

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

## **ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE**

**Ondřej Brunn**

**Brno, 2013**

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor SOČ: 2. fyzika**

## **Elektronová litografie**

## **Electron beam lithography**

**Autor:** Ondřej Brunn

**Škola:** Gymnázium, Brno, třída Kapitána Jaroše 14

**Konzultant:** Ing. Stanislav Krátký

**Brno, 2013**

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně, použil jsem pouze podklady (literaturu, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne 28. 2. 2013

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Stanislavu Krátkému za pomoc a podnětné připomínky, které mi poskytoval během práce. Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D. za možnost zpracovávat tuto práci na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky.

## ANOTACE

Tato práce se zabývá základními principy elektronové litografie a elektronového litografu. Součástí práce je vytvoření vlastního hologramu pomocí technologie elektronové litografie. Jedná se o zdokumentovaný postup všech kroků potřebných k vytvoření masteru hologramu. Na závěr jsou zde interpretovány výsledky hologramu včetně přiložené fotodokumentace.

Klíčová slova: elektronová litografie, elektronový litograf, hologram, rezist, substrát

## ANNOTATION

This work deals with basic principles of electron beam lithography and e-beam writer. Creating of computer generated hologram master by e-beam lithography is part of this work. All process steps are documented. Hologram results are interpreted at the end of this work.

Key words: electron beam lithography, e-beam writer, hologram, resist, substrate

## Obsah

Obsah .....	6
1 Úvod.....	6
2 Fyzikální princip elektronové litografie .....	7
3 Elektronový rezist .....	8
3.1 Typy elektronových rezistů.....	8
3.2 Proces vyvolávání rezistu.....	8
4 Elektronový litograf.....	9
4.1 Zařízení BS600.....	10
5 Praktická část - vytvoření vlastního hologramu .....	11
5.1 Vytvoření bitmapy .....	11
5.2 Příprava expozice v programu EXPO .....	13
5.2.1 Definování difrakčních mřížek .....	13
5.2.2 Definování palety barev .....	15
5.2.3 Zkompletování expozičních dat.....	15
5.3 Příprava substrátu.....	16
5.3.1 Nanášení rezistu.....	16
5.3.2 Sušení rezistu .....	17
5.3.3 Kontrola rezistu.....	18
5.4 Expozice.....	19
5.5 Vyvolání.....	19
5.6 Měření vyvolaného hologramu na AFM.....	20
5.7 Pokovení.....	21
6 Výsledný hologram.....	22
7 Závěr .....	25
Seznam použité literatury .....	26

# 1 Úvod

V roce 1796 byla Aloisem Senefelderem vynalezena nová tisková technika zvaná kamenotisk neboli litografie. Jedná se o metodu tisku na hladké povrchy bez použití reliéfní tiskové formy. Všechny tisknoucí i netisknoucí prvky jsou tedy umístěny v jedné hladině. Samotné vytvoření formy je poté založeno na vzájemné odpudivosti mastnoty a vody. Na tisknoucí místa je ručně nanese mastná tuž, místa netisknoucí jsou naopak navlhčeny vodou. Jako podklad pro formu se při této metodě využívá jemně vyhlazený pórovitý kámen vápencovitého druhu, který přijímá jak mastnotu, tak i vodu. Tiskařskou barvu poté přijímají pouze místa, na která byla mastná tuž nanese. Samotný výtisk je potom vytvořen obtisknutím formy na papír. Tato technika se uplatňovala především ve druhé polovině 19. stol. jako ilustrační technika, která doplňovala knihtisk. V dnešní době je tato metoda nahrazena ofsetovým tiskem. Termín litografie dostává ve druhé polovině 20. stol. zcela nový rozměr. Technologický pokrok si žádá zdokonalení přenosu obrazových informací na různé druhy podložek. Všechny nově vzniklé techniky jsou souhrnně označovány jako litografické techniky. Vzniká tedy optická litografie (fotolitografie), kterou později následují mikro a nanolitografické techniky, jakými jsou rentgenová litografie, iontová litografie a také elektronová litografie.

## 2 Fyzikální princip elektronové litografie

Elektronová litografie je technologie založena na netermických interakcích svazku nízkoenergiových elektronů s vrstvou vhodné látky - elektronového rezistu. Při průchodu elektronů vrstvou dochází vlivem srážek s molekulami či atomy mimo jiné k vybuzení tzv. sekundárních elektronů s nízkou energií. Tyto sekundární elektrony znovu interagují s molekulami rezistivní vrstvy a jejich vlivem dochází ke změně fyzikálních vlastností rezistu. Tímto způsobem dochází k zapsání obrazu do elektronového rezistu. Tento obraz je však latentní (skrytý) a je tedy nutné ho dále vyvolat za pomoci rozpouštědla.

Vlastnosti výsledného obrazu závisí na mnoha faktorech jako např.:

- energii elektronů
- povaze materiálu, ve kterém se elektrony rozptylují
- penetrační hloubce



### **3 Elektronový rezist**

Elektronovým rezistem rozumíme látku vhodnou pro použití při elektronové litografii. Zpravidla se jedná o organické makromolekulární látky. Základním požadavkem je schopnost absorbovat energii z elektronů, která vyvolá degradační nebo síťovací procesy. Tímto procesem je zapisován latentní obraz ve struktuře rezistu.

#### **3.1 Typy elektronových rezistů**

Rozlišujeme dva základní typy rezistů. Přebývá-li u daného rezistu degradační proces, jedná se o pozitivní rezist. Přebývá-li naopak síťovací proces, jedná se o negativní rezist.

U pozitivních rezistů přebývá při ozáření elektrony degradační proces. Makromolekuly rezistu jsou tedy štěpeny na fragmenty s nižší molekulovou hmotností, než má původní látka. Ve zvoleném rozpouštědle se tyto fragmenty snadněji rozpouští a ozářená místa jsou rozpuštěna. Vzniká tedy pozitivní obraz expozice.

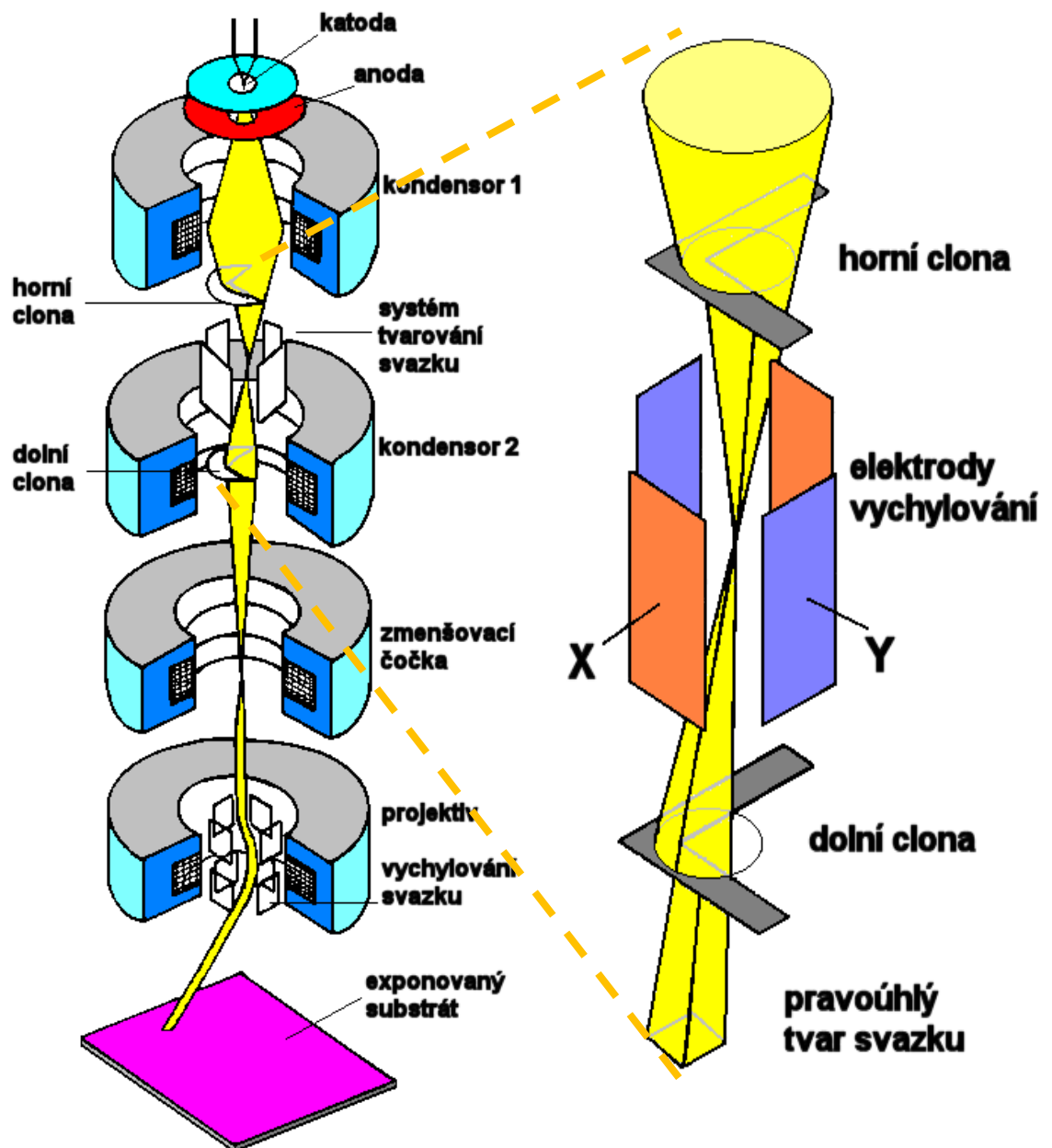
U negativních rezistů přebývá při ozáření elektrony síťovací proces. Molekuly rezistu vytvářejí trojrozměrnou síť a dochází naopak ke zvýšení molekulové hmotnosti. Působením rozpouštědla se tedy rozpustí neozářená část rezistu. Vzniká tedy negativní obraz expozice.

#### **3.2 Proces vyvolávání rezistu**

Látky používané pro rozpouštění naexponovaných částí rezistů se obecně označují jako vývojky. Jedná se o rozpouštědla kompatibilní s daným typem rezistu. Vzhledem k tomu, že rozpouštění je fyzikálně chemický proces, tak rychlost rozpouštění není dána pouze typem materiálem, ale také teplotou a způsobem provedení vlastního vyvolávání.

## 4 Elektronový litograf

Je zapisovací zařízení, které se používá pro vytvoření latentního obrazu v elektronovém rezistu za pomoci elektronového svazku.



Obr. 4.1 - Schematické zakreslení optické soustavy elektronového litografu s tvarovaným svazkem (nalevo)

Obr 4.2 - Schematické zakreslení tvarovacího systému (napravo)

## 4.1 Zařízení BS600

### Základní parametry:

Energie svazku: 15 keV

Rozměry tvarovaného svazku: 0.05 – 6.3  $\mu\text{m}$

Proudová hustota ve svazku: 0.1 – 5  $\text{A}/\text{cm}^2$

Krok vychylování svazku: 50 nm

Max. velikost vychylovacího pole 3 x 3mm

Krok interferometrů: 1.25 nm (1/512)

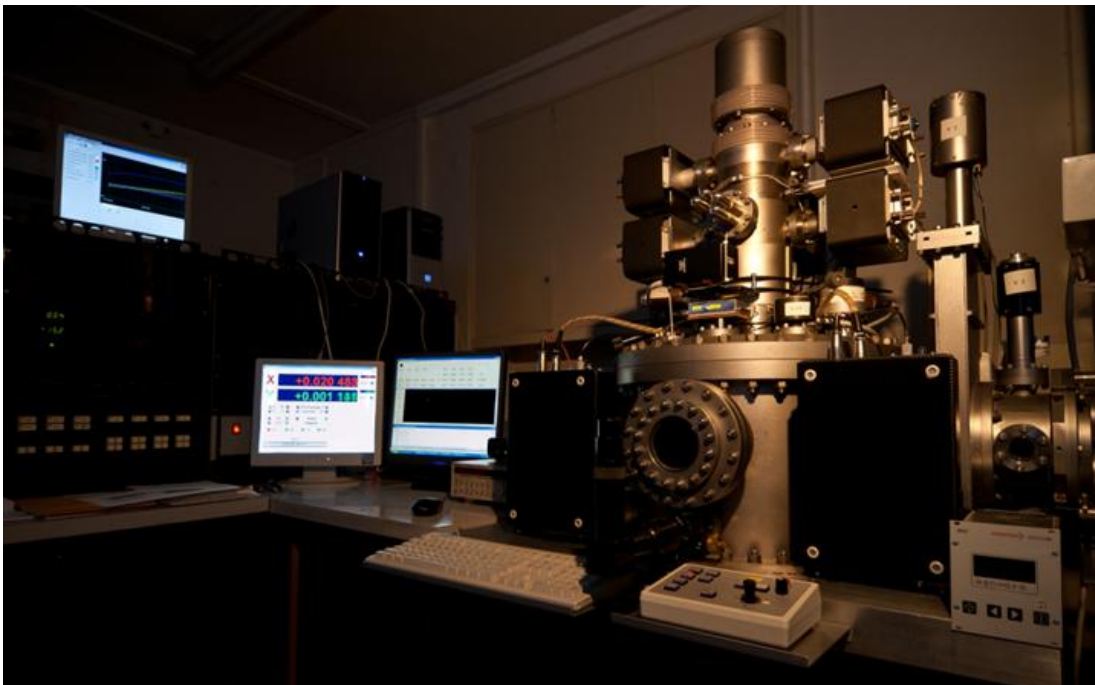
Krok korekcí: 2.5 nm

Mezní rozlišení: 100 nm

Strategie zápisu (expozice): vektorové vychylování pravoúhle tvarovaného svazku proměnných rozměrů

Maximální velikost substrátu: 4'' x 4''

Speciální off-line a on-line SW pro řízení expozice velkoplošných DOE



Obr 4.3 - Zařízení BS600 v laboratoři elektronové litografie ÚPT AVČR

## 5 Praktická část - vytvoření vlastního hologramu

V praktické části jsem se rozhodl ověřit získané znalosti o elektronové litografii vytvořením vlastního hologramu. Při výrobě se jako vzor používá bitmapa, která je zpracována programem EXPO. V tomto programu se připraví data pro samotnou expozici hologramu. Na začátku je nutné stanovit si rozměry budoucího hologramu, v mém případě 20 x 20 mm. Dále je třeba stanovit, jakému rozměru bude ve skutečnosti odpovídat 1 pixel, v mém případě 10 x 10  $\mu\text{m}$ . Z výše uvedeného jednoduchou úvahou získáme potřebný rozměr bitmapy.

### 5.1 Vytvoření bitmapy

Prvním krokem vytvoření hologramu je zpracování bitmapy požadovaného motivu. Bitmapa musí splňovat přesné parametry s ohledem na požadovaný výsledný hologram, viz stanovené parametry v předchozím odstavci. Navíc musí být v odstínech šedi, protože jednotlivým odstínům se pak přiřazují různé typy difrakčních mřížek.

Bohužel největší dostupnou velikostí loga škola bylo 189 x 267 px. Logo jsem tedy převedl do vektorové grafiky, ořízнул na čtvercový rozměr, vygeneroval bitmapu o rozměrech 2000 x 2000 px, rozlišil jednotlivá pole vhodnými stupni šedi a pozadí vybarvil černou barvou.



Obr. 5.1 - logo školy v černobílém provedení



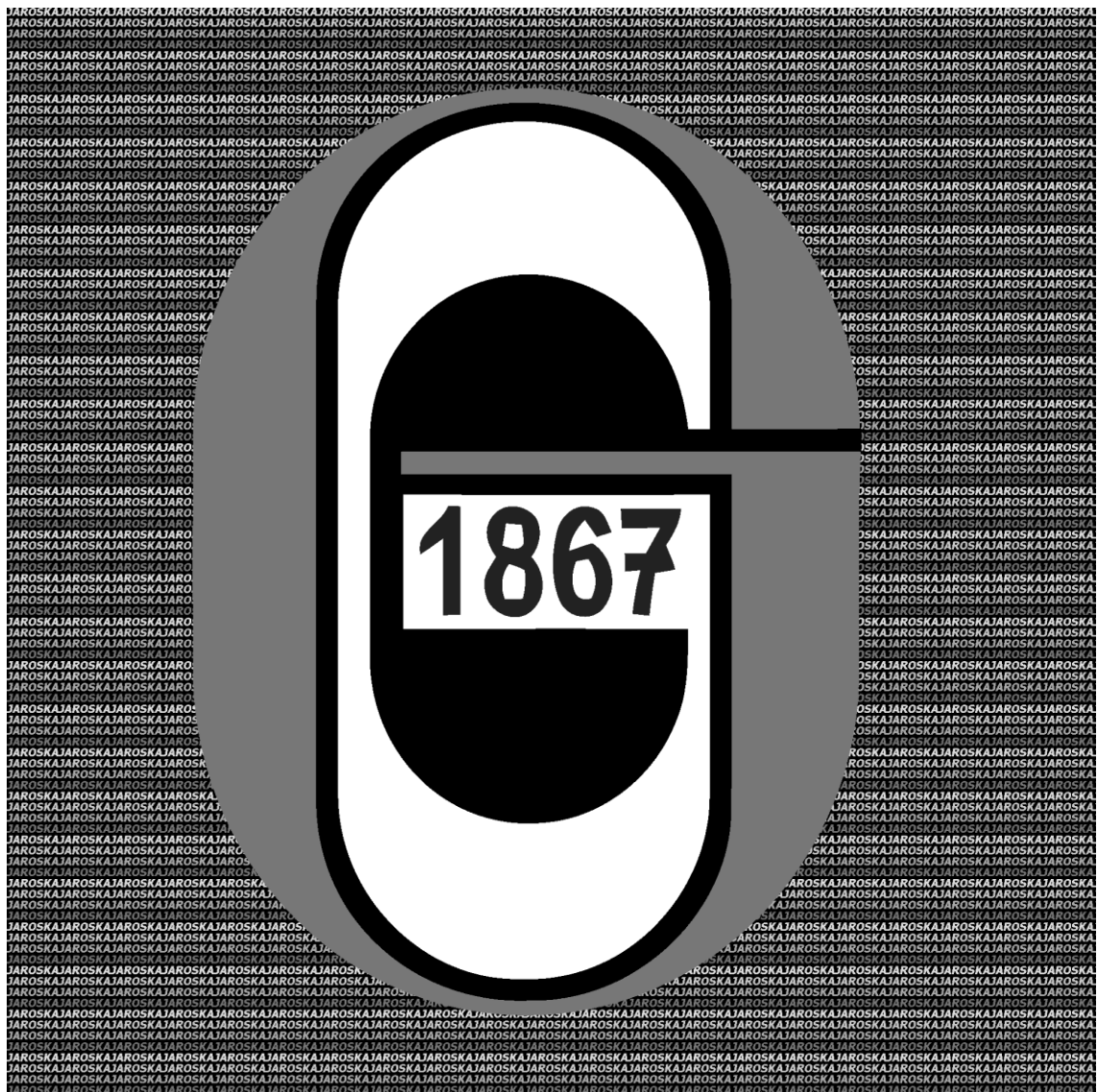
Obr. 5.2 - logo školy po úpravě

Dále jsem se rozhodl zpestřit pozadí hologramu texturou. Nakonec jsem zvolil jednoduchý nápis JAROSKA, který poukazuje na kratší používanou verzi názvu naší školy.

JAROSKA  
JAROSKA  
JAROSKA  
JAROSKA

Obr. 5.3 - ukázka textury (zvětšená)

Po úpravě odstínů barev a vymaskování pozadí texturou JAROSKA jsem získal konečnou podobu bitmapy připravenou pro další zpracování v programu EXPO.



Obr. 5.4 - konečné podoba bitmapy připravená pro další zpracování

## Údaje výsledné bitmapy:

Rozměr: 2000 x 2000 px

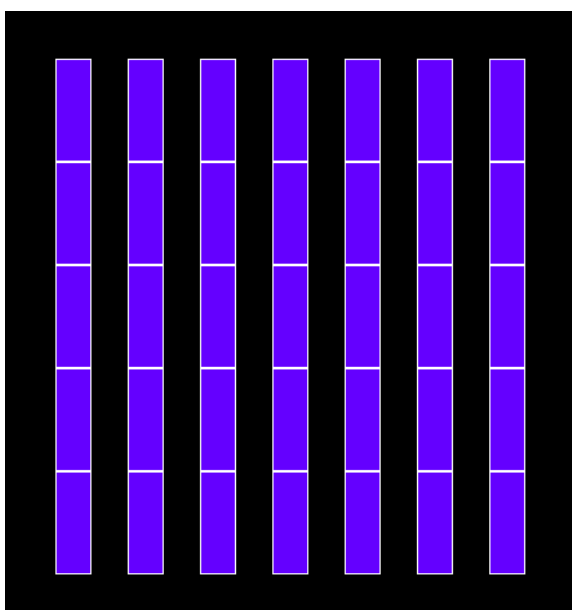
Formát: .bmp

Počet unikátních barev: 8 (stupně šedi)

## 5.2 Příprava expozice v programu EXPO

### 5.2.1 Definování difrakčních mřížek

Nejprve jsem si nadefinoval různé difrakční mřížky pro každou ze 7 barev bitmapy (samotná bitmapa je tvořena 8 barvami, ale černá barva se neexponuje). Pro svůj hologram jsem zvolil dva typy difrakčních mřížek. Horizontální mřížka je tvořena exponovanými plochami (obdélníky), které jsou orientovány vodorovně. Vertikální mřížka je tvořena exponovanými plochami (obdélníky), které jsou orientovány svisle. Horizontální popřípadě vertikální orientace mřížky je určující, pod kterým úhlem bude daná část motivu vidět nejlépe. Další parametr, který výrazně ovlivňuje výsledný hologram je perioda mřížky. Na mřížkách dochází k difrakci viditelného světla a právě perioda mřížky určuje, jakou barvou bude daná oblast "svítit".

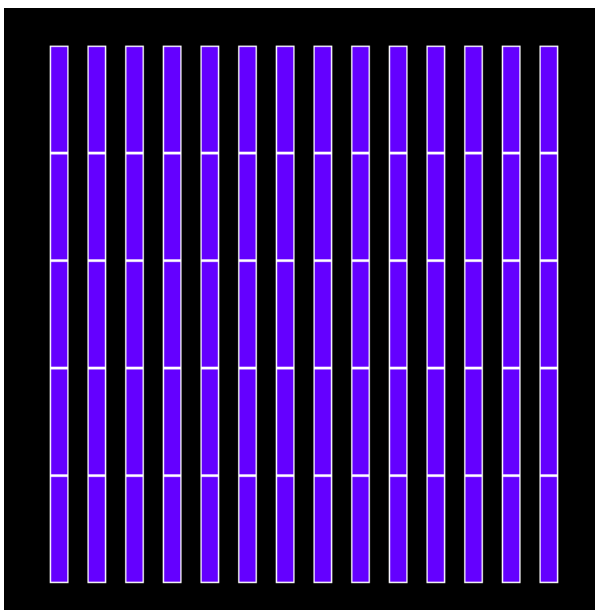


Obr. 5.5 - mřížka „jaroska\_4“

Typ: vertikální

Perioda: 1,4  $\mu\text{m}$  (difrakce na této mřížce odpovídá červené barvě)

Umístění v hologramu: ve vertikálním pořadí čtvrtý nápis v textuře

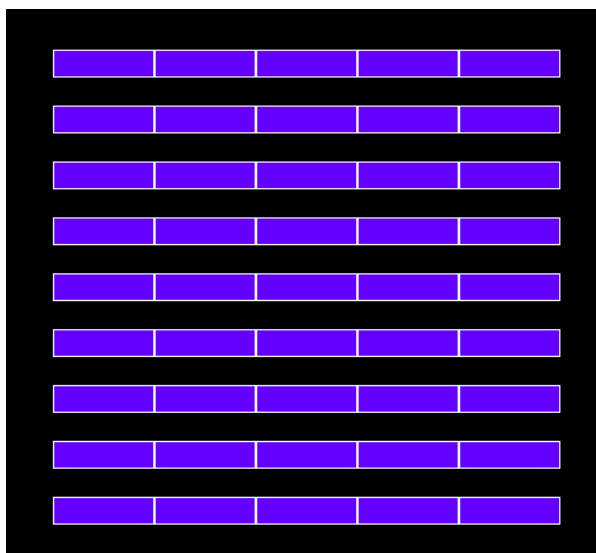


Obr. 5.6 - mřížka „jaroska\_1“

Typ: vertikální

Perioda:  $0,7 \mu\text{m}$  (difrakce na této mřížce odpovídá fialové barvě)

Umístění v hologramu: ve vertikálním pořadí první nápis v textuře



Obr. 5.7 - mřížka „napis“

Typ: horizontální

Perioda:  $1,1 \mu\text{m}$  (difrakce na této mřížce odpovídá žluté/zelené barvě)

Umístění v hologramu: nápis 1867

### 5.2.2 Definování palety barev

Dále jsem si nadefinoval tzv. paletu barev. Prakticky se jedná o přiřazení různých typu difrakčních mřížek plochám, které jsou tvořeny stejnou barvou. Výsledkem je tedy jakýsi obecný předpis, podle kterého je program schopen přiřadit každé ploše bitmapy určitou mřížku dané periody. Pomocí tohoto předpisu je pak program schopen vymaskovat mřížkou veškeré plochy se stejnou barvou.

### 5.2.3 Zkompletování expozičních dat

Dále jsem zkompletoval data pro celou expozici. Maximální možná plocha zápisu hologramu bez posunutí stolu (podložky, na které je položen substrát) se pohybuje kolem 3,2 x 3,2 mm. Doporučená plocha, vzhledem k teplotní stabilitě vychylovacích cívek, je 2 x 2 mm. Z toho vyplývá, že pro vytvoření mého hologramu o rozměrech 20 x 20 mm bude potřeba celkem 100 takových polí. Bitmapu o rozměrech 2000 x 2000 px jsem tedy rozřezal na 100 kusů (každý kus má rozměr 200 x 200 px). Každá tato dílčí bitmapa reprezentuje jednu expozici bez posunutí stolu. Výsledný hologram tedy bude vytvořen postupným zápisem jednotlivých bitmap dle zadaného vzorce. Jednotlivé bitmapy jsou pro jednoduchost pojmenovány „00“ - „99“.



Obr. 5.8 - dílčí bitmapa „55“ o rozměrech 200 x 200 px

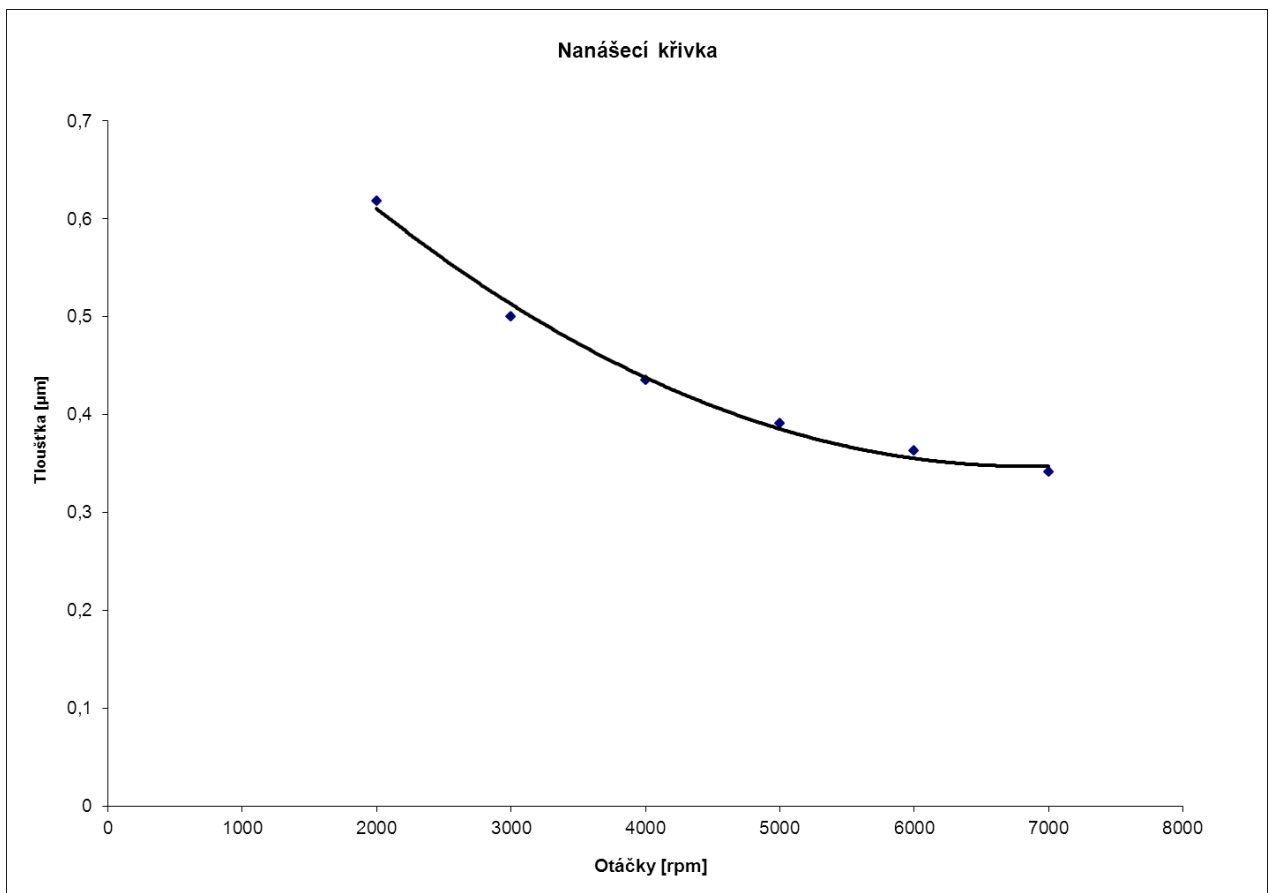


### 5.3 Příprava substrátu

Dalším krokem mé práce bylo připravit si substrát s rezistem. Jako substrát (podložku pod rezist) jsem použil standardní 4“ křemíkový wafer typu P. Jako rezist jsem se rozhodl použít PMMA (350 K) - polymethylmethakrylát, který se triviálně označuje jako akrylátové sklo či plexisklo. Konkrétně se jednalo o 9% hmotnostní roztok v anisolu.

#### 5.3.1 Nanášení rezistu

Pro vytvoření tenké vrstvy rezistu jsem použil techniku odstředivého lití. Nejprve jsem vycentroval a upevnil substrát v odstředivce. Následně jsem za pomoci injekční stříkačky s hydrofobním filtrem aplikoval rezist přímo na střed substrátu.



Ob. 5.9 - nanášecí křivka 9% PMMA (350K)

Následně jsem nastavil parametry odstředování (4000 RPM - otáčky za minutu, čas 60 s). Tyto parametry jsem nastavil s ohledem na nanášecí křivku daného rezistu. Na těchto parametrech závisí tloušťka vzniklé vrstvy, v mém případě by měla vzniknout vrstva tenká přibližně 450 nm. Poté jsem nechal proběhnout proces odstředování.



Obr 5.10 - umístění substrátu v odstředivce (spin coateru)

### 5.3.2 Sušení rezistu

Sušení rezistu jsem provedl na vyhřáté podložce (metoda hot plate). S ohledem na užitý PMMA jsem sušení provedl při teplotě 150°C po dobu 9 minut.

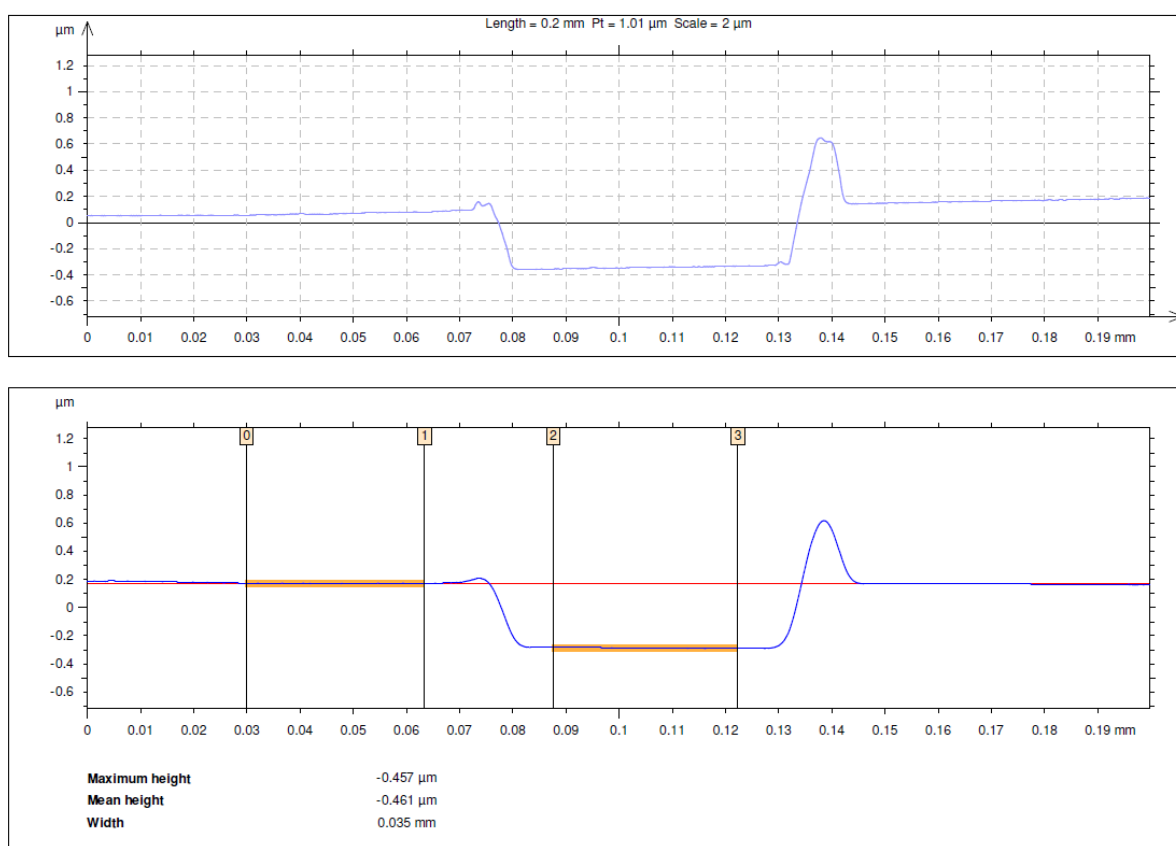


Obr 5.11 - sušení substrátu s naneseným rezistem na „hot plate“

### 5.3.3 Kontrola rezistu

Nejprve jsem zkontroloval defekty rezistu pomocí optického mikroskopu. Při této kontrole jsem nenašel výraznou chybu homogenity rezistu. Jedinými defekty byly různě velká prachová zrna, která způsobila ve svém okolí vady při odstředivém nanášení rezistu.

Dále jsem provedl kontrolu tloušťky nanesené vrstvy za pomoci profilometru. Toto zařízení funguje na principu snímání profilu povrchu za pomoci ostrého hrotu (poloměr hrotu 12,5  $\mu\text{m}$ ). Abych mohl změřit tloušťku naneseného rezistu, udělal jsem vryp na okraji substrátu (tato plocha se nebude exponovat).



Obr. 5.12 - výsledek měření tloušťky vrstvy rezistu profilometrem

Tloušťka naneseného rezistu se tedy pohybuje kolem 0,460  $\mu\text{m}$  = 460 nm (cca předpokládaná tloušťka 450 nm dle nanášecí křivky - Obr. 5.9). Tato tloušťka je použitelná pro vytvoření mnou navrženého hologramu. Máme tedy připravený rezist pro samotnou expozici.

## 5.4 Expozice

Expozice proběhla v přístroji BS600 (viz 4.1) pod vedením operátora litografu dle připravených dat v programu EXPO. Podle požadované expoziční dávky  $7 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$  pro daný rezist a vývojku se vypočítal expoziční čas jednoho razítka,  $t_{\square} = 100 \mu\text{s}$ .

## 5.5 Vyvolání

Pro vyvolání zapsaného latentního obrazu jsem použil vývojku V11 na bázi acetonu. Substrát jsem opět vložil do odstředivky a aplikoval vývojku. Po přesně stanoveném čase jsem provedl odstředění, kterým jsem odstranil rozpuštěné fragmenty rezistu. Vzhledem k snížené účinnosti vývojky vlivem nízké laboratorní teploty jsem musel vyvolávání provést třikrát, abych dosáhl optimální hloubky mřížek v hologramu. Ta se pohybuje kolem 130 nm.

### Zápis vyvolávání:

Vývojka: V11

#### Krok 1

Teplota vzduchu: 19 °C

Teplota vývojky: 20.2 °C

Doby vyvolávání: 70 s

#### Krok 2

Teplota vzduchu: 19 °C

Teplota vývojky: 19.5 °C

Doby vyvolávání: 35 s

#### Krok 3

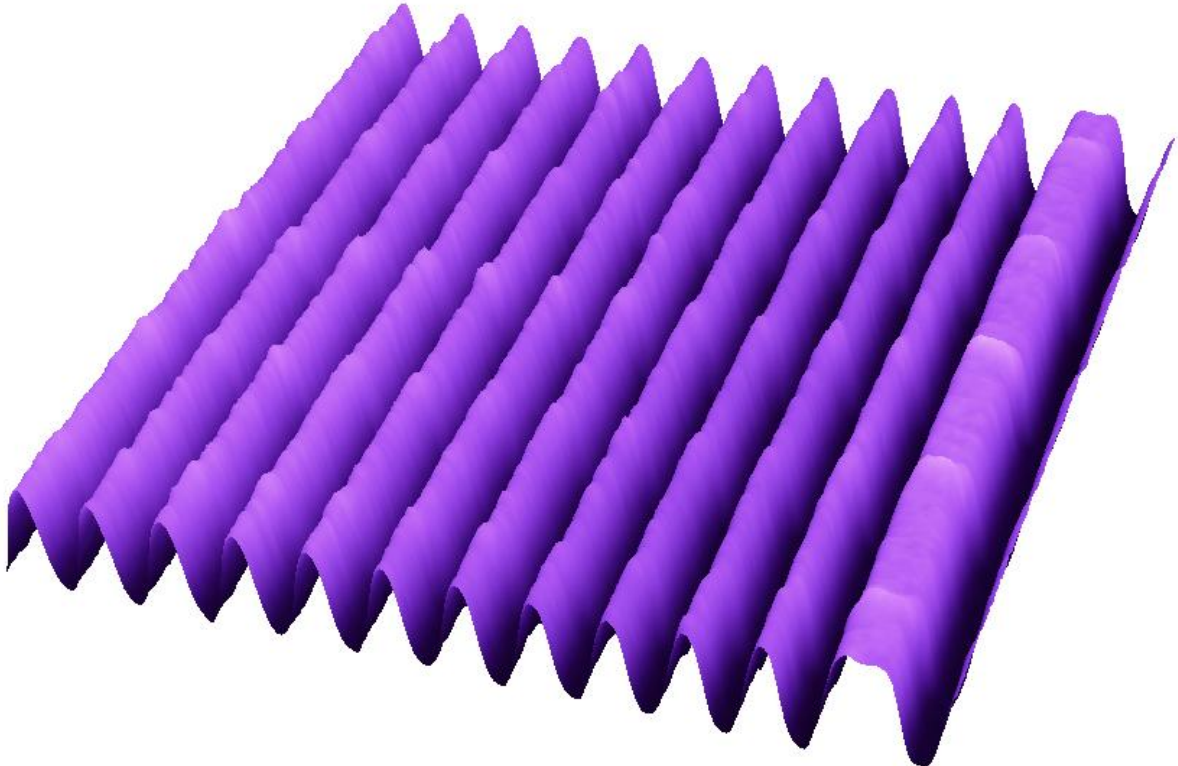
Teplota vzduchu: 20,5 °C

Teplota vývojky: 19,6 °C

Doby vyvolávání: 35 s

## 5.6 Měření vyvolaného hologramu na AFM

Pro kontrolu hloubky mřížek u vyvolaného hologramu jsem použil mikroskop atomárních sil (AFM). Výhodou AFM oproti elektronovému mikroskopu je jeho schopnost zachytit zkoumaný materiál trojrozměrně. Samotný AFM funguje na principu rastrování jemného hrotu v kontaktu s povrchem. Výchytky jsou zaznamenávány a jejich zpracováním vzniká výsledný obraz.



*Obr. 5.12 - profil mřížky vnějšího obrysu (perioda  $0.8 \mu\text{m}$ ) z AFM (rozměr scanu  $10 \times 10 \mu\text{m}$ )*

## 5.7 Pokovení

Posledním krokem výroby masteru hologramu je vytvoření ochranné povrchové vrstvy pokovením. Pokovení hologramu jsem provedl metodou naprašování. Substrát je umístěn ve vakuové komoře pod stříbrným terčem. Jako pracovní plyn je použit argon, který se zavede do vakuové komory po odčerpání vzduchu. Samotné pokovení je provedeno díky rozdílným potenciálům substrátu a terče.

### **Zápis pokovení:**

Tlak po vyčerpání vzduchu: 6 Pa

Tlak po zavedení argonu: 9 Pa

Proud: 55 mA

Doba naprašování: 5 min

Tloušťka vzniklé vrstvy: 100 nm

## 6 Výsledný hologram



*Obr. 6.1 - foto hologramu pod lupou*



*Obr. 6.2 - foto hologramu pod lupou*



*Obr. 6.3 - foto detailu textury pod lupou*



*Obr. 6.4 - foto detailu textury pod lupou*





*Obr. 6.5 - foto detailu letopočtu pod lupou*



*Obr. 6.6 - foto detailu letopočtu pod lupou*



*Obr. 6.6 - foto detailu letopočtu pod lupou*

## **7 Závěr**

Hlavním cílem této práce bylo seznámit se se základními fyzikálními principy elektronové litografie a tyto poznatky poté využít při tvorbě vlastního hologramu. Dalším cílem bylo zdokumentování postupu tvorby tohoto hologramu. Všechny cíle práce byly naplněny a výsledný hologram se povedlo vytvořit v adekvátní kvalitě.

## **Seznam použité literatury**

MATĚJKA, František Mgr. *Praktická elektronová litografie*. 1. vydání. Brno: Ústav  
přístrojové techniky AV ČR, březen 2012. 63 plus 25 stran příloh. ISBN 78-80-87441-  
04-6

### **Internetové zdroje:**

<http://cs.wikipedia.org/wiki/PMMA>

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Litografie>

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%A1\\_litografie](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%A1_litografie)

<http://cs.wikipedia.org/wiki/AFM>

[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25484](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Profilometer>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_beam\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_lithography)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_force\\_microscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy)