou filmů na levé straně byly provedeny všechny expozice.



Obr. 10 Filmové matrice.

#### 4.4 Frézování

Praktická realizace byla prováděna na substrátech FR-2 ovrstvených již z výroby suchým pozitivním fotorezistem, který byl proti nežádoucí expozici okolním světlem chráněn nepropustnou krycí fólií. Jelikož rozměr neopracovaných desek byl 200 mm × 150 mm, bylo třeba si desku nařezat na výše zmíněné přířezy o rozměrech 75 mm × 40 mm. K tomuto účelu nám posloužila fréza (viz přílohy Obr. 27). Z jedné velké desky bylo vyrobeno 10 menších přířezů, které byly pro účely experimentu vyhovující z těchto důvodů:

- po frézování nezbyly žádné přebytečné odřezy
- optimální velikost pro všechny motivy
- optimální velikost pro následnou manipulaci v kádinkách

Deska byla na frézu uložena takovým způsobem, aby byla folie chránící měď dole a fréza jí tak nepoškodila. Frézka pronikla do redukované hloubky frézování 1,6 mm, aby byla zachována celistvost původního formátu desky během frézování a zároveň bylo zamezeno možnému poškození krycí fólie rezistů frézou. Tloušťka desky byla 1,8 mm. Zbylá nevyfrézovaná část byla dořiznuta pomocí řezacího nože a řádně vyčištěna pomocí kartáče a vysavače. Rychlost frézování byla zvolena 1 mm/s v horizontální rovině, aby docházelo k dostatečnému odběru třísky. Rychlost otáčení frézky byla 6000 ot/min. Fréza byla ovládána pomocí počítače, kde byl řídicí software.

## 4.5 Plán experimentu

Na začátku experimentu bylo třeba naplánovat postup, kterým se bude experiment řídit. Jako nejvhodnější metody pro faktory, které budou během experimentu ovlivňovány, se jeví metody OFAT a FDOE. Faktory, které budou ovlivňovány během experimentu, byly vybrány na základě největšího předpokládaného vlivu na výslednou kvalitu fotolitografického procesu zároveň s ohledem na cílené ovlivňování v dostupných laboratorních podmínkách. Tyto faktory jsou:

- doba expozice ( $t_E$ )
- teplota vyvolání ( $T_V$ )
- doba vyvolání ( $t_V$ )
- teplota leptání ( $T_L$ )
- doba leptání ( $t_L$ )

### Metoda FDOE

Metoda FDOE je zkratkou “Factorial Design Of Experiment“. Je to statisticky navržený experiment, který je dnes jedním z nejsilnějších nástrojů k zlepšování procesů. Metoda se skládá z plánování, návrhu, realizace a vyhodnocení. Na metodu DOE dnes existuje řada softwarových nástrojů kvůli složitosti statistických výpočtů. [11, 12]

### Metoda OFAT

Ze zkratky “one factor at a time method“. OFAT je způsob navrhování experimentů zahrnující testování faktorů jeden po druhém, nikdy ne současně. Nevýhodou je, že zde není zahrnuta interakce faktorů. Tato metoda se stává výhodnou za stavu, kdy je omezený počet testování (a není tedy časově příliš náročný), nebo je-li experimentální chyba malá v porovnání s účinky faktorů. [12]

### Porovnání metody FDOE a OFAT

Odborné texty dnes doporučují spíše metodu FDOE, kde se testuje více faktorů najednou s následným statistickým vyhodnocením.

**Nevýhody OFAT oproti DOE:**

- OFAT vyžaduje více testů k dosažení stejného efektu
- OFAT nesdělí přesné interakce mezi faktory
- OFAT nesdělí optimální nastavení faktorů

**Výhody OFAT oproti DOE:**

- OFAT je méně časově náročný
- OFAT neobsahuje složité výpočty
- OFAT se snadno mění v průběhu experimentu (např. při zjištění nečekaného vlivu okolí, změny faktorů atp.)

K celkové koncepci a rozsahu práce, kde vzhledem k absenci reálných vstupních zkušeností s procesem není prostor pro návrh komplexního experimentálního plánu, byla vybrána metoda OFAT. Nadále se práce bude ubírat tímto směrem.

**Použitý plán**

Prvotní plán byl otestovat pro každý z faktorů tři hodnoty a najít jejich ideální kombinaci. Vzniká tedy tabulka:

*Tab. 2 Tabulka zobrazující faktory v experimentu.*

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	Teplota	Doba	Teplota	Doba
tE1	TV1	tV1	TL1	tL1
tE2	TV2	tV2	TL2	tL2
tE3	TV3	tV3	TL3	tL3

Kvůli časové náročnosti nešlo testovat všechny vzájemné kombinace hodnot vybraných faktorů. Bylo nutné experiment zkrátit. Metoda, která byla použita, spočívá v níže uvedených fázích. Pro lepší pochopení jsou jednotlivé fáze popsány tabulkově v příloze pomocí Tab. 9.

**1. fáze** - Pro testování doby expozice byly zvoleny střední hodnoty ostatních faktorů. Jinak řečeno, pro doby expozic tE1, tE2 a tE3 byla testována teplota vyvolání Tv2, doba vyvolání tv2, teplota leptání TL2 a doba leptání tL2. Po vyhodnocení byla vybrána nejlepší doba expozice.

**2. fáze** – s vybranou dobou expozice tE z předchozí fáze byly dále testovány faktory teploty vyvolání Tv1 a Tv3. Kombinace s teplotou vyvolání Tv2 už testována nebyla, protože proběhla v předchozí fázi. Ostatní faktory opět nabývají středních hodnot doby vyvolání tV2, teploty leptání TL2, doby leptání tL2. Byla vyhodnocena a vybrána optimální hodnota teploty vyvolání Tv.

**3. fáze** – s vybranou dobou expozice tE a teplotou vyvolání Tv byla testována doba vyvolání tv1 a tv3. Ostatní faktory nabývají středních hodnot teploty leptání TL2 a doba leptání tL2. Poté byla vybrána optimální doba vyvolání tV .

**4. fáze** – s vybranou dobou expozice tE, teplotou vyvolání TV a dobou vyvolání tV byla testována teplota leptání TL1 a TL3 při střední hodnotě doby leptání tL2. Byla vybrána ideální teplota leptání TL.

**5. fáze** – s vybranou dobou expozice tE, teplotou vyvolání TV, dobou vyvolání tV a teplotou leptání TL byl testován vliv doby leptání tL1 a tL3. Opět byl vybrán ideální vzorek, který už byl zároveň vzorkem s neoptimálnějšími parametry.

Výběr optimálního výsledku odladění fotolitografie byl hodnocen pomocí zprůměrování míry podleptání motivů RS1,RS2,RS3 na každé z desek. RS nám značí nejmenší motivy čtverců (200  $\mu$ m).

FLG proces byl vždy prováděn na dvou deskách najednou, aby nebyla příliš vysoká spotřeba vyvolávacího a leptacího roztoku. Po vytvoření dvojice desek se vždy vyvolávací i leptací roztok vyměnily za nový nepoužitý. Objem roztoku pro leptání i vyvolání dvou destiček byl 400 ml. Hodnoty byly zvoleny pro jednotlivé faktory dle níže uvedené Tab. 3, kde jsou uvedené číselné hodnoty.

**Tab. 3** Tabulka zobrazující hodnoty faktorů experimentů.

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	teplota	doba	teplota	doba
tE1 = 60s	TV1 = 30°C	tV1 = 15s	TL1 = 30°C	tL1 = 8min
tE2 = 120s	TV2 = 40°C	tV2 = 30s	TL2 = 40°C	tL2 = 9min
tE3 = 180s	TV3 = 50°C	tV1 = 60s	TL3 = 50°C	tL3 = 10min
tE4 = 240s				



Osvětlení fotorezistu jsme prováděli přes filmovou matrici, na které byly emulzí znázorněny motivy. Fotorezist byl použit pozitivní, tedy byl narušován osvětlením. Vyvolání i leptání bylo prováděno pomocí magnetického míchání, kde se míchadlo točilo na dně rychlostí 300 ot/min. Destičky přitom byly uchyceny na výšku jak ve vyvolávacím, tak i v leptacím roztoku (viz Obr. 11). První problém se vyskytl při vyvolávání, kde bylo zjištěno nerovnoměrné vyvolání v horizontální rovině. Nerovnoměrné bylo i následné leptání. Nerovnoměrnost byla nežádoucím jevem, protože při čekání na doleptání celé plochy se zvyšuje míra podleptání.



**Obr. 11** Uchycení desek při vyvolání a leptání.

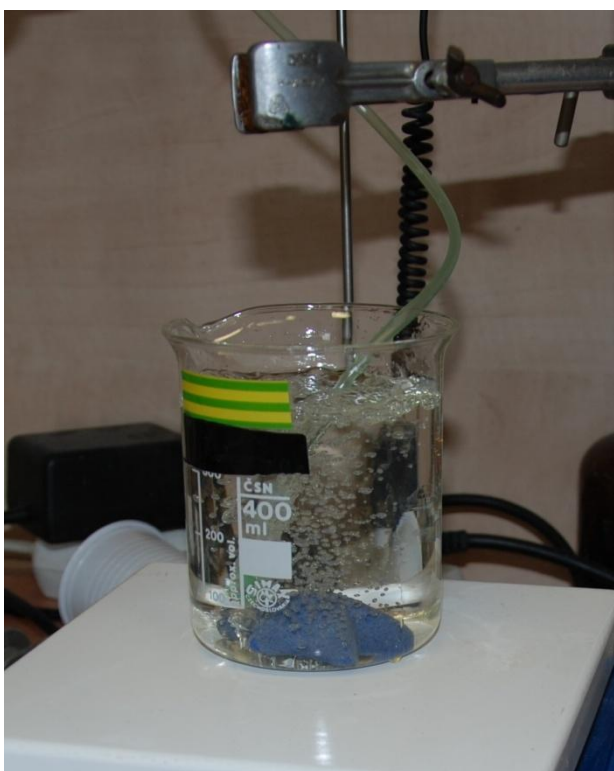
Prvním pokusem v řešení tohoto problému byla změna rychlostí otáček míchání. Se snížením otáček se však začala vyskytovat nerovnoměrnost ve vertikální rovině a naopak při zvyšování otáček se zvětšovala nerovnoměrnost roviny horizontální.



**Obr. 12** Provzdušnění pomocí vzduchovacích válců.

Vzhledem k nevyhovujícím výsledkům s magnetickým mícháním byla vyzkoušena metoda s provzdušněním. Jelikož byl proces prováděn v kádinkách, bylo nejprve vyzkoušeno řešit problém pomocí provzdušňovacích válců. Šest provzdušňovacích válců bylo přilepeno na destičku pomocí epoxidového lepidla, viz Obr. 12. Destička s válci se umístila na dno kádinky a pomocí připojeného kompresoru hadičkami byl do válců vháněn vzduch.

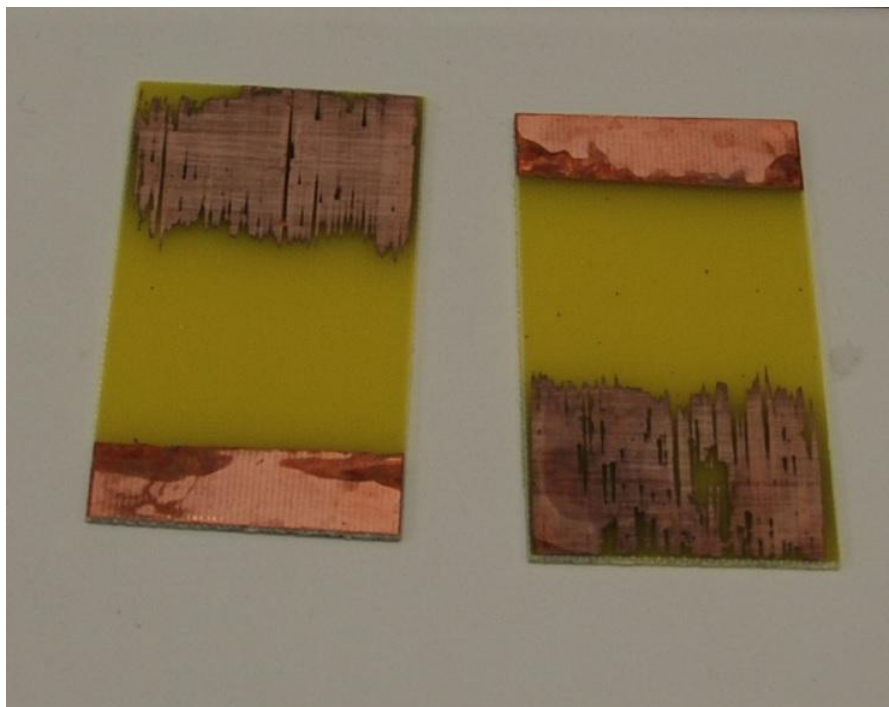
I tato způsob řešení byl nerovnoměrný zejména ve vertikální rovině. Provzdušňovací válce neprovzdušňovaly rovnoměrně a tak na jedné straně kádinky vždy byla intenzita provzdušnění větší. Posledním a zároveň neúspěšnějším pokusem bylo použití provzdušňovací hvězdice (viz Obr. 13), která zajišťovala distribuci vzduchu v celé ploše dna kádinky. Proto byl tento způsob promíchávání zvolen jako nejvhodnější pro vyvolání.



**Obr. 13** Provzdušnění pomocí vzduchovací hvězdice.

Pro leptání se však jako rovnoměrnější osvědčilo nepoužívat promíchávání vůbec. Doba leptání se prodloužila, ale kvalita se tak zvýšila. Destička byla pouze položena na hladinu leptacího roztoku, jednou za dvě minuty nadzvednuta a znovu položena z důvodu odstranění tvořících se vzduchových bublin ze strany kapaliny, které zabraňovaly rovnoměrnému leptání. Leptání tedy neprobíhalo na dvou destičkách najednou, ale pouze na jedné. Objem leptací lázně se tak zmenšil na 200 ml pro jednu destičku.

Rovnoměrnost vyvolávání a leptání byla testována na destičkách, které neprošly expozicí. Místo expozice byla vrstva rezistu smyta pomocí acetonu. Motivy na destičce by byly pro zjištění rovnoměrnosti spíše překážející. Poté na destičku působilo vyvolání a leptání celoplošně, což nám umožňovalo lépe sledovat rovnoměrnost procesů. Pro představu nerovnoměrnosti leptání znázorňují destičky na Obr. 14.



**Obr. 14** Ukázka nerovnoměrnosti procesů.

Pro shrnutí předchozích pokusů budou uvedeny optimální výsledky, které byly dále pro experiment využity.

- Pro vyvolávání byla zvolena vzduchovací hvězdice s provzdušněním, které nám zajišťovalo rovnoměrnost procesů.

- Pro leptání byl zvolen systém bez promíchávání s pravidelným oddělováním destičky od roztoku po dvou minutách.

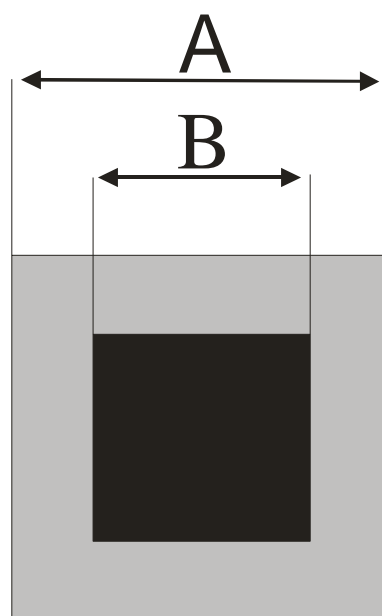
Řešení těchto problémů zabralo více času, než samotný experiment a bylo spotřebováno mnoho času i materiálu. Motivy čtverce z vybraných desek z těchto pokusů jsou přiloženy v příloze na Obr. 28 a Obr. 29. Jejich míra podleptání se pohybuje okolo 50  $\mu\text{m}$  - 80  $\mu\text{m}$ , je tedy značně vysoká.

Jak už bylo zmíněno výše, bylo sledováno pět faktorů. Doby expozice, vyvolání a leptání a teploty vyvolání a leptání. Čas byl řízen pomocí stopek. Nastavení teploty však bylo složitější. Kádinka s kapalinou byla položena na plotýnku s nastavenou požadovanou teplotou a termočlánek byl ponořen do kádinky s kapalinou. Plotýnka se však po nastavení do správné teploty dále přehřívala a měla tak vliv na výsledky. Například při 40 °C se po šesti minutách leptání zvýšila teplota roztoku až o 6 °C. Proto byla zvolena pro experiment metoda, kde byl roztok záměrně přehřátý o 0,5 °C více. Poté byl z plotny sundán a dále kontrolován mimo plotnu pomocí termočlánu. Pokud klesla teplota na 39,5 °C, byl roztok vrácen zpět na plotnu a opět byla hlídána teplota maximálního zahřátí na 40,5 °C. Tímto bylo dosaženo odchylky pouze 1 °C, oproti původním 6 °C a vliv na výsledek byl tak zanedbatelný.

Vyvolávací roztok byl tvořen 1,5% roztokem NaCl a vody. Leptací roztok byl tvořen 20% roztokem Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> ve vodě. Pro účely vyvolání a leptání byly použita demivoda, tedy filtrovaná voda s vyšší čistotou.

#### 4.6 Měření

V následujícím textu bude často použito slovní spojení: Míra podleptání (MP). Míra podleptání představuje číselnou hodnotu, o kterou se zmenšil motiv z každé strany vlivem leptání. Jinak řečeno vzorcem  $MP = \frac{(A-B)}{2}$  [μm], kde A je délka strany navrhovaného motivu a B je délka strany horní základny měděného čtverce po leptání viz Obr. 15.



Obr. 15 Pomocný obrázek k výpočtu míry podleptání MP.

**1. fáze** - První 4 desky byly zaměřeny dle výše uvedené tabulky s uvedenými hodnotami faktorů (Tab.2) na testování doby expozice:

- $t_{e1} = 60$  s
- $t_{e2} = 120$  s
- $t_{e3} = 180$  s
- $t_{e4} = 240$  s

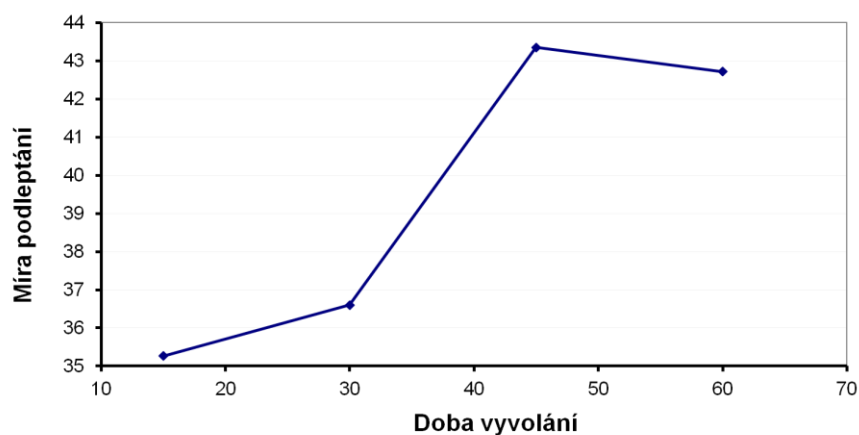
při době vyvolání  $t_{V2} = 30$  s, teplotě vyvolání  $T_{V2} = 40$  °C, době leptání  $t_{L2} = 9$  min a teplotě leptání  $T_{L2} = 40$  °C. Porovnáním motivů nejmenšího čtverce nebylo možné vybrat nejvhodnější ze čtyř testovacích vzorků, jelikož výsledné rozměry malého čtverce RS byly téměř shodné. Pod fluorescenčním mikroskopem však vykazoval největší čistotu VZ20 (obsahoval nejméně nečistot na své ploše a měl tak dobré předpoklady pro další procesy), kde doba expozice  $t_{e4} = 240$  s. Snímky z fluorescence pro dobu expozice  $t_{E1} = 60$  s a  $t_{E4} = 240$  s jsou zobrazeny v příloze na Obr. 32 a Obr. 33. Rozdíly mezi jednotlivými vzorky byly minimální a od začátku bylo jasné, že kritický vliv na výsledek budou mít jiné faktory.

**2.fáze** - Další dvě desky sloužily k otestování vlivu doby vyvolání. Byla potřeba otestovat čtyři doby vyvolání:

- $t_{V1} = 15$  s
- $t_{V2} = 30$  s
- $t_{V3} = 45$  s
- $t_{V4} = 60$  s

Doby testování byla testována při době expozice  $t_{E4} = 240$  s, době vyvolání  $t_{V1} = 30$  °C, době leptání  $t_{L2} = 9$  min, teplotě vyvolání  $T_{V2} = 40$  °C, době leptání  $t_{L2} = 9$  min a teplotě leptání  $T_{L1} = 30$  °C. Po změření motivů čtverce na mikroskopu byl vybrán opět neoptimálnější vzorek, kterým byl VZ33 s mírou podleptání  $MP = 35,267$   $\mu$ m pro dobu vyvolání  $t_V = 15$  s. Vliv doby vyvolání zobrazuje Graf 1. Z grafu lze vyčíst nejmenší míru podleptání MP při době vyvolání  $t_V = 15$  sec. Po době vyvolání  $t_V = 45$  s už se míra podleptání MP nezvětšuje a je přibližně konstantní.

### Vliv doby vyvolání tV



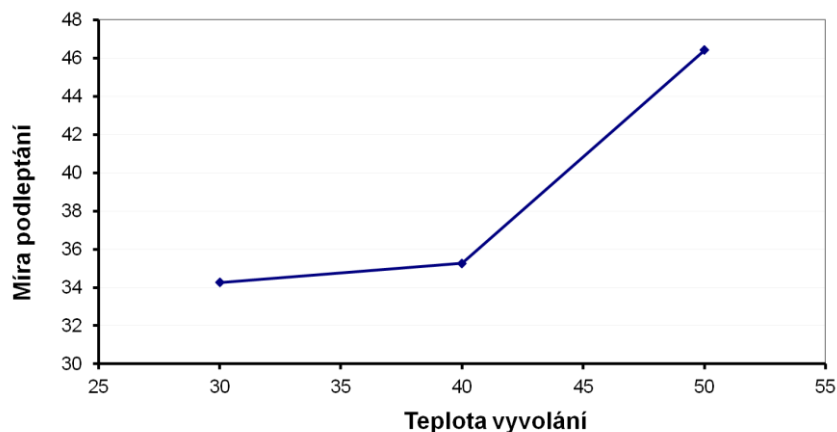
**Graf 1** Závislost míry podleptání na době vyvolání.

**3.fáze** - Cílem třetí fáze bylo otestovat vliv teploty vyvolání Tv pro hodnoty:

- TV1 = 30 °C
- TV2 = 40 °C
- TV3 = 50 °C

Stejně jako v předchozím případě platí, že teplota TV2 je již testována z předchozích pokusů, a proto nám stačí testovat teploty TV1 = 30 °C a TV3 = 50 °C s dobou expozice  $tE4 = 240$  s, dobou vyvolání  $tV1 = 15$  s, dobou leptání  $tL2 = 40$  °C a teplotou leptání  $TL2 = 40$  °C. Nejvhodnější vzorek byl vybrán shodně jako u předchozích fází pomocí změření motivů nejmenšího čtverce. Nejvhodnějším vzorkem se stal VZ38 s mírou podleptání  $MP = 34,267$   $\mu\text{m}$ , který měl hodnotu TV1 = 30 °C. Vliv teploty vyvolání zobrazuje Graf 2.

### Vliv teploty vyvolání TV



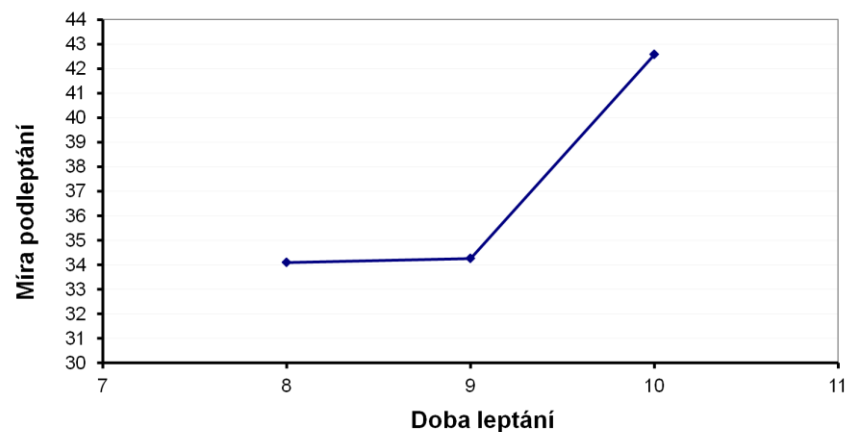
**Graf 2** Závislost míry podleptání na teplotě vyvolání

**4. fáze** - Předposlední fází experimentu bylo testování doby leptání tL. Testovali jsme tyto tři hodnoty:

- tL1 = 8 min
- tL2 = 9 min
- tL3 = 10 min

Tyto hodnoty byly testovány s dobou expozice tE4 = 240 s, teplotou vyvolání TV1 = 30 °C, dobou vyvolání tV1 = 30 s a teplotou leptání TL2 = 40 °C. I pro tuto fázi nám stačily pouze dvě destičky, protože hodnota tL2 = 9 min byla testována již na začátku. Nejvhodnějším vzorkem na základě porovnání nejmenších čtverců se stal z této fáze VZ39 s mírou podleptání MP = 34,1 μm, kde tL1 = 8 min. Vliv doby leptání zobrazuje Graf 3, na kterém lze zpozorovat zvyšující se míru podleptání s rostoucí dobou leptání.

**Vliv doby leptání tL**



**Graf 3** Závislost míry podleptání na době leptání.

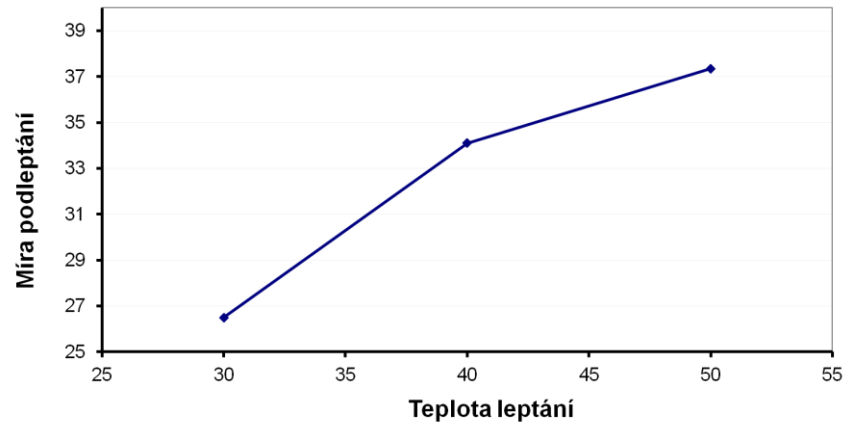
**5. fáze** - Pátou fází bylo testování teploty leptací lázně. Hodnoty teplot byly:

- TL1 = 30 °C
- TL2 = 40 °C
- TL3 = 50 °C

Ze stejných důvodů, které jsou uvedeny výše, se zde testovaly hodnoty pouze TL1 = 30 °C a TL3 = 50 °C. Teploty leptací lázně jsme testovali při době expozice tE4 = 240 s,

teplotě vyvolání TV1 = 30 °C, době vyvolání tV1 = 30 s a době leptání tL = 8 min. Výsledky vlivu teploty leptání TL jsou patrné z grafu (viz Graf 4).

#### Vliv teploty leptání TL



**Graf 4** Závislost míry podleptání na teplotě leptání.

Z této poslední fáze byl určen optimální postup technologické výroby DPS. Tímto vzorkem se stal VZ41 s mírou podleptání MP = 34,1 μm při parametrech faktorů:

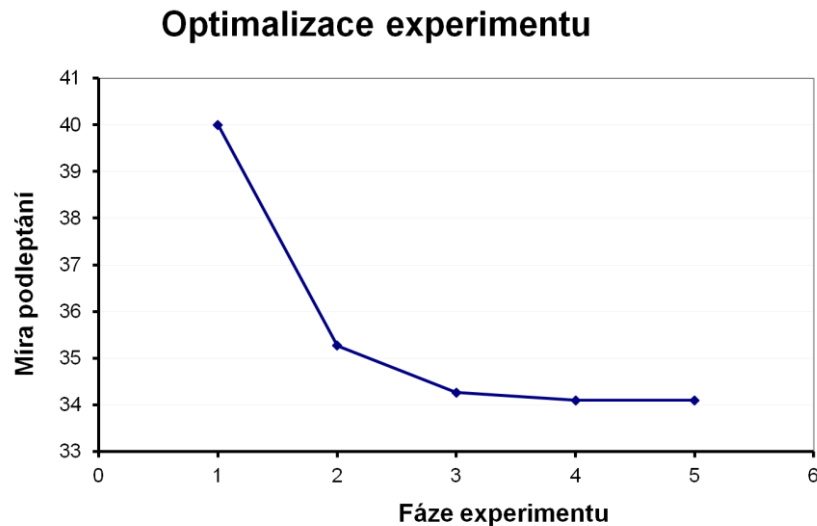
- tE4 = 240 s
- TV1 = 15 s
- tV1 = 30 °C
- TL = 40 °C
- tL = 8 min

Menší míru podleptání měl vzorek VZ43 s teplotou leptání TL1 = 30 °C. Nemohl však být vybrán jako optimální, protože osvícená a tím narušená měď ještě nebyla plně odleptána a tak by jeho funkce postrádala význam. Při zjištění, že leptací lázeň leptá rychleji při vyšší teplotě byla otestována i destička s dobou leptání pouze 6 minut a s teplotou lázně 55 °C. Tento agresivnější způsob se však neosvědčil a míra podleptání byla vyšší, než u vzorků předchozích.

Postupně klesající míru podleptání MP, tedy postupně se zvyšující kvalita vzorků lze zpozorovat na Graf 5, kde vidíme zmenšující se míru podleptání s každou další fází experimentu.



Graf je názorným zobrazením, kde se již po třech fázích podařilo zlepšit míru podleptání MP o 14,87%. Tento fakt potvrzuje vhodnost výběru metoda OFAT pro tuto práci, kde by při metodě FDOE byla potřeba většího počtu experimentů a výsledné zlepšení by nemuselo být vyšší, než v tomto případě.



**Graf 5** Závislost míry podleptání na fázi experimentu.

#### 4.7 Ověření experimentů

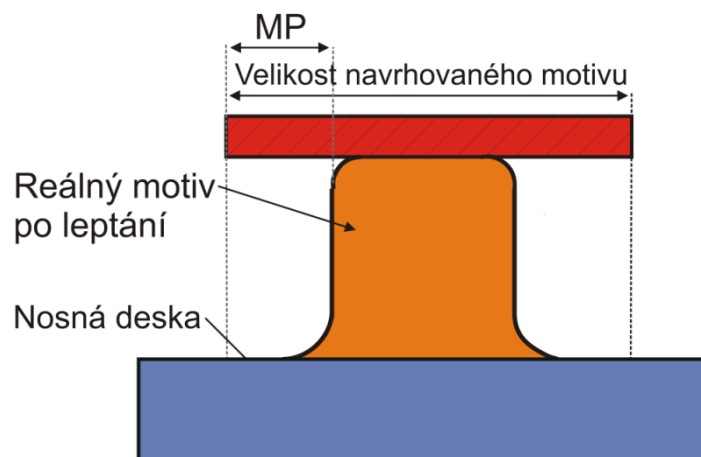
Shodný postup byl prováděn znovu pro ověření výsledků k vyloučení chyb, které při experimentu mohly nastat ať už z důvodů vnějšího působení okolí, nebo chyby měřící osoby.

Jediná odlišnost při ověřování experimentu nastala při testování doby leptání, kdy při jednom z pokusů měla menší hodnotu míry podleptání MP doba leptání  $t_L = 9$  min, než doba leptání  $t_L = 8$  min. Proto byla doba leptání testována třikrát, aby byl vyloučen chybný výsledek.

## 5 Výstup experimentu

Jak již bylo zmíněno ve výše uvedeném textu, výstupem experimentu byla optimální kombinace procesů, při kterých je dosaženo nejmenší míry podleptání a s tím spojené nejvyšší možné dosažitelné kvality při použití dostupných prostředků.

U všech vzorků bylo zaznamenáno podleptání v horní části základny mědi. Vzorku bez podleptání by bylo docíleno pouze za podmínky, kde nebyla doleptána celá deska. To je ovšem nežádoucím jevem. Oproti zidealizovaným předpokladům míry podleptání organického substrátu, které můžeme vidět na Obr. 4, vypadal výsledný motiv podobně, jako zobrazuje Obr. 16.



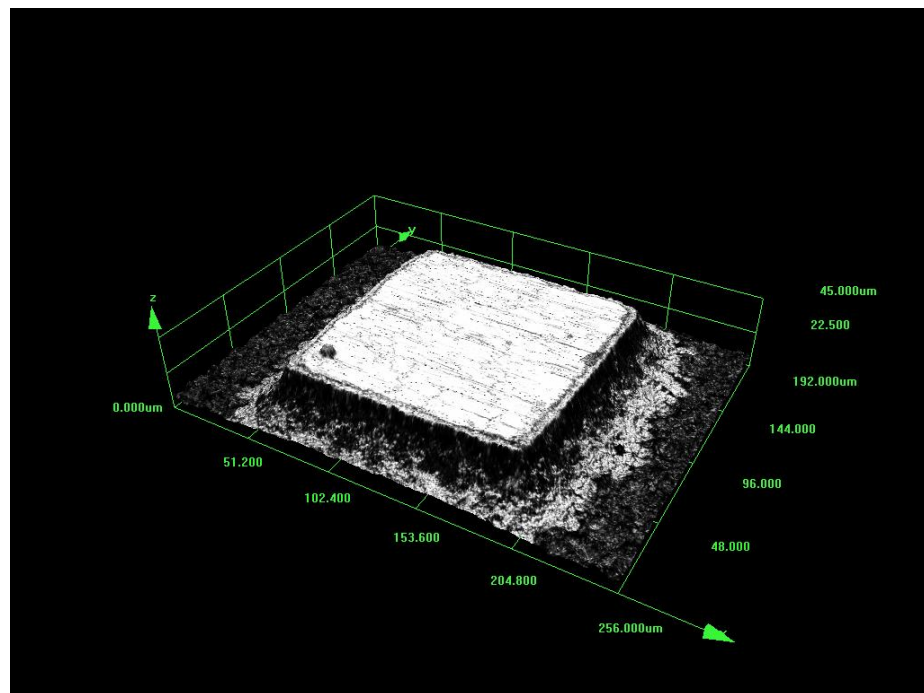
**Obr. 16** Reálný výsledek po leptání.

Větší míru podleptání mědi lze očekávat větší u horní základny, tedy na vrchu mědi. Leptací roztok působil déle v horní části, než se proleptal mědí ke spodní základně. Tímto nám vznikal rozdíl mezi mírou podleptání horní a dolní základny. Míra podleptání je v této práci vyjádřena dle horní základny mědi, tedy dle nejvíce podleptané části. Důvodem je nasnímání snímků seshora, odkud není dostatečně patrná šířka spodní základny. Pro každý vzorek jsou snímky motivů malého čtverce RS nasnímány seshora v elektronické příloze, kde jsou číselně vyjádřené rozměry horní základny mědi.

Následující obsah zahrnuje v první části rozměrovou analýzu nejkvalitnějších vzorků, kterých bylo dosaženo optimalizací fotolitografického procesu. K porovnání bude uvedena i rozměrová analýza vzorku s největší mírou podleptání MP. Poté pomocí srovnání motivu malých čtverců RS bude posouzena rovnoměrnost u nejkvalitnějšího vzorku. Závěrem

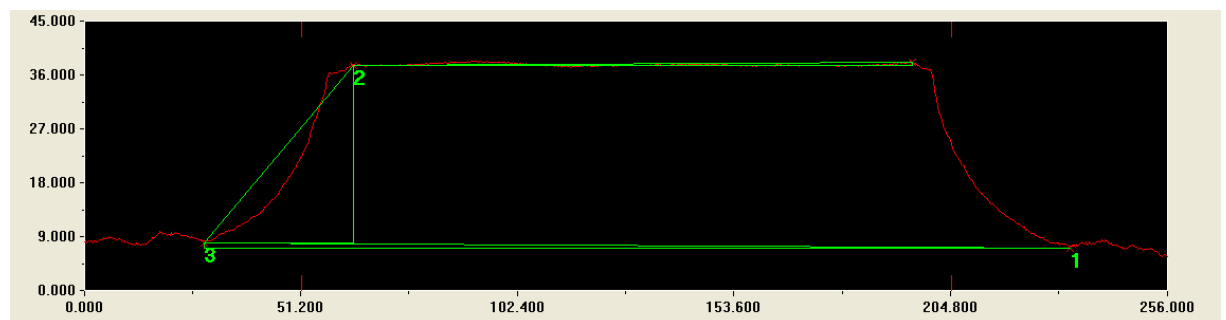
výstupu experimentu bude určení vlivu jednotlivých faktorů na výslednou hodnotu míry podleptání MP.

Nejkvalitnějšími vzorky se staly VZ39 a VZ41. Tyto vzorky byly nasnímány konfokálním laserovým mikroskopem v prostorovém tvarovém profilu. Prostorový snímek vzorku VZ41 s motivem malého čtverce RS1 je vidět na Obr. 17, kde je zřetelně vidět zmenšení motivu po leptání oproti návrhu, který měl délku strany 200  $\mu\text{m}$ .



**Obr. 17** Malý čtverec RS v prostorovém profilu.

Pochopení rozměrů 3D snímku bude snazší z Obr. 18, kde je motiv nasnímán z profilu. Lze z něj zpozorovat tvar výsledného motivu, který připomíná tvar lichoběžníku. Podleptání spodní základny mědi bylo vždy menší, než podleptání horní základny mědi u každého z testovaných vzorků.



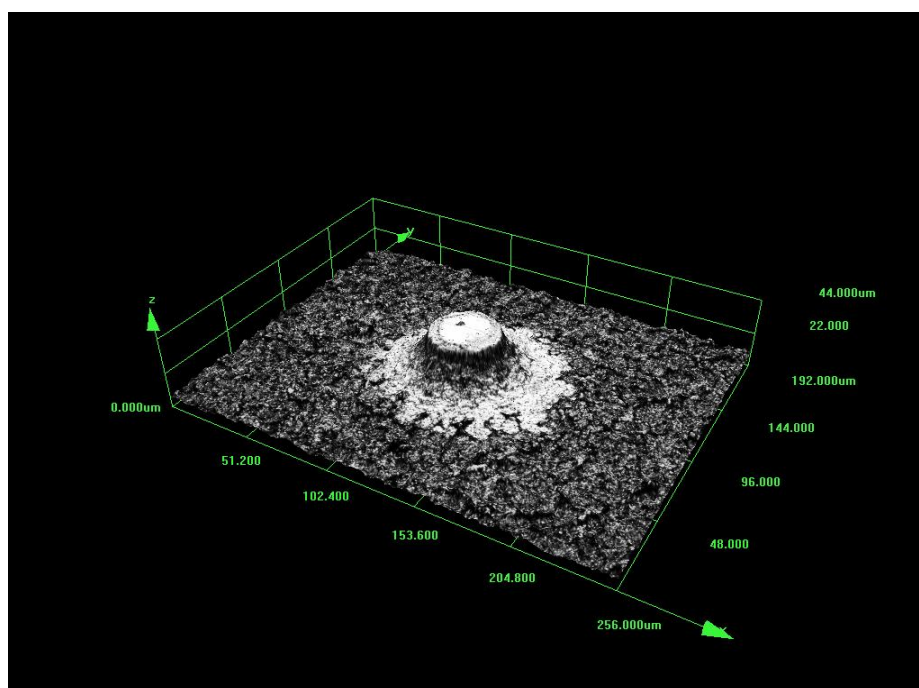
**Obr. 18** Pohled z profilu na motiv malého čtverce RS.

Rozměr 1 v profilu na Obr. 18 značí šířku základny ve spodní části mědi, rozměr 2 v profilu Obr. 18 značí šířku základny v horní části mědi a rozměr 3 v profilu na Obr. 18 značí rozdíl mezi horní a spodní částí základny. Rozměry z Obr. 18 jsou uvedené v Tab. 4. Míra podleptání horní základny je rovna šířce 33,1  $\mu\text{m}$ . U tohoto vzorku není spodní základna plně doleptána. Šířka spodní základny je 207,3405  $\mu\text{m}$ .

Tab. 4 Rozměry popisující motiv malého čtverce RS.

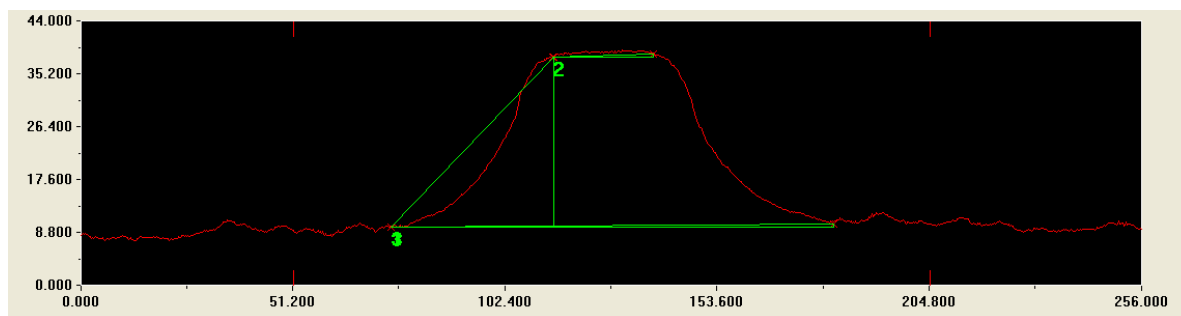
	Šířka [ $\mu\text{m}$ ]	Výška [ $\mu\text{m}$ ]	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1	207,34	0,903	207,34
2	133,83	0,497	133,83
3	35,74	29,474	46,325

Strana nejmenšího čtverce RS1 je 200  $\mu\text{m}$ . Dvakrát menším motivem byl malý kruh CS o poloměru 50  $\mu\text{m}$ . Snímek ze VZ41 s motivem CS1 je na Obr. 19, kde opět lze zpozorovat míru podleptání. Snímek byl opět pořízen z konfokálního laserového mikroskopu, který nám umožnil náhled v prostorovém tvarovém profilu.



Obr. 19 Malý kruh CS v prostorovém profilu.

Pro lepší pochopení rozměrů bude opět uveden motiv nasnímaný z profilu na Obr. 20. Míra podleptání horní základny je 37,55  $\mu\text{m}$ , míra podleptání spodní základny je 25,6  $\mu\text{m}$ . U vzorku VZ37 s největší mírou podleptání MP byla MP > 100  $\mu\text{m}$  a horní základna mědi tak byla plně odleptána.



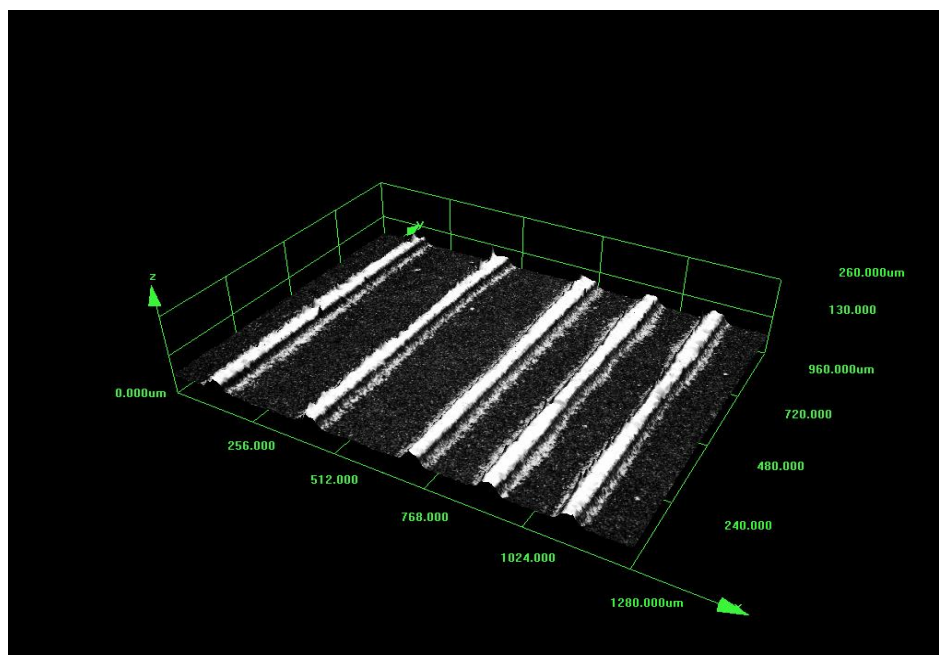
**Obr. 20** Pohled z profilu na motiv malého kruhu RC.

Rozeř 3 v profilu na Obr. 20 značí šířku spodní základny, rozeř 2 v profilu na Obr. 20 značí šířku horní základny. Stejně jako u čtvercového motivu je zde vidět rozdíl mezi podleptáním horní a dolní základny. Rozdíl v podleptání je zde téměř dvojnásobný. Výsledný tvar motivu opět připomíná lichoběžník. Tab. 5 uvádí rozeřy z Obr. 20.

**Tab. 5** Rozeřy popisující motiv malého kruhu CS.

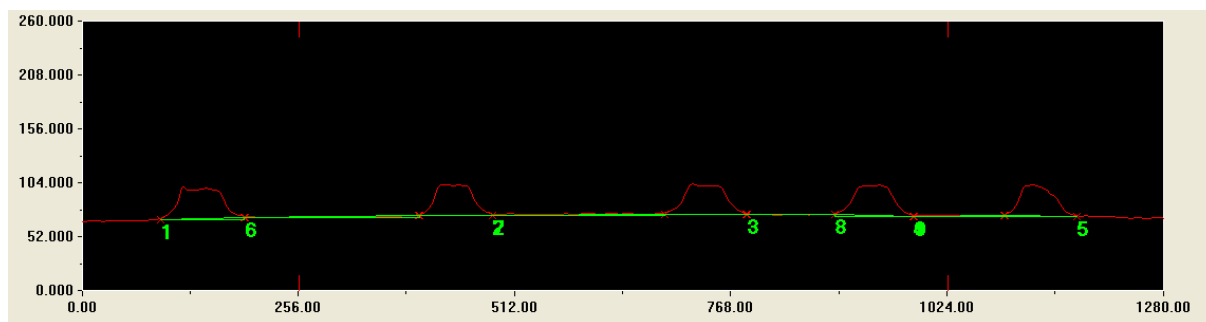
	Šířka [ $\mu\text{m}$ ]	Výška [ $\mu\text{m}$ ]	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
2	24,5868	0,446	24,5909
3	39,7952	28,355	48,8637

Posledním z nasnímaných motivů byly čáry (LH a LV). Obr. 21 zobrazuje LH opět v prostorovém tvarovém profilu. Šířka čar při návrhu motivu byla 100  $\mu\text{m}$ . Vzdálenost mezi čarami se lišila. První dvě mezery z levé strany Obr. 21 byly široké 200  $\mu\text{m}$ . Zbylé dvě mezery na pravé straně měly šířku 100  $\mu\text{m}$ . Již na tomto prostorovém obrázku lze vidět určité nerovnoměrnost, kterou určuje měnící se šířka čar.



**Obr. 21** Motiv čar v prostorovém profilu.

Pro pochopení rozměrů uvedu opět zobrazení motivů z profilu na Obr. 22 s následným popsáním rozměrů v tabulce.



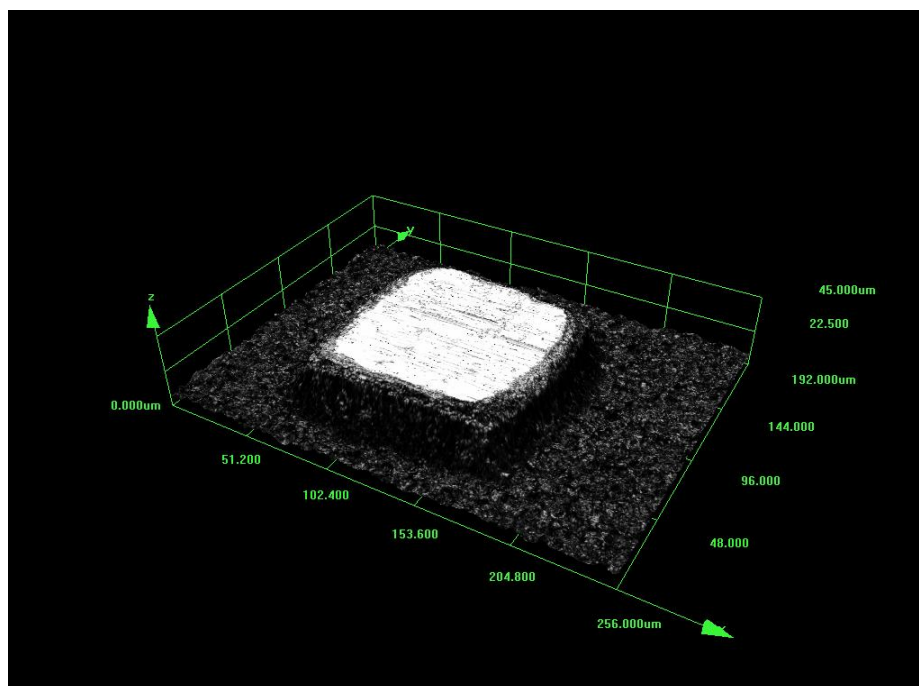
Obr. 22 Pohled z profilu na motiv čar.

Informace o šířce čar po leptání nesou rozměry 1-5 v profilu na Obr. 22. Rozměr jedna je přiřazeno čáře vlevo, rozměr dvě druhé čáře zleva, rozměr tři prostřední čáře, rozměr čtyři druhé čáře zprava a nakonec čáře vpravo přísluší rozměr pět. Mezery jsou označeny obdobně. Rozměr šest náleží mezeře mezi čarami s rozměry 1 a 2, rozměr sedm mezi čarami s rozměry 2 a 3, rozměr osm mezi čarami s rozměry 3 a 4 a poslední mezeře o rozměru 9 je mezi čarami s rozměry 4 a 5. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6. Jelikož je zde měřena vždy dolní část základny, není hodnota podleptání příliš vysoká. Maximální hodnota podleptání spodní základny u horizontálních čar byla 7,875  $\mu\text{m}$ . U měření míry podleptání horní části základny by bylo dosaženo mnohem větších hodnot.

Tab. 6 Rozměry popisující motivy čar LV.

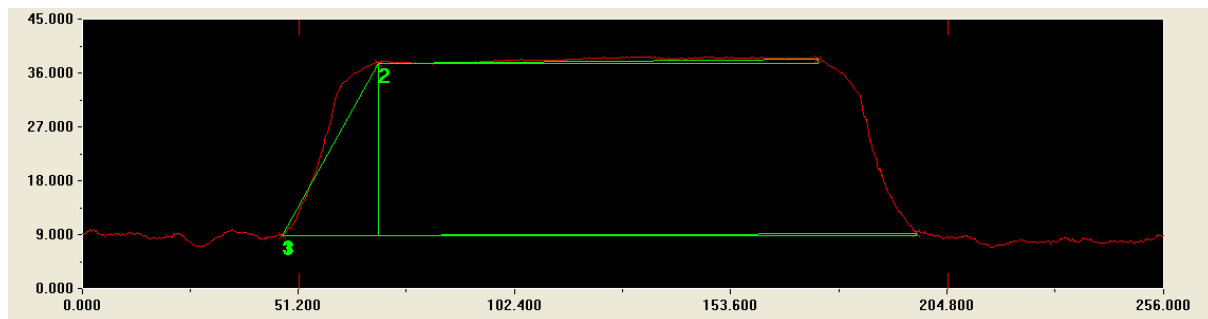
	Šířka [ $\mu\text{m}$ ]	Výška [ $\mu\text{m}$ ]	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1	98,75	2,02	98,7707
2	87,5	0,752	87,5032
3	97,5	0,72	97,5027
4	92,5	1,444	92,5113
5	86,25	1,248	86,259
6	206,25	1,764	206,2575
7	203,75	1,076	203,7528
8	105	0,168	105,0001
9	107,5	0,888	107,5037

K optimální kombinaci je zde uvedena pro komparaci i kombinace nejméně povedená u VZ37, která vykazovala velkou míru podleptání, jak můžeme vidět na Obr. 23, kde je motiv čtverce podleptán mnohem více.



Obr. 23 Malý čtverec RS v prostorovém profilu.

Pro pochopení rozměrů byl vzorek nasnímán i z profilu s následným popsáním hodnot viz Obr. 24.



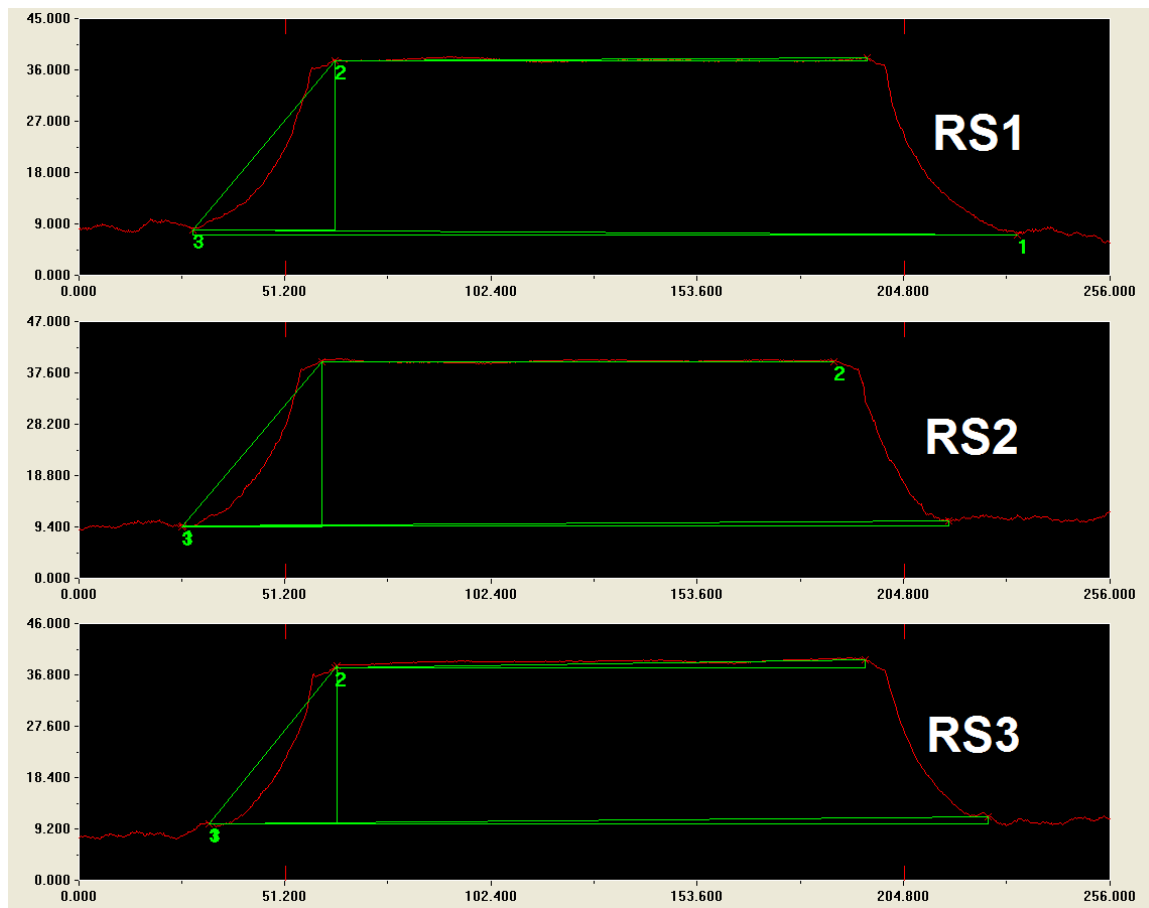
Obr. 24 Pohled z profilu na motiv malého čtverce RS.

Rozměr 2 v profilu na Obr. 24 zde značí šířku horní základny. Rozměr 3 v profilu na Obr. 24 nese informaci o šířce spodní základny. Tak jako u všech vzorků je míra podleptání horní základny vyšší, než u spodní. Rozměry těchto základen jsou v Tab. 7. Podleptání horní základny bylo rovno hodnotě  $MP = 47,5 \mu\text{m}$ . Podleptání dolní základny bylo menší s hodnotou  $MP = 24 \mu\text{m}$ .

Tab. 7 Rozměry popisující motiv malého čtverce RS.

	Šířka [ $\mu\text{m}$ ]	Výška [ $\mu\text{m}$ ]	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1	152,0835	0,435	152,0841
2	105,4446	0,691	105,4468
3	23,066	28,72	36,8358

Dále opět u optimálního vzorku VZ41 bude provedena komparace mezi jednotlivými čtverci RS1, RS2 a RS3 ke zjištění, zdali byl proces rovnoměrný po celé desce, nebo zdali se míra podleptání MP na jednotlivých motivech o stejných rozměrech bude lišit (viz Obr. 25).



**Obr. 25** pohled z profilu na motivy malých čtverců u VZ41

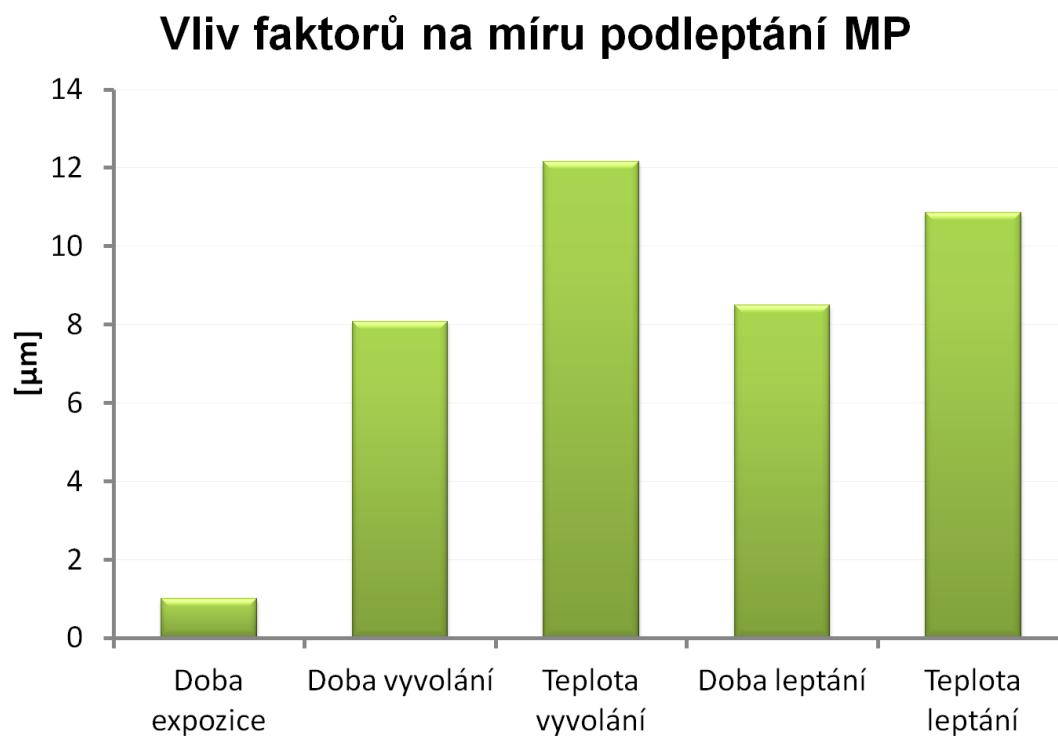
Popis parametrů jednotlivých motivů zobrazuje Tab. 8. Nerovnoměrnost je posuzována dle odlišnosti míry podleptání MP u jednotlivých motivů. Nejvyšší odlišnost nastala mezi spodní základnou motivů RS1 a RS2, která nabývala hodnoty přes 7  $\mu\text{m}$ . Tato odlišnost je 3,5% šířky původního návrhu motivu a proto není posuzována jako příliš velká. Běžně se však motivy odlišovaly v šířce základen do 5  $\mu\text{m}$ . Oproti prvním pokusům se rovnoměrnost velmi zlepšila díky leptání v horizontální rovině bez promíchávání.

**Tab. 8** Rozměry popisující motivy malých čtverců.

VZ41	Šířka horní základny [ $\mu\text{m}$ ]	Šířka spodní základny [ $\mu\text{m}$ ]	MP horní základny [ $\mu\text{m}$ ]	MP spodní základny [ $\mu\text{m}$ ]
RS1	133,8335	207,3405	33,08325	-3,67025
RS2	128,764	192,6391	35,618	3,68045
RS3	133,3265	195,9342	33,33675	2,0329



Z míry podleptání MP, která se během testování různých hodnot faktorů měnila, byl sestrojen Graf 6 k určení vlivů faktorů na míru podleptání. Graf je sestaven z hodnot nejmenší a největší míry podleptání MP vždy pro daný faktor.



*Graf 6 Míra podleptání pro rozsah jednotlivých faktorů.*

Doba expozice byla provedena pro rozsah 60 s až 240 s, doba vyvolání pro rozsah 15 s - 60 s, teplota vyvolání pro rozsah 30 °C – 50 °C, doba leptání pro rozsah 8 min – 10 min a teplota leptání 30 °C – 50 °C. Největší změna míry podleptání nastala při testování teploty vyvolání, kde se změnila o více, než 12 μm. Druhým vlivným faktorem byla teplota leptání, při které se míra podleptání změnila o více jak 10 μm. Téměř shodnou změnu míry podleptání měla doba leptání s dobou vyvolání přes 8 μm. Nejmenší vliv na výsledek měla doba expozice, kde se míra podleptání pohybovala v rozdílech 1-2 μm.

## Závěr

Cílem experimentu bylo odladění fotolitografického procesu v dostupných laboratorních podmínkách při ovlivňování vybraných faktorů, které bylo možno řídit a očekávala se u nich značná míra vlivu na míru podleptání, podle které byla hodnocena kvalita celého procesu. V rámci optimalizace fotolitografického procesu zde byla řešena i problematika rovnoměrnosti procesů vyvolání a leptání, která má taktéž vysoký vliv na výslednou kvalitu.

Vybranými faktory byly doba expozice  $t_E$ , doba vyvolání  $t_V$ , teplota vyvolání  $T_V$ , doba leptání  $t_L$  a teplota leptání  $T_L$ . Expozici jsme prováděli v expoziční jednotce a řídili jsme její dobu. Testované doby expozice byly  $t_{L1} = 60$  s,  $t_{L2} = 120$  s,  $t_{L3} = 180$  s a  $t_{L4} = 240$  s. Zde se míra podleptání lišila pouze minimálně, a tak byla vybrána nejvhodnější doba expozice  $t_E = 240$  s na základě snímků z fluorescenčního mikroskopu, na kterých byla při vybrané době expozice nejmenší míra výskytu nečistot. Doba a teplota vyvolání byla prováděna v kádince s objemem 400 ml po dvou destičkách v roztoku vody a NaCl. Testované doby vyvolání byly  $t_{V1} = 15$  s,  $t_{V2} = 30$  s,  $t_{V3} = 45$  s a  $t_{V4} = 60$  s. Zde byla vybrána doba vyvolání  $t_{V1} = 15$  s na základě změřené míry podleptání. Testované teploty vyvolání byly  $T_{V1} = 30$  °C,  $T_{V2} = 40$  °C a  $T_{V3} = 50$  °C. Vybrána byla teplota vyvolání  $T_{V1} = 30$  °C s nejmenší mírou podleptání. Doba a teplota leptání byla prováděna v roztoku  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  a vody v kádince o objemu 200 ml. U leptání byla testována každá destička zvlášť. Testované doby leptání byly  $t_{V1} = 8$  min,  $t_{V2} = 9$  min a  $t_{V3} = 10$  min. Jako optimální doba leptání se dle míry podleptání jevila  $t_{V1} = 8$  min. Posledním testovaným faktorem byla doby leptání s teplotami  $T_{L1} = 30$  °C,  $T_{L2} = 40$  °C a  $T_{L3} = 50$  °C. Zde byla optimální doba leptání opět vybrána na základě míry podleptání. Optimální dobou se stala  $T_{L2} = 40$  °C. Tímto měřením nám vznikla optimální kombinace doby expozice  $t_E = 240$  s, doby vyvolání  $t_V = 15$  s, teploty vyvolání  $T_V = 30$  °C, doby leptání  $t_L = 8$  min a teploty leptání  $T_L = 40$  °C.

Při testování rovnoměrnosti se nehledělo na dosažení nejmenší míry podleptání, ale na rovnoměrném rozložení míry podleptání po celé destičce. Pro vyvolání se nám nejrovnoměrnější stala metoda provzdušnění pomocí vzduchovací hvězdice. Pro leptání se jako rovnoměrnější jevila metoda položení destičky (motivy dolu) na hladinu leptacího roztoku s nadzvedáváním destičky po dvou minutách. Destička byla nadzvedávána z důvodu odstranění vzduchových bublin, které se na straně motivů tvořily a zabraňovaly tak rovnoměrnému leptání.

Jak bylo zmíněno výše, kvalita se hodnotila pomocí kvantitativní charakterizace míry podleptání, která byla měřena na mikroskopu Olympus, kde pomocí na mikroskopu umístěné digitální kamery snímající vzorek seshora byl promítán vybraný motiv do PC se softwarem, který umožňoval změřit požadované rozměry s přesností na desetiny mikrometrů. Nasnímání seshora bylo provedeno u všech vzorků, které prošly fotolitografickým procesem. Pouze u vybraných vzorků proběhlo i měření na konfokálním laserovém mikroskopu, který nám navíc poskytoval informace o rozměrech v celé výšce motivu a poskytoval náhled v prostorovém zobrazení a tím podkryl chování studovaného materiálového systému v rámci fotolitografického procesu z několika rovin.

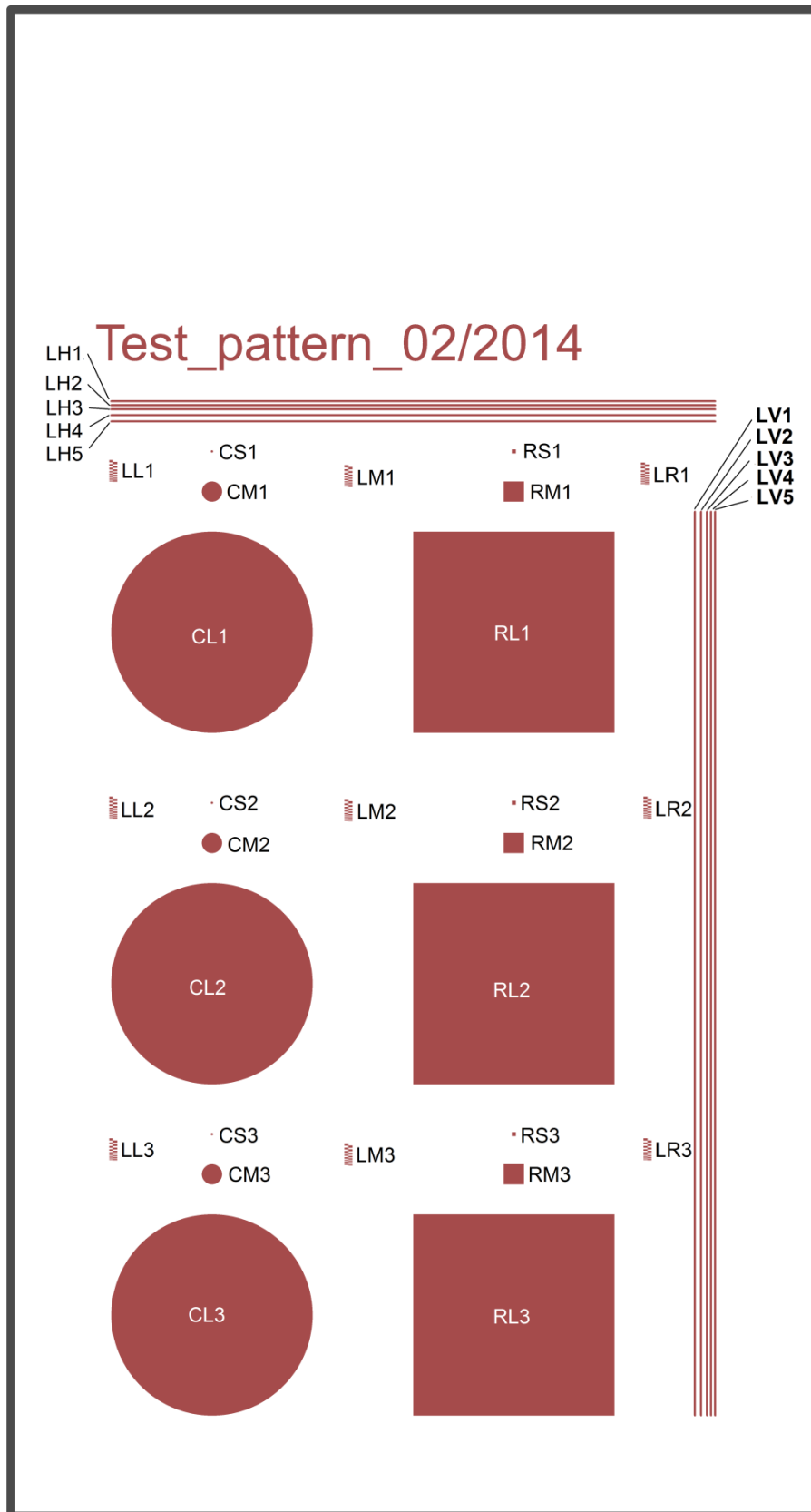
Práce má konkrétní přínos z hlediska optimalizace fotolitografického procesu přípravy DPS v rámci laboratorních cvičení z předmětu Technologie elektrotechniky (TEL), které každoročně absolvuje přibližně 200 – 300 studentů a poznatky práce budou tedy přímo využity.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

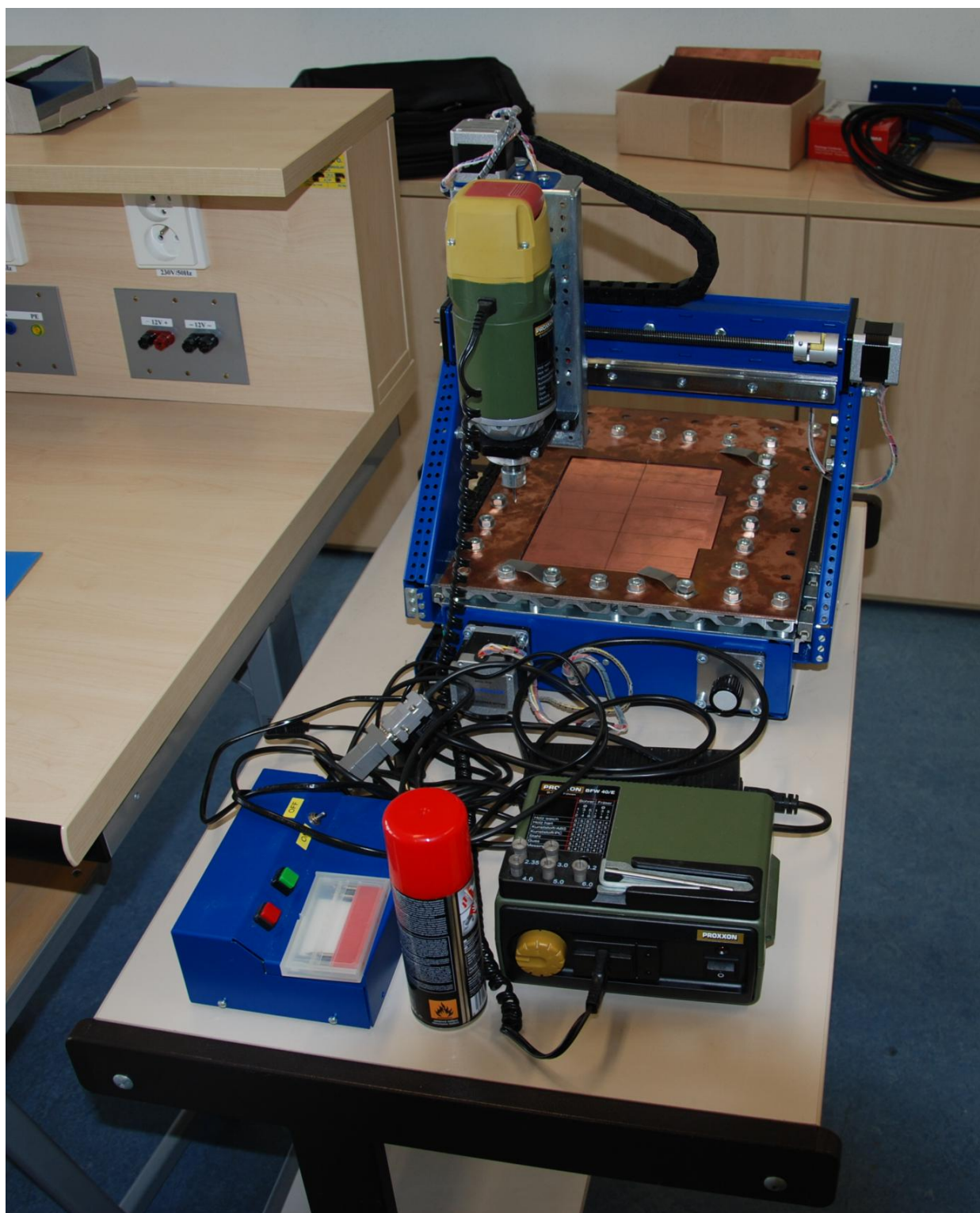
- [1] MACH, P.; SKOČIL, V.; URBÁNEK, J. *Montáž v elektrotechnice*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [2] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [3] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2005, 77 s. ISBN 80-010-3351-1.
- [4] Typy pájecích masek. [Http://www.smtcentrum.cz/](http://www.smtcentrum.cz/) [online]. 2008, 2010 [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/typy-pajecich-masek/>
- [5] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 270 s. ISBN 80-730-0181-0.
- [6] ROSS, Edited by William MacLeod. *A comprehensive guide to the design and manufacture of printed board assemblies*. Port Erin: Electrochemical Publications, 1999. ISBN 09-011-5033-9.
- [7] MATĚJKA, František. *Praktická elektronová litografie*. Vyd. 1. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2013, 63 s., 25 s. obr. příl. ISBN 978-80-87441-04-6.
- [8] *Printed circuits handbook*. 6th ed. Editor Clyde F Coombs. New York: McGraw-Hill, c2008, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 978-0-07-146734-6.
- [9] MORTINI, Bénédicte. Photosensitive resists for optical lithography. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2006, vol. 7, issue 8, s. 924-930 [cit. 2014-05-31]. DOI: 10.1016/j.crhy.2006.10.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631070506002222>
- [10] HADJERSI, T, N GABOUZE, E.S KOOIJ, A ZININE, A ABABOU, W CHERGUI, H CHERAGA, S BELHOUSSE a A DJEGHRI. Metal-assisted chemical etching in HF/Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> OR HF/KMnO<sub>4</sub> produces porous silicon. *Thin Solid Films* [online]. 2004, vol. 459, 1-2, s. 271-275 [cit. 2014-06-01]. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.12.114. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609003020601>
- [11] DEFOREST, W.S., *Photoresists, Materials and Processes*, McGraw-Hill Book Co., New York;1975
- [12] MILLER, Ivan. *DOE: návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*. Vyd. 1. Praha: Interquality, 2010, 122 s. ISBN 978-80-902770-5-2
- [13] FREY, Daniel D a Hungjen WANG. Adaptive One-Factor-at-a-Time Experimentation and Expected Value of Improvement. *Technometrics* [online]. 2006, vol. 48, issue 3, s. 418-431 [cit. 2014-06-01]. DOI: 10.1198/004017006000000075. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1198/004017006000000075>
- [14] BACKES, A. a U. SCHMID. Impact of doping level on the metal assisted chemical etching of p-type silicon. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2014, vol. 193, issue 3, s. 883-887 [cit. 2014-06-01]. DOI: 10.1016/j.snb.2013.11.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400513013518>
- [15] LIM, W.T., L. STAFFORD, J.S. WRIGHT, L.F. VOSSA, R. KHANNA, Ju-II SONG, Jae-Soung PARK, Young Woo HEO, Joon-Hyung LEE, Jeong-Joo KIM, D.P. NORTON a S.J. PEARTON. Comparison of plasma chemistries for the dry etching of bulk single-crystal zinc-oxide and rf-sputtered indium-zinc-oxide films. *Applied Surface Science* [online]. 2007, vol. 253, issue 23, s. 9228-9233 [cit. 2014-06-01]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.05.061. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016943320700743X>

- [16] AHN, J.H., W. HEO, N.-E. LEE, Hyoung J. CHO, R. KHANNA, Ju-II SONG, Jae-Soung PARK, Young Woo HEO, Joon-Hyung LEE, Jeong-Joo KIM, D.P. NORTON a S.J. PEARTON. Fast release process of metal structure using chemical dry etching of sacrificial Si layer. *Thin Solid Films* [online]. 2011, vol. 519, issue 20, s. 6769-6772 [cit. 2014-06-01]. DOI: 10.1016/j.tsf.2011.04.072. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609011008881>

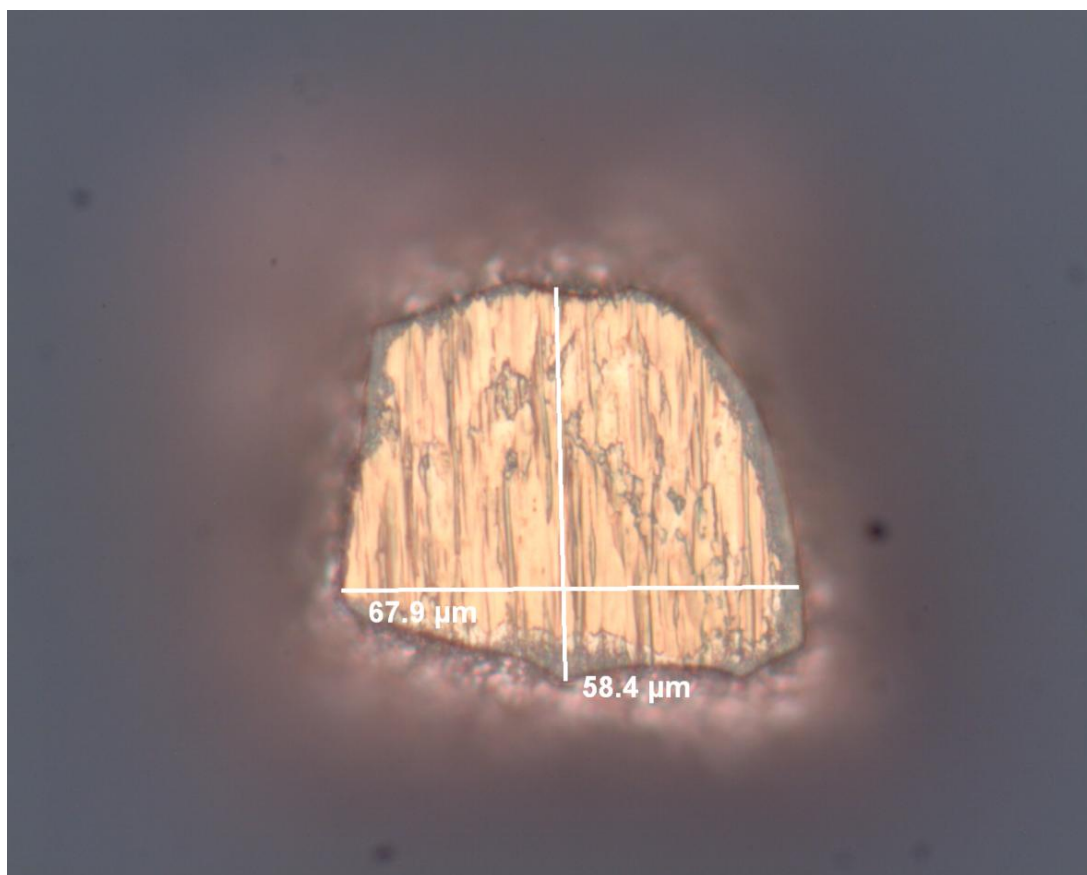
**Přílohy**



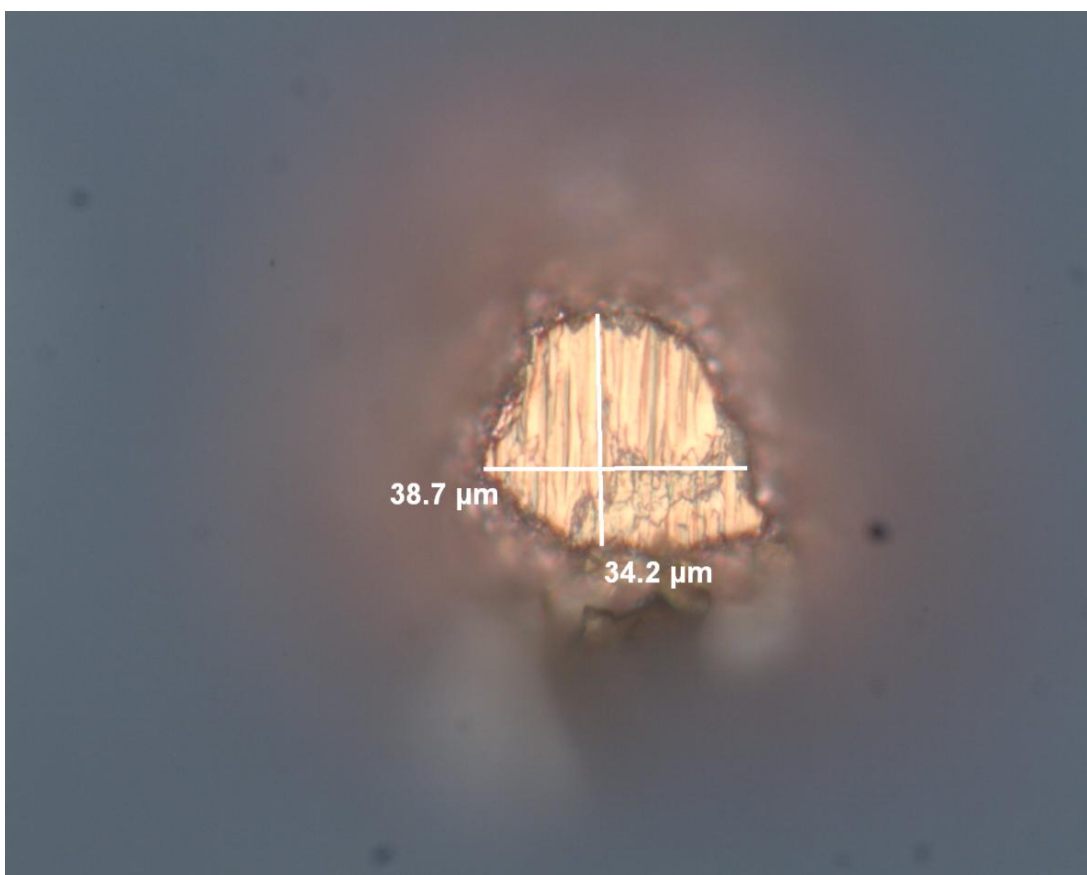
**Obr. 26** Popis navržených motivů.



Obr. 27 Fréza.



**Obr. 28** Motiv malého čtverce RS při testování rovnoměrnosti.



**Obr. 29** Motiv malého čtverce RS při testování rovnoměrnosti.





**Obr. 30** Procesní kádinky.



**Obr. 31** Mikroskop Olympus.



**Obr. 32** Snímek z fluorescenčního mikroskopu pro dobu expozice  $tE1 = 60$  s.



**Obr. 33** Snímek z fluorescenčního mikroskopu pro dobu expozice  $tE4 = 240$  s.

Tab. 9 Tabulka popisující plán experimentu.

**1.fáze**

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te1				
		Tv2	tv2	Tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te2				
		Tv2	tv2	Tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te3				
		Tv2	tv2	Tl2

Výběr vhodného času expozice - te

**2.fáze**

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te		Tv1		
			tv2	Tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te				
		Tv2	tv2	Tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
	čas	teplota	čas	teplota
te				
			tv2	Tl2
		Tv3		

Výběr vhodné teploty vyvolání

Tv

**3.fáze**

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv1		
			Tl2	tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv			
		tv2	Tl2	tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv			
			Tl2	tl2
		tv3		

Výběr vhodného času vyvolání  
tv

**4.fáze**

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv	Tl1	
				tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv		
			Tl2	tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv		
				tl2
			Tl3	

Výběr vhodné teploty leptání TL

**5.fáze**

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv	Tl	tl1

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv	Tl	tl2

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv	Tl	tl3

Výběr vhodného času leptání tl

Vznika optimální kombinace :

Expozice	Vyvolání		Leptání	
čas	teplota	čas	teplota	čas
te	Tv	tv	Tl	tl

