

Víceúrovňové zobrazovací difraktivní struktury připravované elektronovou litografií

Seminář ÚPT AV ČR

Brno - září 2002

František Matějka



Několik slov úvodem

- Problematika víceúrovňových difrakčních struktur je částí řešení projektu Programu podpory cíleného výzkumu a vývoje názvu: Elektronová litografie pro reliéfní submikrometrové difrakční struktury.
- Spoluřešitelskými pracovišti projektu jsou: České vysoké učení technické v Praze, Katedra fyzikální elektroniky FJFI a dále Vysoké učení technické v Brně, Ústav mikroelektroniky FEKT

Představení řešitelského týmu

- Interní pracovníci:

Jiřina Matějková

Eduard Kunc

Miroslav Horáček

František Matějka

- Spoluřešitelské pracoviště ČVUT Praha:

Pavel Fiala

Ivan Richter

- Spoluřešitelské pracoviště VUT v Brně:

Vladimír Kolařík

Lukáš Daněk

- Kooperující pracoviště - ÚFI Fakulty strojního inženýrství
VUT v Brně:

Filip Lopour

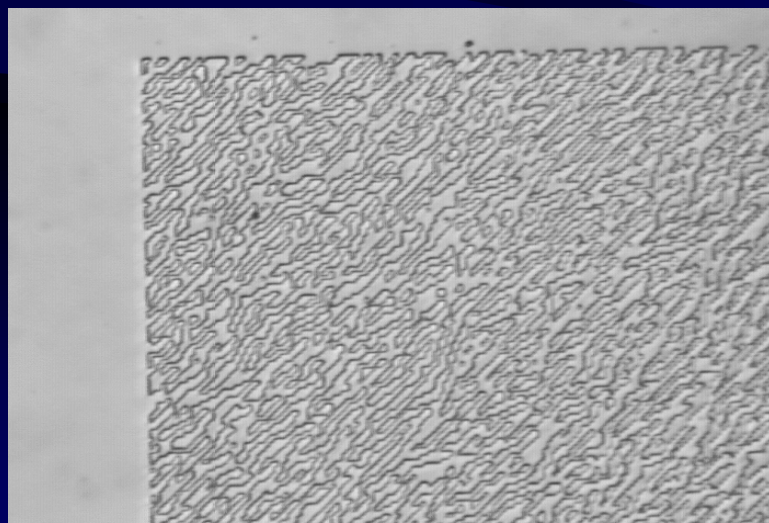
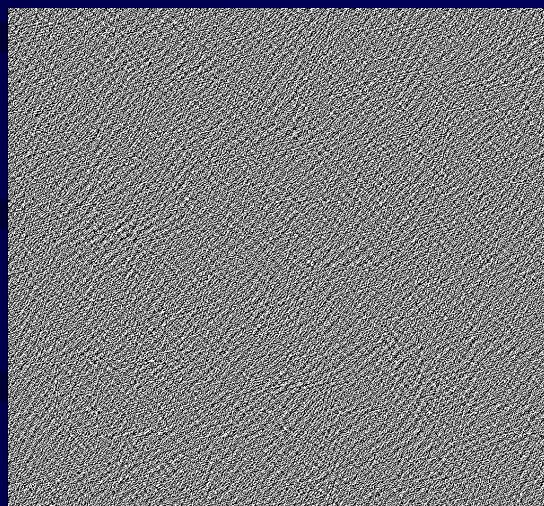
Některé základní informace

- Předmětem našeho zájmu jsou fázové difrakční optické elementy - PDOEs (Phase-only Diffractive Optical Elements) Fourierovského typu.
- Fourierovské PDOEs mohou být podle struktury vrstvy ovlivňující fázi světelného záření v principu buď binární, nebo víceúrovňové (multilevel) a dále transparentní, nebo reflexní.
- Pro výpočet a konstrukci celkového 2d-3d designu difrakční mikrostruktury tvořící F-PDOE je nezbytná velmi silná počítačová podpora. Odtud pramení název počítačová holografie, respektive počítačem generované hologramy (CGHs - Computer Generated Holograms).
- Pro výpočet designu PDOEs jsou užívány algoritmy neiterativní a iterativní Fourierovy transformace (Iterative Fourier Transform Algorithm -IFTA).
- Pro výrobu CGHs jsou zapotřebí litografické techniky a technologie zpracování tenkých vrstev na úrovni submikrometrového rozlišení.
- Mikrostruktury CGHs nemají periodickou povahu (povahu mřížek).
- Naš přístup k řešení - realizovat CGHs přímo elektronovou litografií jen ve vrstvě rezistu (PMMA).

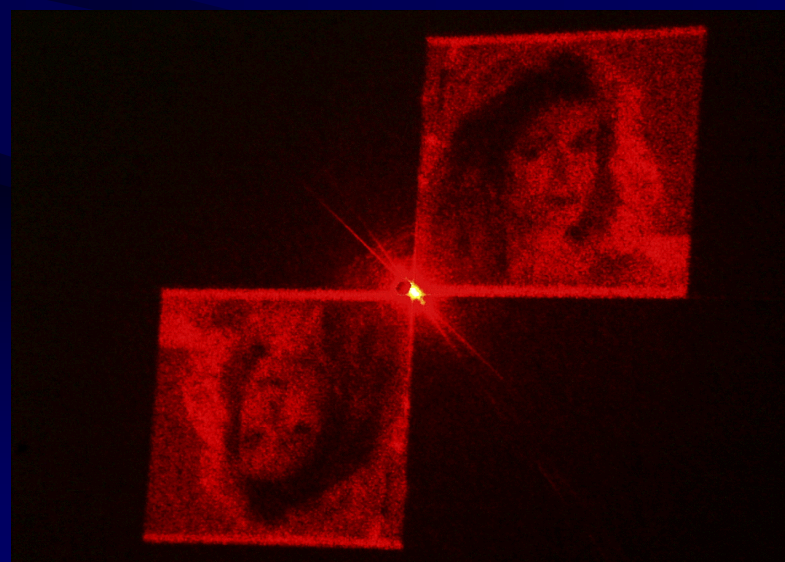
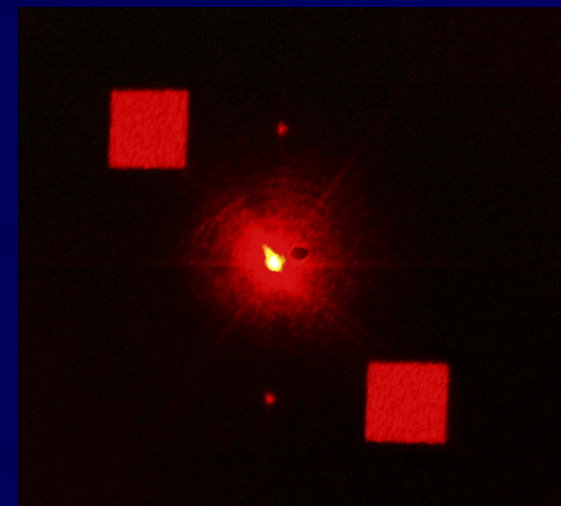
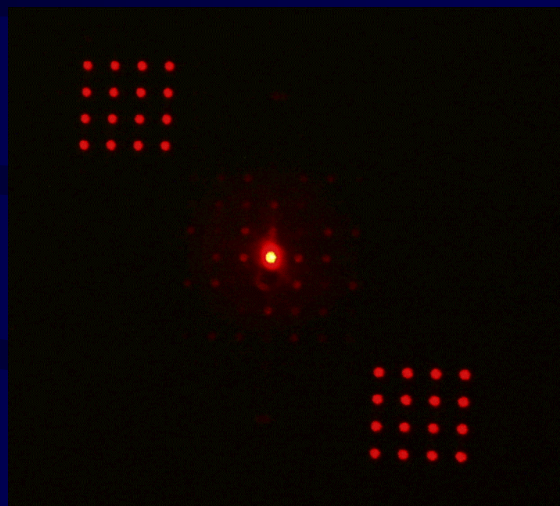
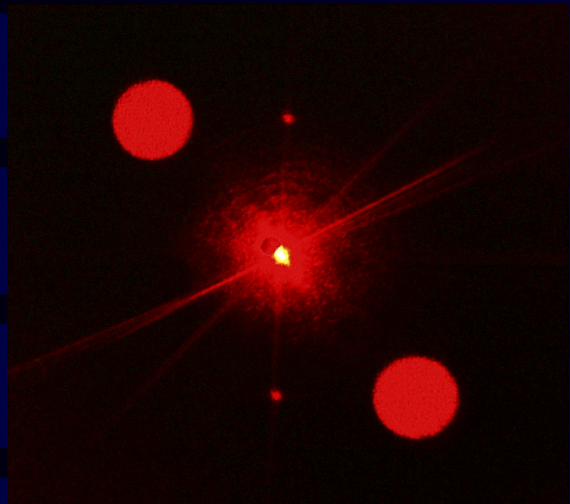
Schéma přípravy binární mikrostruktury CGH

- Výchozí počítačový obraz (č-b bitmapa 256x256 , 512x512 , 1024x1024)
- Výpočet odpovídající difraktivní struktury pomocí zvolené metody (IFTA) - výsledkem je č-b bitmapa (256x256 , 512x512 , 1024x1024).
- Vytvoření zdrojového expozičního souboru pro řídicí systém litografu - možná volba velikosti exponovaného pixelu odpovídajícímu pixelu bitmapy (0.3 až 1 μ m), volba velikosti čipu multiplikací výchozí bitmapy (obvykle 3x3 až 4x4mm)
- Příprava substrátu pro expozici (přesná tloušťka rezistu, případná depozice velmi tenké vrstvy kovu na rezistu pro zvodivění jeho povrchu).
- Expozice v elektronovém litografu (EBL).
- Vyvolání exponované struktury ve vývojce (u nevodivých substrátů předchází této operaci odleptání vodivé vrstvy na povrchu rezistu).
- Dostavení opticky aktivní tloušťky rezistu plazmatickým leptáním v kyslíku.
- Pokovení povrchu rezistu v případě, že je struktura opticky reflexní.

Ukázka transparentní binární struktury CGH

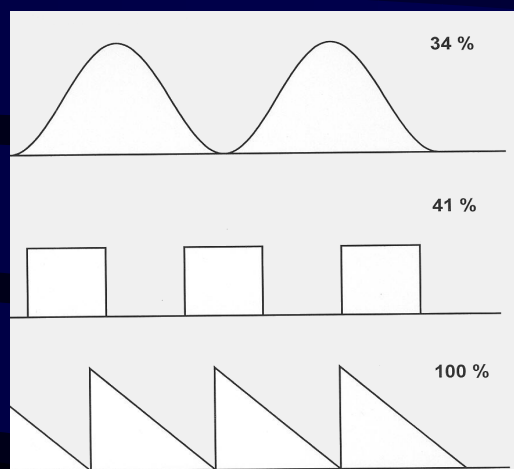


Ukázky difraktogramů reflexních binárních CGH



Problematika víceúrovňových difraktivních struktur a vliv profilu reliéfu na difrakční účinnost

- Vliv profilu difraktivní mikrostruktury na difrakční účinnost v prvním difrakčním řádu a možnosti náhrady pilového profilu profilem stupňovitým:



Výška reliéfu pro binární difraktivní struktury

transparentní $d_{tr} = \lambda/2(n-1)$

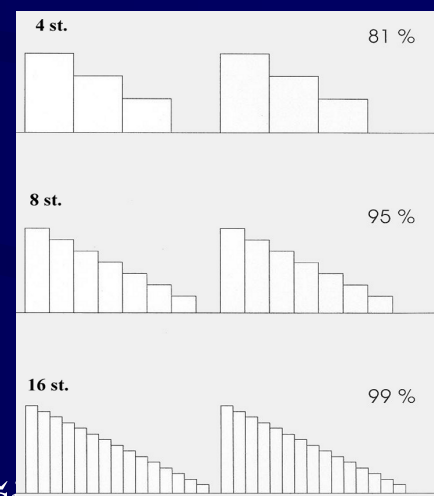
reflexní $d_{re} = \lambda/4$

Výška reliéfu pro víceúrovňové struktury - podle řešení návrhu.

V našem případě:

transparentní $d_{max} = \lambda/2(n-1)$
pro HeNe laser a PMMA ($n = 1.5$)
 $d_{max} = 632.8\text{nm}$

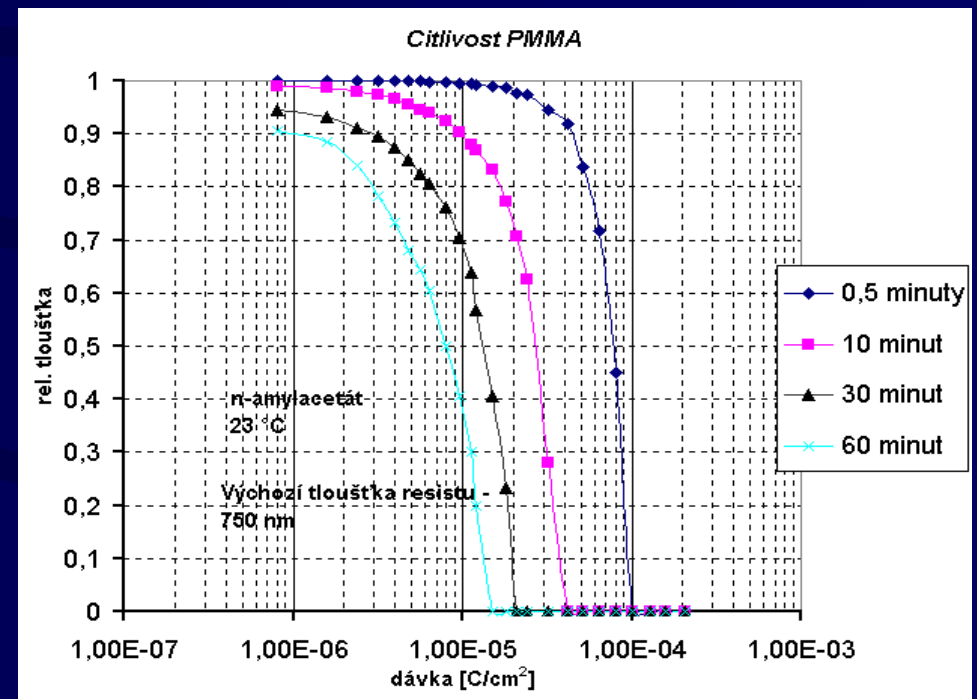
reflexní $d_{max} = 3\lambda/8$
pro HeNe laser $d_{max} = 237.3\text{nm}$



- Víceúrovňové a zároveň difraktivní struktury ovlivňují v širším rozsahu úhlovou distribuci zpracovávaného signálu světelného záření. Důsledkem je větší difrakční účinnost, soustředění žádaného signálu jen do kladné části prvního difrakčního řádu, potlačení signálu ve vyšších difrakčních řádech, zásadní zlepšení poměru signál/šum, potlačení signálu v nultém řádu.

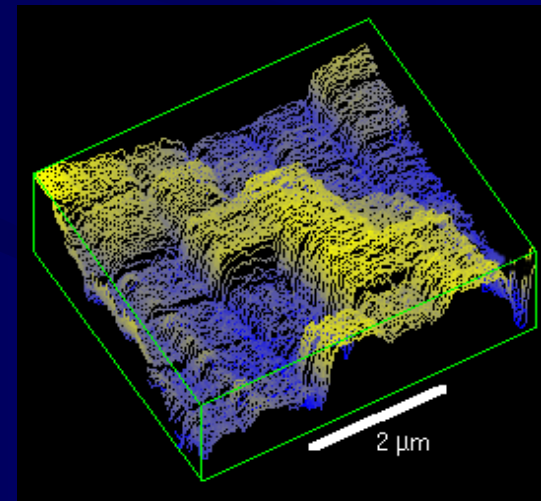
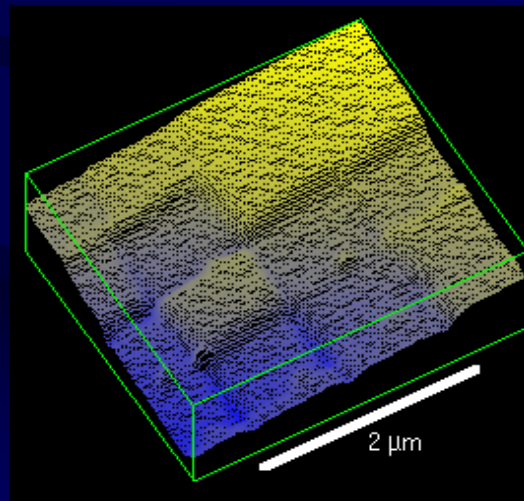
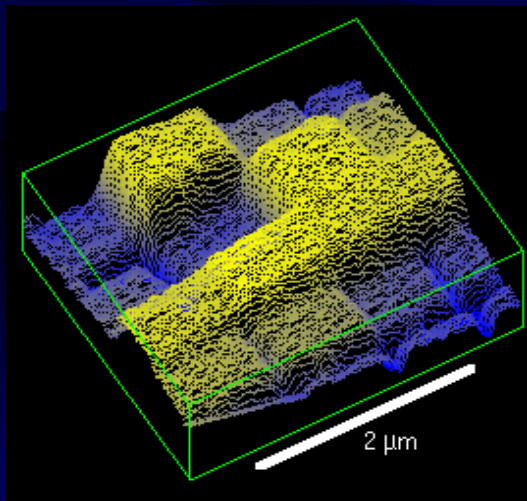
Litografické vlastnosti rezistu PMMA

- Základní praktickou vlastností elektronového rezistu PMMA je jeho tzv. plošná citlivost vyjádřená závislostí relativní tloušťky na logaritmu dávky ozáření elektrony při daných podmínkách vyvolávání a dané výchozí tloušťce rezistu.
- Z grafu je patrné, že kombinací expoziční dávky a doby vyvolávání je možné ovlivnit výšku reliéfu rezistu. Dále je patrné, že pro tvorbu víceúrovňového reliéfu by byl výhodnější horší kontrast rezistu (směrnice lineární části křivek - menší strmost = horší kontrast)



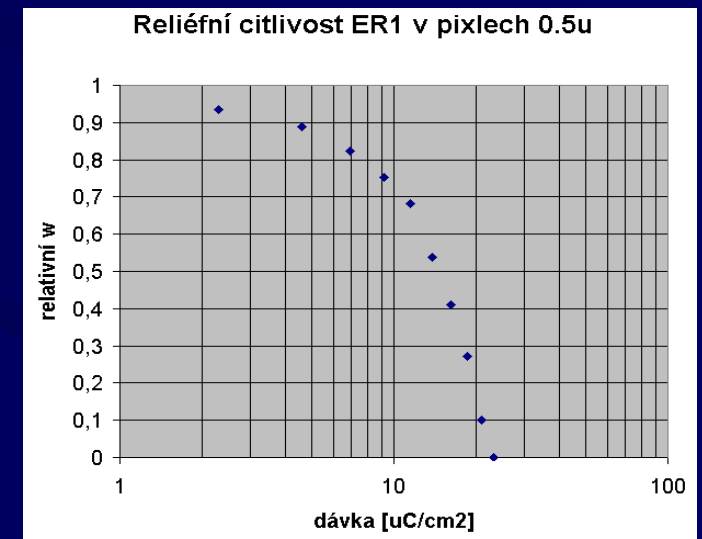
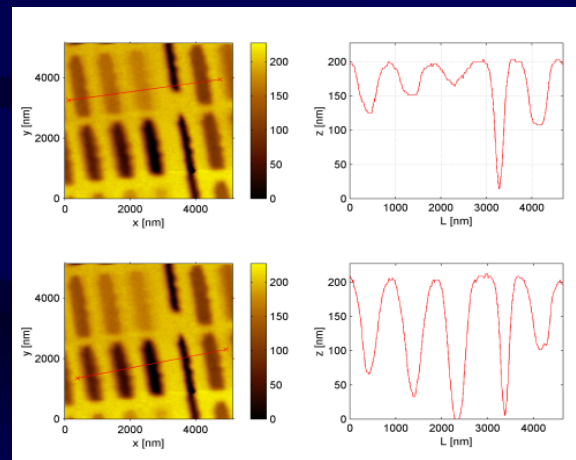
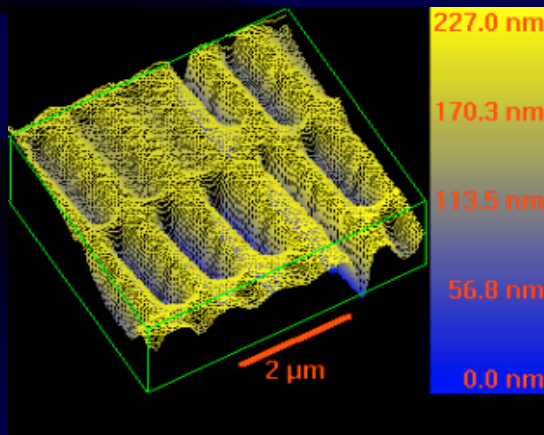
Studium vlastností PMMA v mikrorozměrech pomocí AFM.

- Na různých testovacích strukturách (základní pixel 0.5x0.5 a 1x1mm) jsme zkoumali litografické chování vrstev PMMA v mikrorozměrech. Na snímcích jsou ukázky mikroreliefů vytvářených změnami expoziční dávky základního pixelu. Změna dávky při expozici je realizována změnou expoziční doby.
- Experimenty prokázaly, že tvorba mikroreliefů v PMMA je v principu možná a že hlavním problémem řešení bude přesné dodržení rozměrů výšek reliéfu.



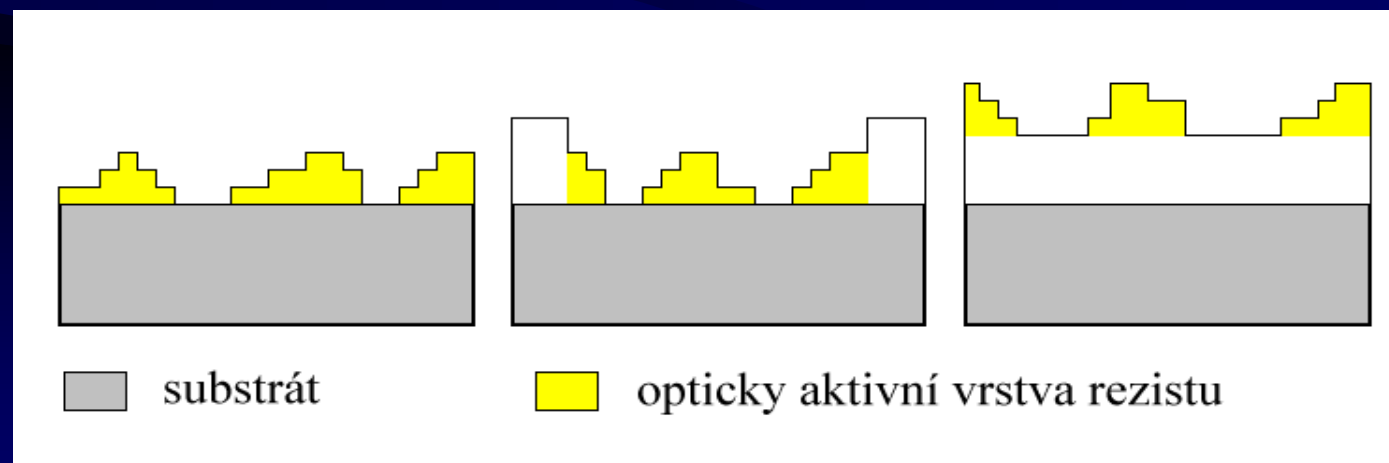
Mikroreliefní citlivost PMMA

- Prvním nutným krokem řešení problematiky víceúrovňových difraktivních struktur bylo stanovení mikroreliefní citlivosti rezistu PMMA. Vytvořili jsme pro tento případ několik geometricky různých testů přizpůsobených pro vyhodnocování pomocí AFM. 2D záznamy z AFM byly následně analyzovány pomocí programu „Profile“ pracujícího pod MATLAB (autor Ing.F.Lopour).



Z grafů reliéfní citlivosti PMMA (pro různé výchozí tloušťky rezistu) je možné vyvodit tři odlišné strategie expozice pro vytvoření stupňovitého reliéfu a to:

- využití celého rozsahu závislosti tloušťka /dávka , výchozí tloušťka rezistu pro expozici musí být přibližně rovna d_{max} - tento postup používáme hlavně z praktických důvodů. Příklad posloupnosti dávek v % pro 8 úrovní je 0, 40, 53, 63, 72, 81, 90, 100.
- využití lineární části (včetně bodu charakterizujícího klasickou litografickou citlivost rezistu což je dávka, kdy je výška reliéfu právě nulová) - výchozí tloušťka musí být větší než d_{max} - tento postup vyžaduje expozici jedné úrovně navíc
- využití nelineární části závislosti tloušťka/dávka (oblast malých expozičních dávek) - výchozí tloušťka rezistu musí být mnohem větší než d_{max} (min 2x) - tento postup může být výhodný z hlediska „proximity efektu“, ale je velmi citlivý na rozptyl parametrů technologie.

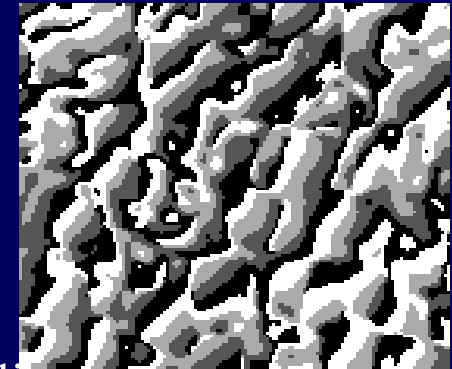
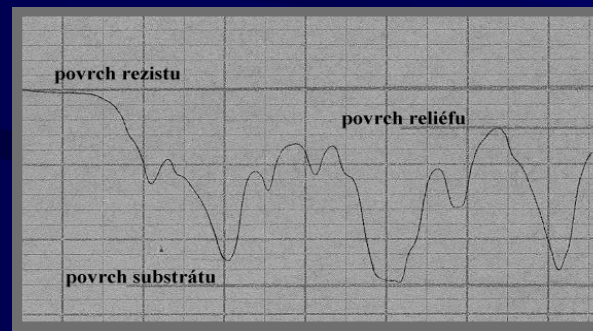
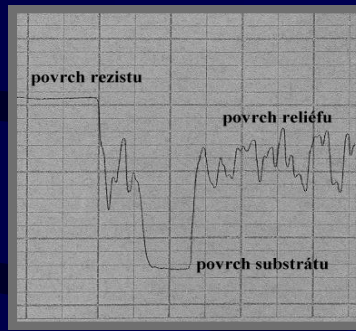
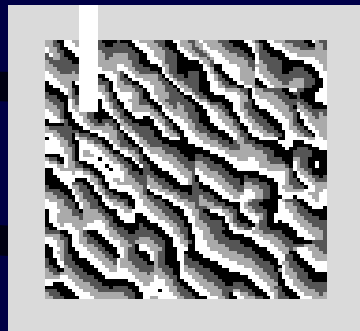


Omezení vlivu „proximity efektu“ při expozici víceúrovňových struktur

- Do stanovení expoziční dávky pro jednotlivé úrovně (stupně) musí být zahrnut i vliv „proximity efektu“, aby mohly být s dostatečnou přesností dodrženy rozměry velikosti výšek jednotlivých stupňů výsledného reliéfu difraktivní struktury (proximity efekt se projevuje tak, že každý exponovaný pixel získává vlivem zpětně odraženým elektronům od svých blízkých sousedů jistou dávku navíc).
- Dosud publikované metody řešení problematiky proximity efektu při elektronové litografii se týkají pouze klasické litografie, tj. binárního reliéfu v rezistu a pro náš případ nebylo možné je využít.
- Úplné řešení vlivu efektu blízkých expozic pro náš případ bylo nad naše možnosti. Vyžadovalo by vypracování speciálního SW pro přípravu expozičních dat (řešení „on line“ při expozici v rámci řídicího systému by neúnosně prodloužilo celkovou dobu expozice).

Z uvedených důvodů jsme se zaměřili pouze na částečné řešení vlivu efektu blízkých expozic a to ve dvou krocích.

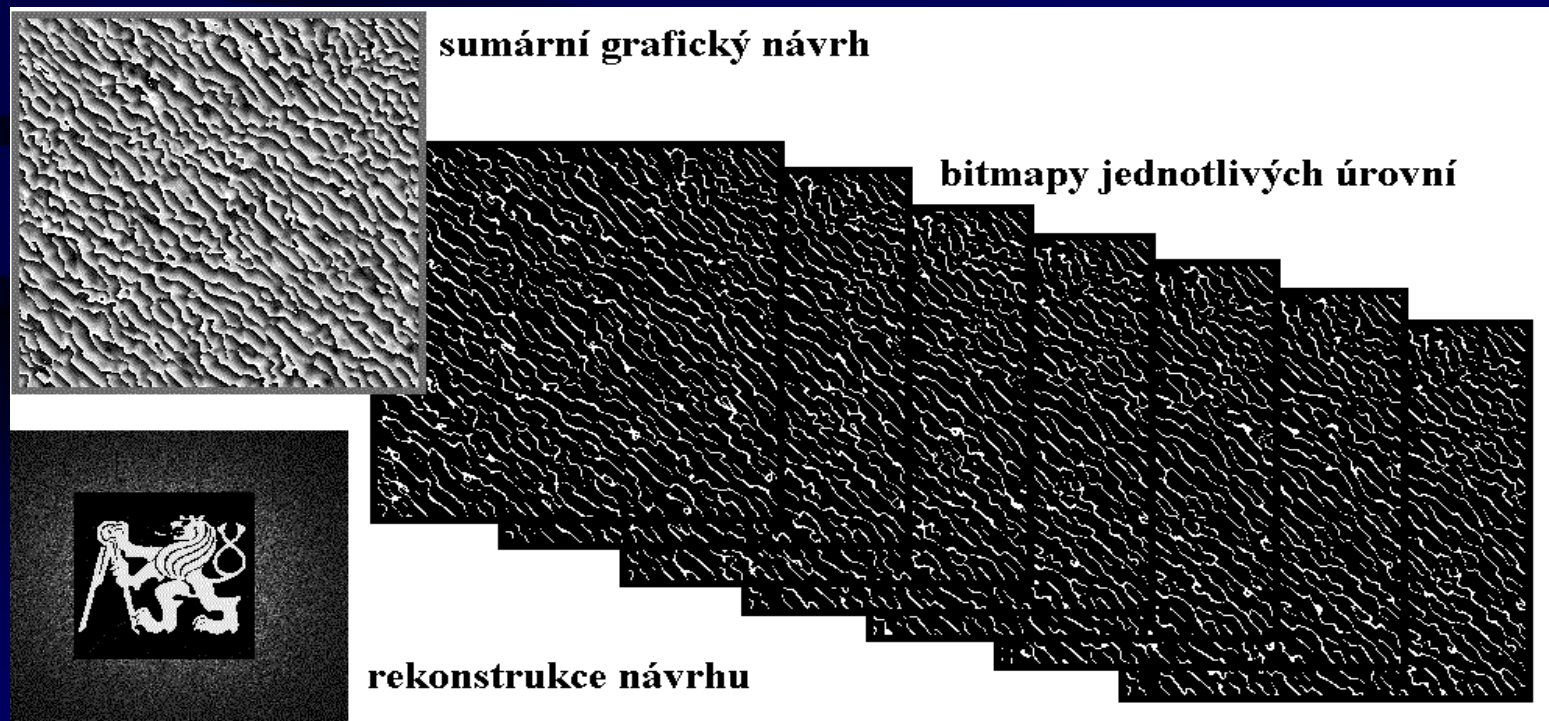
- První krok - vliv proximity efektu na celou exponovanou plochu, tj. kalkulace, jak ovlivní uvedený jev výslednou maximální výšku reliéfu v celé ploše exponovaného čipu. Tento projev proximity efektu je i měřitelný Talystepem. Výsledkem analýzy experimentů v rámci tohoto kroku je úprava křivky reliéfní citlivosti rezistu.

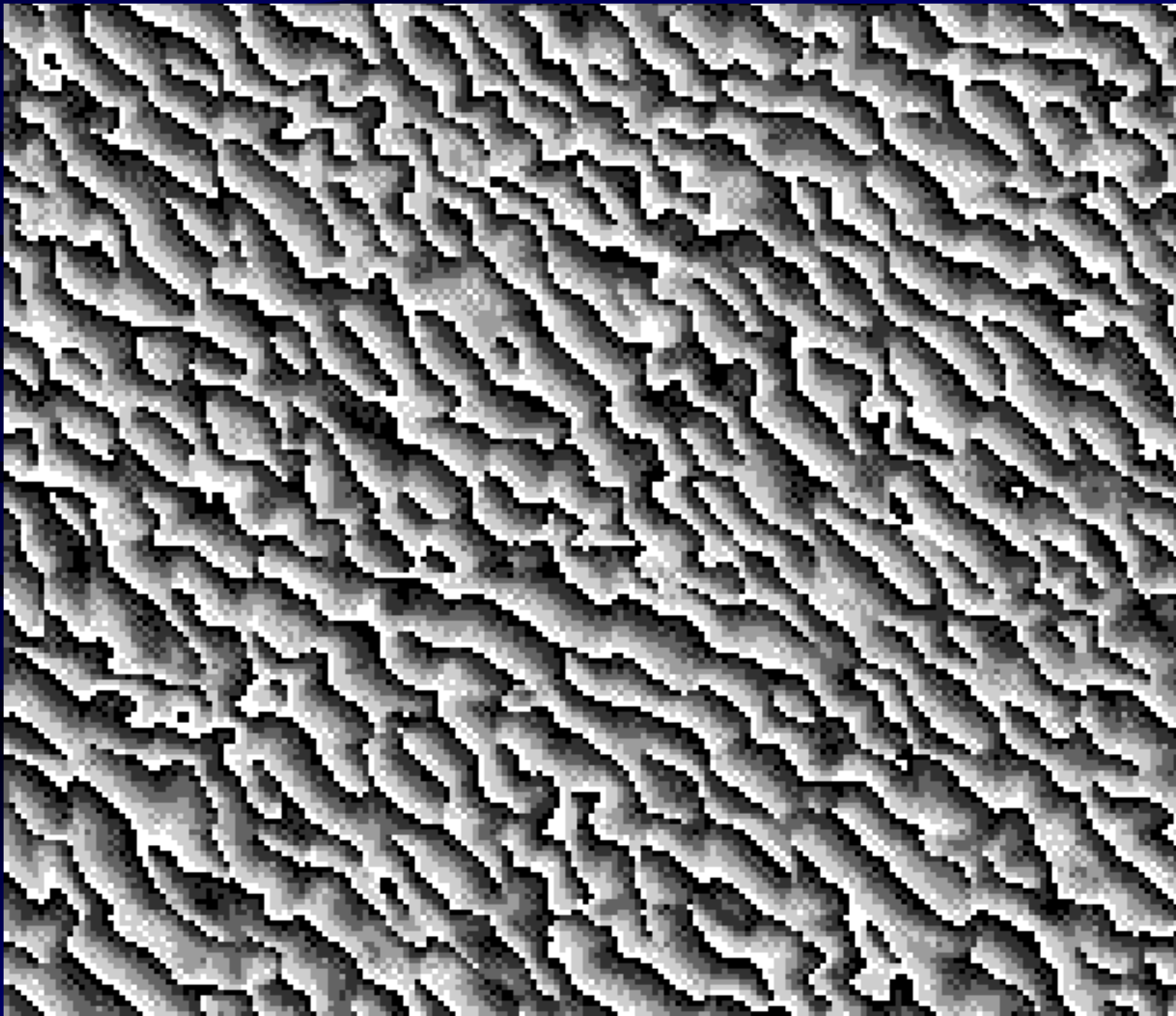


- Druhý krok - vliv proximity efektu na „osamělé“ pixely od nejbližších sousedních pixelů. Tento projev proximity efektu byl studován a řešen v rámci diplomové práce *Eliminace "proximity efektu" pro víceúrovňové struktury realizované pomocí elektronové litografie* Lukášem Daňkem. Výsledkem řešení je programový prostředek, který „osamělé“ pixely ve vstupních bitmapách odhaluje a přiřazuje jim kvantitativně stupeň ovlivnění od sousedů. Řešení je založeno na obrazové analýze vstupních barevných bitmap.

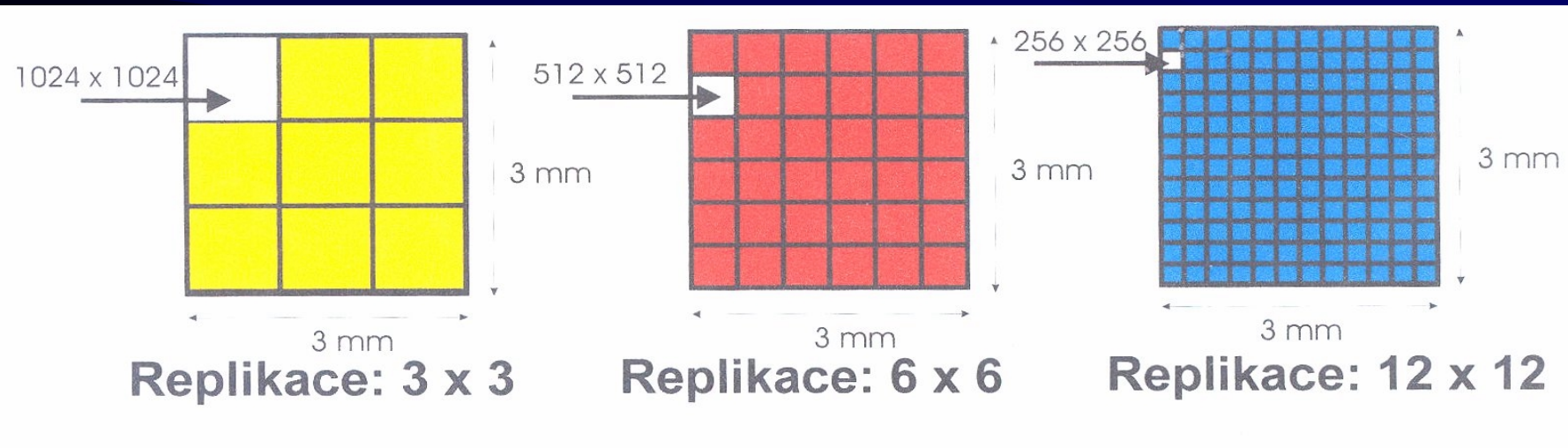
Návrhový systém pro realizaci víceúrovňových difraktivních struktur typu CGH

- Pro realizaci víceúrovňových CGH jsme spolu s partnery z FJFI ČVUT vytvořili návrhový systém, který zohledňuje možnosti datového a řídicího systému elektronového litografu, využívá možnosti návrhového systému geometrického designu difraktivních struktur (IFTA) a který v sobě zahrnuje i dosavadní výsledky výzkumu a vývoje technologie.
- Grafický návrh CGH

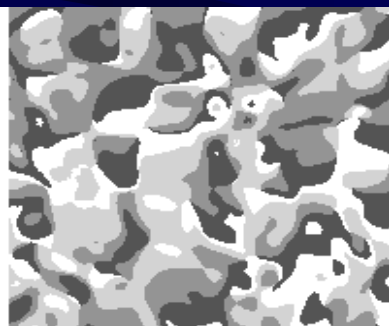
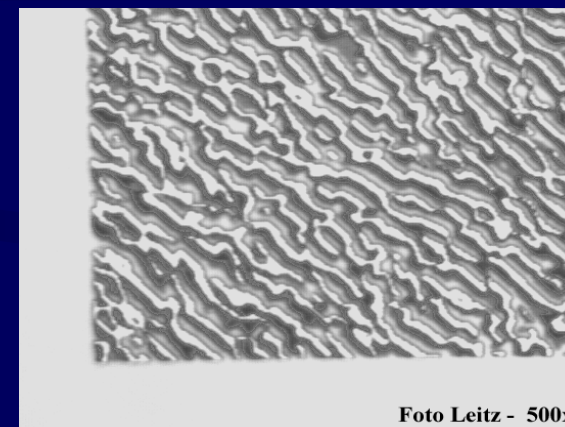
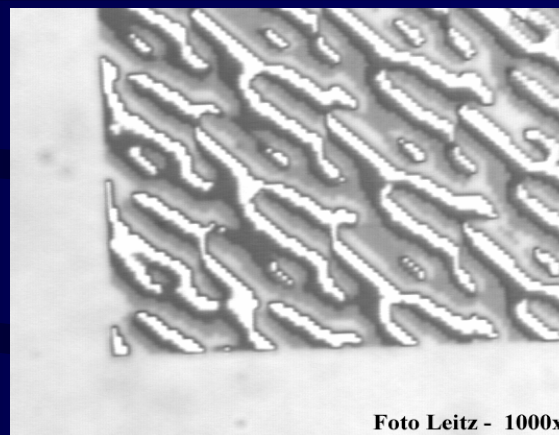
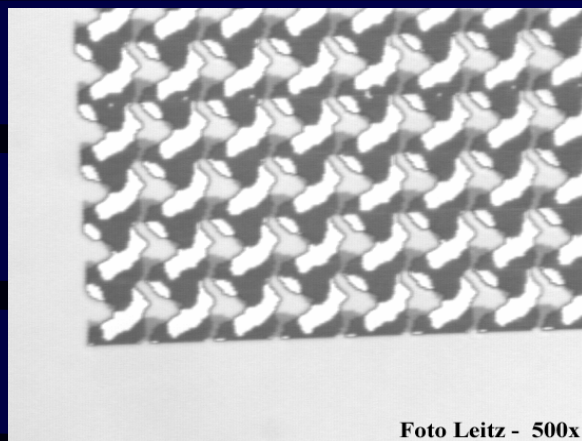




- Zadání výšek jednotlivých úrovní (v současnosti jsou zatím výšky jednotlivých úrovní ekvidistantní). Zadané výšky reliéfu jsou součástí popisu \checkmark - b bitmap jednotlivých úrovní, bitmapy jsou ve formátu **** .bmp** .
- Zadání velikosti pixelu pro expozici - standardně $1 \times 1 \mu\text{m}$.
- Kontrola vstupní sumární bitmapy programem pro ošetření pixelového proximity efektu a případná generace korekčních bitmap.
- Výpočet celoplošné dávky pro korekci celoplošného proximity efektu.
- Stanovení dávek (expozičních časů) pro jednotlivé úrovně.
- Vytvoření expozičního souboru s ohledem na velikost vstupních bitmap a požadovanou velikost čipu dané struktury CGH



Ukázky záznamu čtyř-úrovňových struktur CGH v rezistu PMMA

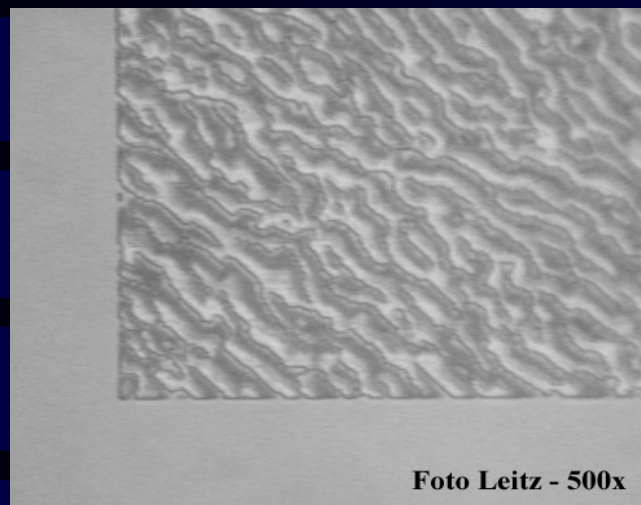


a)
návrh



b)
struktura v rezistu

Ukázka osmi-úrovňových reflexních struktur CGH



Nejlepší dosažené výsledky.

Poměr signálů v 1. difrakčním řádu : 18.5

Velikost signálu v nultém řádu : 4% primárního svazku

Vypočtená difrakční účinnost v +1. řádu: 76%

Shrnutí dosažených výsledků , co se povedlo co se nepovedlo

- Vypracování návrhového systému pro víceúrovňové struktury CGH.
- Ověření možností tvorby reliéfu přímo v rezistu PMMA.
- Vypracování algoritmu expozice struktur CGH v litografu BS600.
- Ověření možností potlačení vlivu proximity efektu na vícestupňové reliéfní struktury.
- Vypracování technologického postupu výroby vícestupňových (4 a 8) struktur reflexního typu.
- Vyrobení funkčních vzorků pro studium vlastností vícestupňových struktur.
- Vypracovat reprodukovatelný postup pro přípravu transparentních vícestupňových struktur. Problém je v depozici a odstraňování kovové vodivé vrstvy na povrchu rezistu.
- Analyzovat a odstranit příčiny, které způsobují na připravených vzorcích stále ještě přítomnost jistého signálu v záporném prvním difrakčním řádu a malé potlačení signálu v nultém řádu (snižuje to difrakční účinnost).

Publikace související s řešenou problematikou

Matějka, F., Matějková, J.: Optimisation of reliefs of thin polymer films of resists for phase diffractive optical elements, Electronic Devices and Systems Y2K – Proceedings, International Workshop on SOCRATES Intensive Training Programme in Electronic System Design, KHBO Oostende, Brno University of Technology, 2000, ISBN 80-214-1780-3

Matějka, F., Matějková, J.: Možnosti testování metricky přístrojů STM a AFM, Čs.čas.fyz. 51 (2001), str.38-42, ISSN 0009-0700.

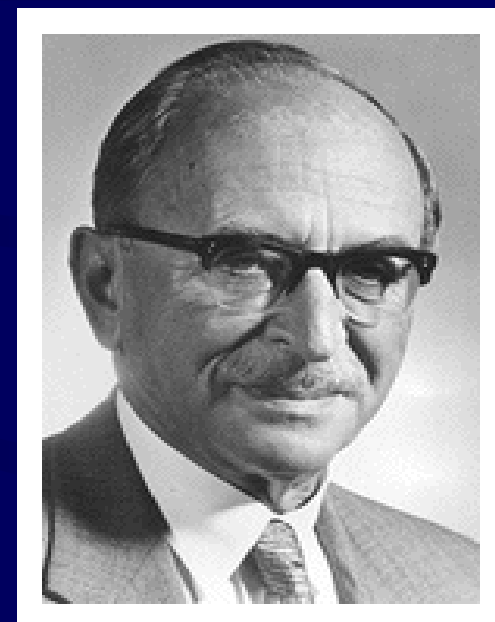
P. Fiala, F. Matějka, I. Richter and M. Škeřeň: Diffractive optics: analysis, design and fabrication of diffractive optical elements, Sborník příspěvků konference New Trends in Physics, 2.díl, (2001), 384-389, listopad 15.-16., 2001, Brno, Česká republika, ISBN 80-214-1992-X

Daněk Lukáš: Eliminace „proximity efektu“ pro víceúrovňové struktury realizované pomocí elektronové litografie, diplomová práce Vysoké učení technické Brno, FEKT Ústav mikroelektroniky, Brno červen 2002.

Poděkování

- Pracovníkům a studentům ÚFI FSI VUT v Brně, Doc.RNDr.T.Šikolovi CSc., RNDr.L.Dittrichové PhD, za umožnění využívání mikroskopu AFM (SPM), obzvláště pak Ing. F.Lopourově za velmi pečlivé nasnímání velké řady vzorků a poskytnutí programu „Profile“.
- Spoluřešitelům projektu na vysokých školách v Praze a v Brně Doc.Ing.P.Fialovi CSc., RNDr.I.Richterovi PhD, Ing.Vl.Kolaříkovi PhD.
- Ing.Zb.Ryzímu PhD za odborné konzultace.
- Všem spolupracovníkům laboratoře elektronové litografie a členům řešitelského týmu.
- M.Matějkovi za fotodokumentaci a počítačovou podporu.
- Všem pracovníkům ÚPT, kteří mají zásluhu na tom, že je naše laboratoř funkční a elektronový litograf BS600 stále ještě provozuschopný.
- Stejný dík patří za pomoc při obtížích s litografem i firmě DI, zvláště pak RNDr. Vl. Kolaříkovi, Csc.
- Speciální poděkování pak patří pánům, bez jejichž práce a objevů by v dnešním semináři nebylo o čem hovořit.

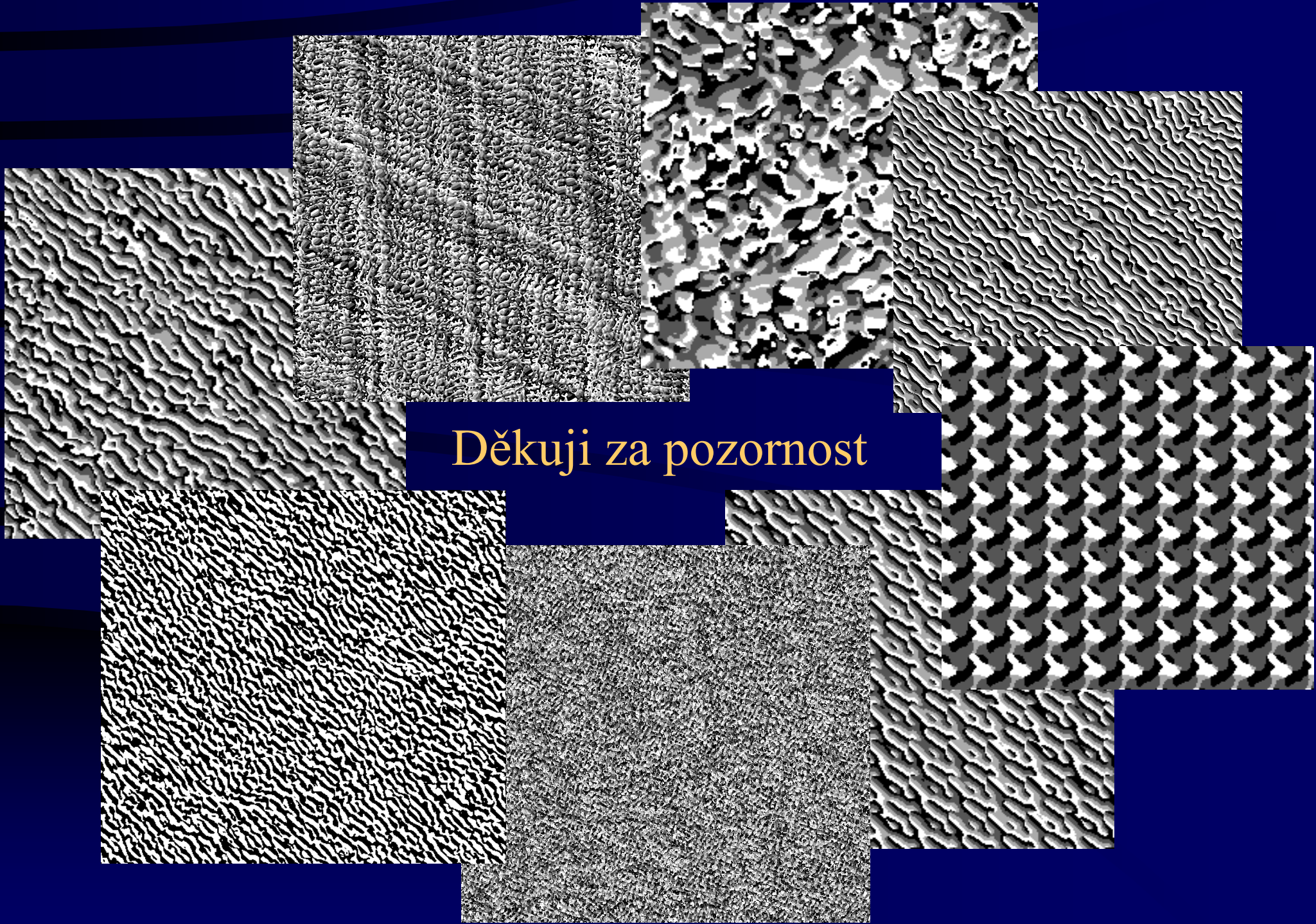
Jean-Baptiste Joseph Fourier - Josef von Fraunhofer - Dennis Gabor



Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) – svým objevem, že periodické funkce lze považovat za součty sinusovek, dal základ harmonické analýze.

Joseph von Fraunhofer (1787-1862) – vyvinul difrakční mřížky a přispěl k porozumění difrakce světla.

Dennis Gabor (1900 -1979) – vytvořil v roce 1947 první hologram a v roce 1971 obdržel Nobelovu cenu.



Děkuji za pozornost