

PROPERTIES STUDY OF PERIODIC GRATINGS PREPARED BY ELECTRON-BEAM LITHOGRAPHY

Stanislav Krátký

Master Degree Programme (1), FEEC BUT

E-mail: xkratk01@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Milan Matějka

E-mail: xmatej28@stud.feec.vutbr.cz

Abstract: This project deals with process of the binary periodic gratings creation by way of electron-beam lithography. These gratings are used to create Diffractive Optical Elements (DOE). The main goal of this project is determination of the dependence of the grating's depth on its period. The grating's depth actually affects behaviour of optical properties of DOE. The measurement of diffraction efficiency is contained in the project as an example.

Keywords: diffraction, electron-beam lithography, periodic gratings,

1. ÚVOD

Tato práce se zabývá procesem tvorby binárních periodických mřížek pomocí reliéfní elektronové litografie. Mřížky jsou vytvořeny v elektronovém rezistu. Takovéto mřížky se používají k přípravě složitějších difrakčních optických elementů (DOE), jako jsou například hologramy. Tato práce se zaměřuje na zkoumání geometrických parametrů vytvořených difrakčních mřížek, jež ovlivňují optické vlastnosti DOE. Hlavním cílem tohoto projektu je stanovit závislost hloubky mřížky na její periodě a zjednodušit tak návrh DOE. Dále je zde provedeno měření difrakční účinnosti zhotovených mřížek, aby bylo vidět, jakým způsobem hloubka a perioda mřížky konkrétně ovlivňuje optické vlastnosti DOE.

2. TEORETICKÝ ROZBOR

2.1. ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

Elektronová litografie je fyzikálně-chemický proces přenosu obrazu pomocí elektronového svazku. Obraz je přenášen do elektronového rezistu naneseného obvykle na křemíkový substrát. V případě reliéfní elektronové litografie dochází k vytváření obrazu pouze v rámci části objemu rezistové vrstvy. Tato metoda se používá např. k testování vlastností rezistů nebo k přípravě tiskařských šablon pro tisk holografických ochranných známek. Elektronový rezist je polymerní látka citlivá na elektronové záření. Po vystavení rezistu dávce urychlených elektronů dojde k chemicko-fyzikálním reakcím, které mění jeho výsledné vlastnosti. To takovým způsobem, že buď dojde k sesíťování rezistové vrstvy (negativní rezist), nebo k rozrušení polymerních vazeb (pozitivní rezist). Mimo jiné i vlastnosti rezistu ovlivňují parametry výsledné expozice (např. maximální rozlišení). K expozici dochází v elektronovém litografu, kde jsou elektrony generovány autoemisní katodou při teplotě asi 1800 K a poté urychlovány napětím pro dosažení požadované energie. Svazek urychlených elektronů je následně tvarován a fokusován pomocí clon a elektromagnetických čoček na povrch substrátu. V případě, že jde o tzv. přímý zápis, odpadá nutnost použití tvarovacích masek. Vzorky zhotovené v této práci jsou připraveny na elektronovém litografu BS600, který je umístěn v laboratoři elektronové litografie na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně. Jde o litograf s kvadratickým svazkem proměnného průřezu pracující s elektrony urychlenými na energii 15 keV. Maximální dosažitelné rozlišení je 50 nm. Výhodou elektronové litografie je expozice bez

použití masky, jednoduchost návrhu exponovaného obrazu pomocí počítače a velké maximální rozlišení. Nevýhodou je pak časová náročnost expozice a vysoké náklady na zařízení.

2.2. BINÁRNÍ MŘÍŽKY

Binární mřížky jsou dvouúrovňové struktury (v našem případě periodické), jež jsou charakterizovány periodou (nejmenší vzdálenost mezi dvěma opakujícími se částmi reliéfu), střídou (poměr šířky jednotlivých úrovní) a hloubkou profilu. Tyto mřížky se využívají k tvorbě reflexních DOE. Obecně platí, že mřížky, na kterých má dojít k difrakci, musí mít rozměry srovnatelné s vlnovou délkou dopadajícího záření. Návrhem parametrů mřížky určujeme výsledné optické vlastnosti DOE. Především jde o dosažení nejvyšší difrakční účinnosti, tj. jaká část výkonu dopadajícího záření difraktuje do daného řádu. Mimo jiné právě hloubka mřížky nám ovlivňuje výslednou difrakční účinnost. U binární mřížky můžeme dosáhnout maximální difrakční účinnosti v 1. a -1. řádu 40%. Této účinnosti dosáhneme u mřížek se střídou 1:1, jestliže bude hloubka mřížky rovna přibližně jedné čtvrtině vlnové délky dopadajícího záření. Vzhledem k množství nežádoucích jevů při expozici (nekonstantní proudová hustota elektronového svazku, proximity efekt) je obtížné dosáhnout přesně požadované hloubky. Stanovení závislosti hloubky mřížky na její periodě by proto mělo zjednodušit návrh reflexních DOE.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. PŘÍPRAVA EXPOZIČNÍCH DAT

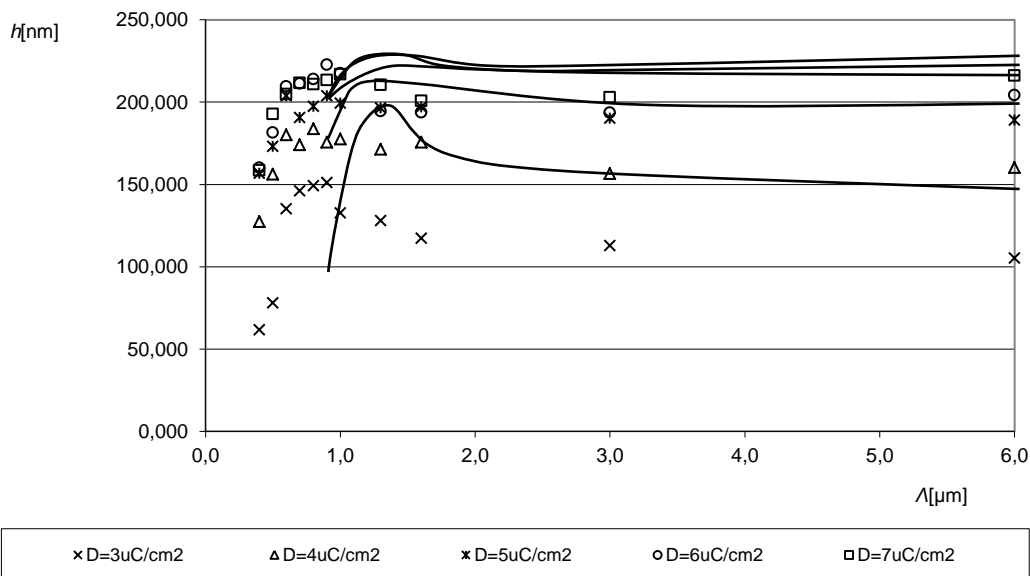
K expozici byly navrženy binární mřížky s periodami 6; 3; 1,6; 1,3; 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4 a 0,3 μm , všechny se střídou 1:1. Všechny mřížky byly připraveny pro pět různých expozičních dávek. Základní expoziční dávka byla stanovena tak, aby po vyvolání rezistu bylo dosaženo hloubky mřížky přibližně 160 nm, což odpovídá jedné čtvrtině vlnové délky záření, kterým bude provedeno měření difrakční účinnosti. Tato základní expoziční dávka $5 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ byla stanovena z křivky citlivosti pro použitý rezist (závislost relativní hloubky profilu na expoziční dávce). Zbylé čtyři dávky byly stanoveny na hodnoty $\pm 20\%$ a $\pm 40\%$, což by mělo poskytnout dostatečně široký interval hodnot.

3.2. PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU, EXPOZICE A VYVOLÁVÁNÍ

Expozice byla provedena do rezistu ESSA PMMA (9%_{hm} roztok polymetylmetakrylátu v anisolu) na 3'' Si substrát. Rezist byl nanesen odstředivým litím na vakuové odstředivce. Následným měřením byla zjištěna hloubka rezistu 1,12 μm , což bylo pro náš záměr dostačující. Po provedení expozice následovalo vyvolávání s kontrolou měření dosažené hloubky profilu mřížek. Po vyvolávání bylo dosaženo hloubky 170 nm u dávky $5 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$, což přibližně odpovídá požadované hloubce 160 nm.

3.3. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ HLOUBKY MŘÍŽKY

Následovalo měření všech mřížek na mikroskopu atomárních sil. V ideálním případě by naměřené hloubky u mřížek s různými periodami byly totožné pro danou expoziční dávku. Jak je vidět na obrázku 1, skutečnost je poněkud odlišná. Celkový trend křivek je pro jednotlivé dávky přibližně stejný. Pro mřížky s periodou do 1 μm je hloubka téměř konstantní. Závislosti dosahují svého maxima pro mřížky s periodou 0,9 μm a poté prudce klesají. Dále je ze závislostí patrné, že s větší expoziční dávkou se zvyšuje hloubka mřížek, ovšem o stále menší hodnotu (podle fyziky rezistu by očekávaný výsledek měl být opačný, totiž se zvyšující se dávkou budou stále větší rozdíly hloubky mřížky mezi jednotlivými dávkami). Odchylka od ideálního průběhu (maximum u mřížek s periodou 9 μm) byla s největší pravděpodobností způsobena nestabilitou proudové hustoty elektronového svazku při expozici. U mřížek s nejmenší periodou došlo k rapidnímu poklesu hloubky vlivem proximity efektu, kdy dochází k exponování oblastí, které nejsou přímo vystaveny elektronovému svazku, a tudíž následně dochází k nechtěnému vyvolání těchto oblastí.



Obrázek 1: Závislost hloubky mřížky na její periodě pro různé expoziční dávky

3.4. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DIFRAKČNÍ ÚČINNOSTI

Před měřením difrakční účinnosti bylo nutno vzorek pokovit stříbrem k dosažení maximální odrazivosti povrchu mřížek. Jako zdroj měřeného záření posloužil laser o vlnové délce 635 nm. K měření difrakční účinnosti resp. intenzity difraktovaného záření byl použit digitální luxmetr. Z naměřených hodnot vyplynulo, že nejlépe se podařilo „naladit“ mřížky s expoziční dávkou $4 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$. Mřížky s periodou menší jak $0,7 \mu\text{m}$ nebyly zahrnuty do měření, protože pro vlnovou délku použitého záření nesplňovaly difrakční podmínku, tudíž nedocházelo k difrakci.

4. ZÁVĚR

Pro vytvořené binární mřížky zde byla stanovena závislost hloubky mřížky na její periodě. Tato závislost a poznatky uvedené výše by měly posloužit ke zjednodušení návrhu a tvorby reflexních difrakčních elementů. Na měření difrakční účinnosti bylo ukázáno, jak některé geometrické parametry binárních mřížek ovlivňují optické vlastnosti zmíněných DOE.

5. PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla za podpory projektu TIP FR-TI1/574, FR-TI1/576 a projektu Application laboratories of advanced microtechnologies and nanotechnologies, CZ.1.05/2.1.00/01.0017, spolusponzovaného z operačního programu „Výzkum a vývoj pro inovace“. Poděkování patří i pracovníkům na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR za možnost použít potřebné přístroje a techniku.

REFERENCE

- [1] MATĚJKA, F. *Elektronová litografie: Teoretické základy a rezistové procesy* [online]. 2/2007 [1/2011]. Dostupné z WWW: <http://www.isibrno.cz/teams/EBL/eb1_fm.pps>.
- [2] MILER, M. *Fyzika a holografické difrakční struktury* [online]. 2/2007 [1/2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.opto.cz/miler/index.html>>.