

GAČR 102/05/2325

Elektronová litografie pro přípravu nano struktur

Parametry litografu BS600 dosažené při modernizaci 2005/6

Vladimír Kolařík
Bohumila Lencová
Svatopluk Kokrhel
František Matějka
Miroslav Horáček

Jiřina Matějková
Tomáš Radlička
Michal Urbánek
Lukáš Daněk
Stanislav Král

Brno, 6.2.2007

Přehled

- Úvodem
- **Zvýšení rozlišení litografu**
- **Zvýšení rychlosti expozice**
- **Metodika vyhodnocení struktur**
- Případové studie
- Související aspekty

(1) Úvodem

- Elektronová litografie
 - expozice (rozptyl elektronů)
 - vyvolávání (citlivost rezistu)
 - následné procesy (replikace)
 - Struktura v substrátu: přímé maskování
 - Maska: optická replikace
 - Master: mechanické replikace

Rozptyl elektronů

- Rozptyl energie: dopředný rozptyl + zpětně odražené e⁻

$$f(r) = \frac{1}{(1+\eta)} \frac{1}{\pi\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{(1+\eta)} \frac{1}{\pi\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right)$$

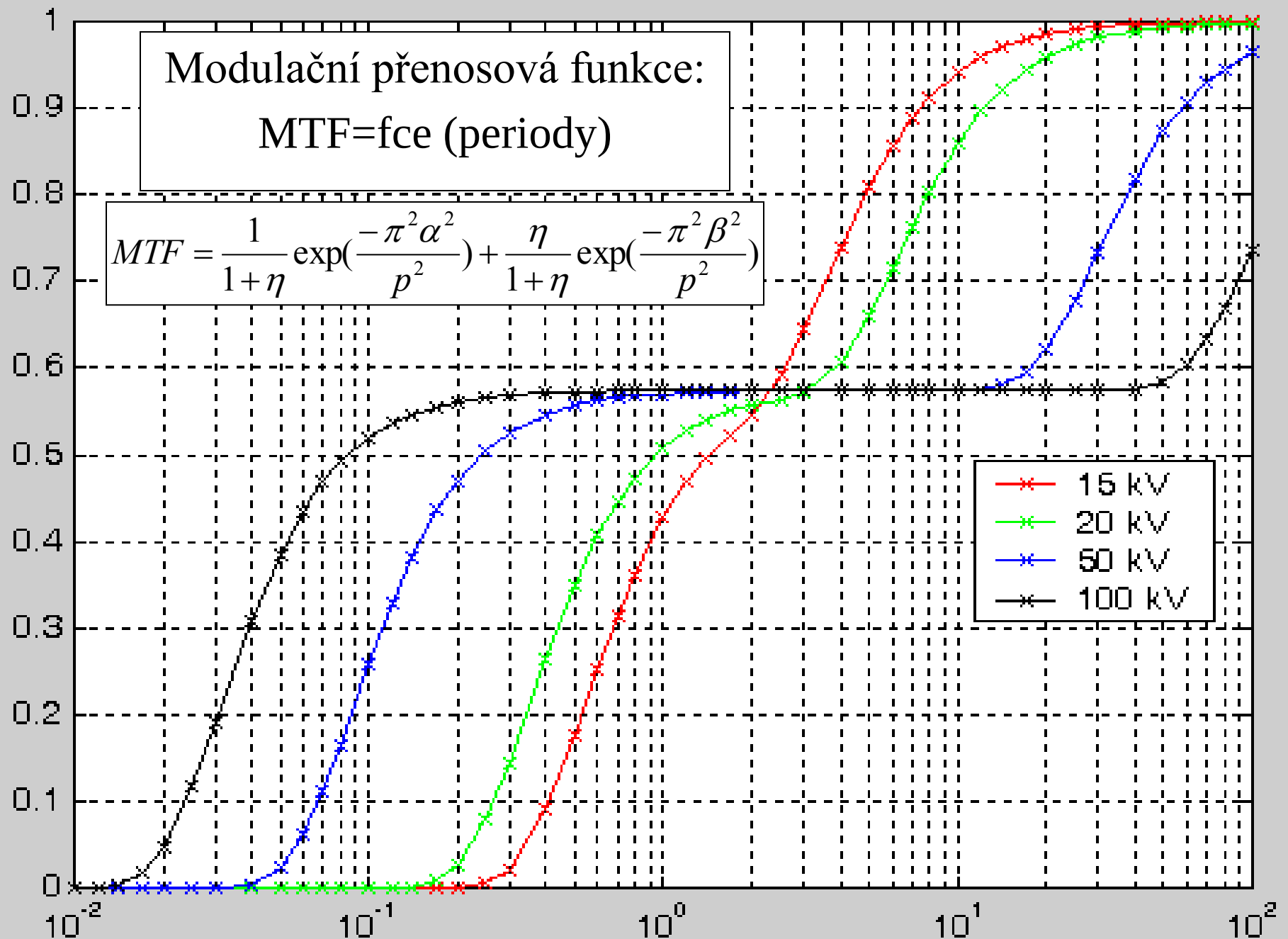
$$\alpha \cong 0.9 \left(R_t / V_b\right)^{1.5} [\mu m, nm, kV]$$

$$\beta \cong 0.012 V_b^{1.7} [\mu m, kV]$$

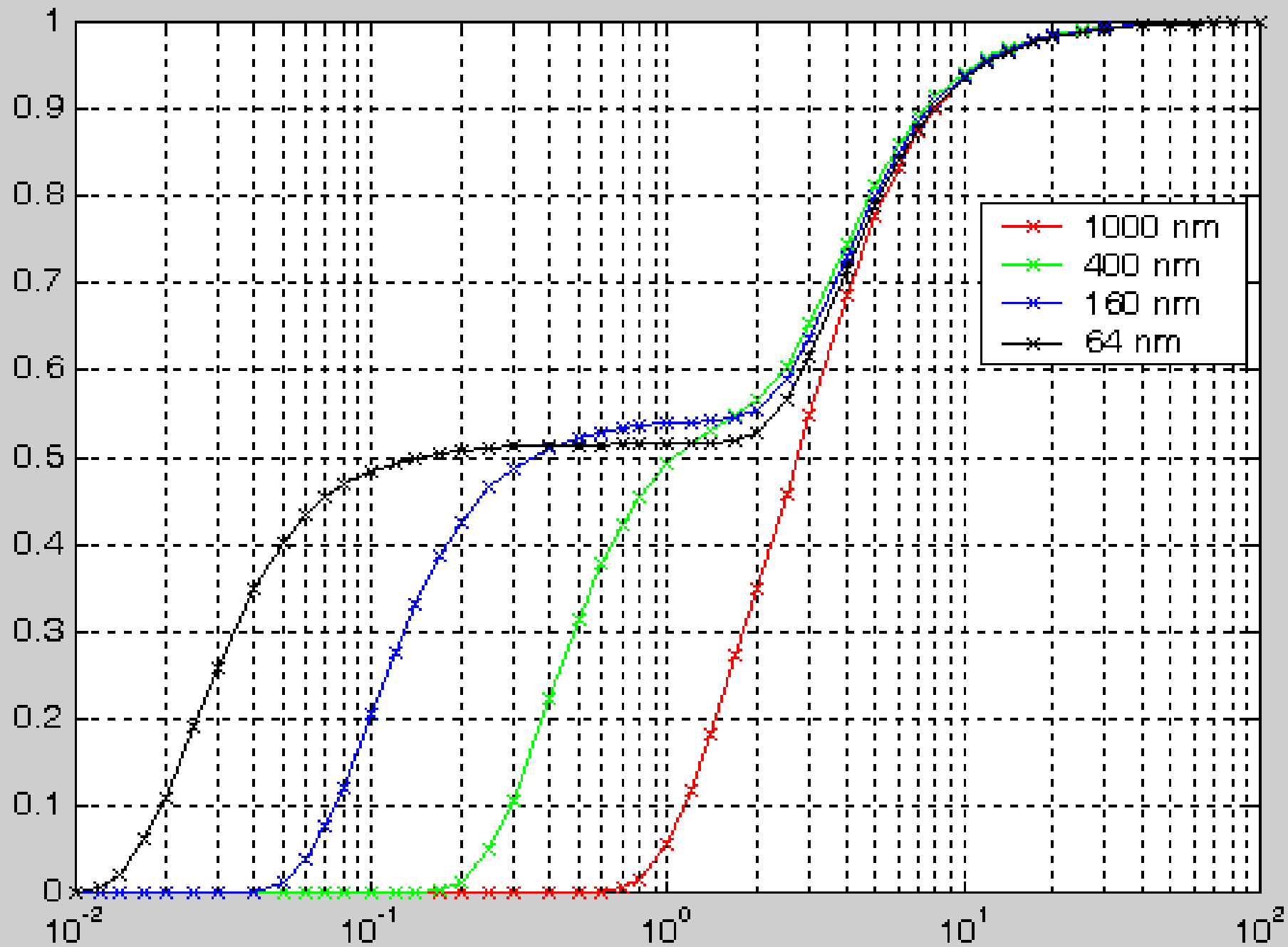
$$\alpha \cong 0.2 \mu m$$

- pro 15 kV a rezist tloušťky 500 nm:
 $\beta \cong 1.2 \mu m$
 $\eta = 0.74$

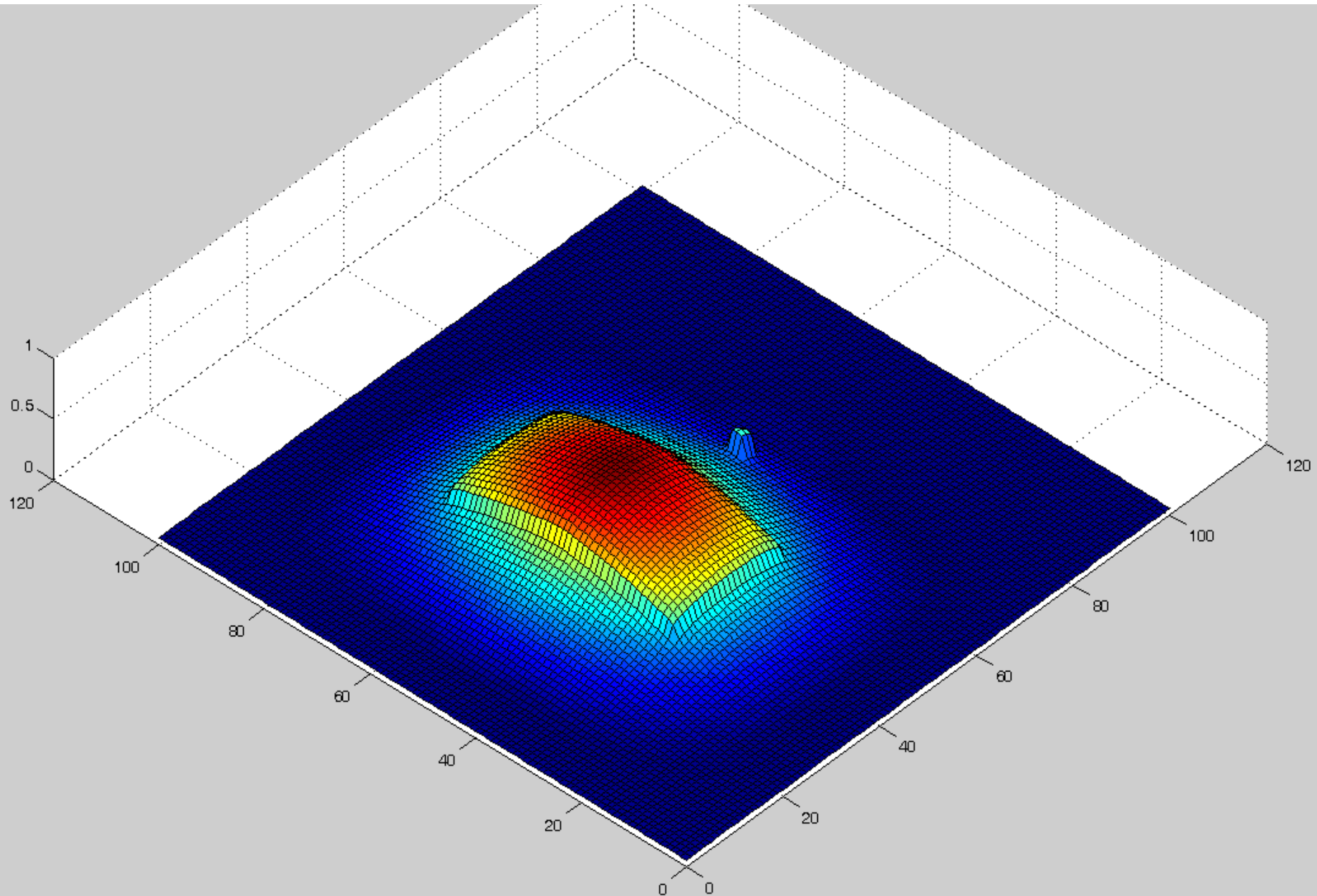
MTF Function for 500 nm Resist



MTF Function for 15kV

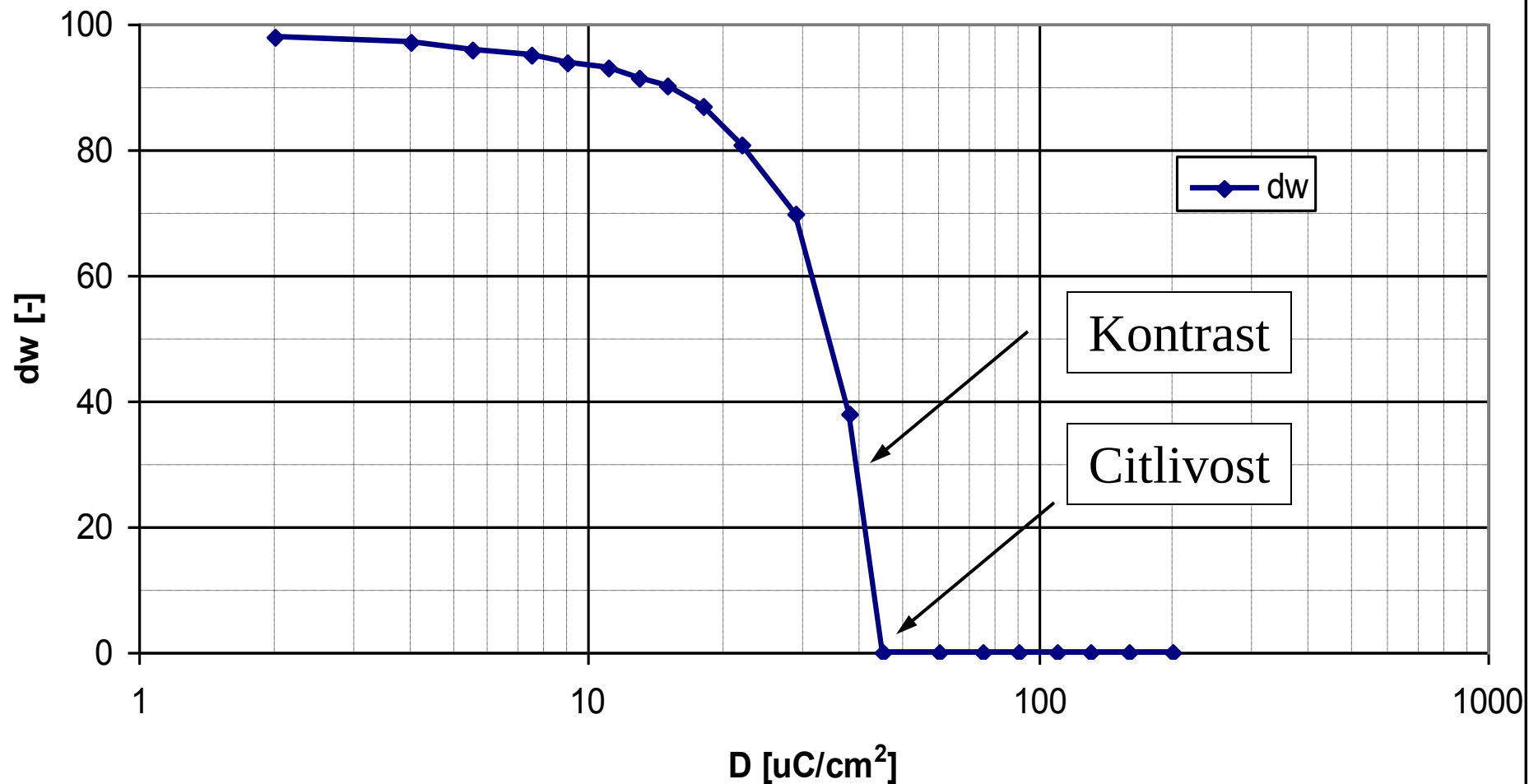


Simulace rozptylu – velké a malé razítko



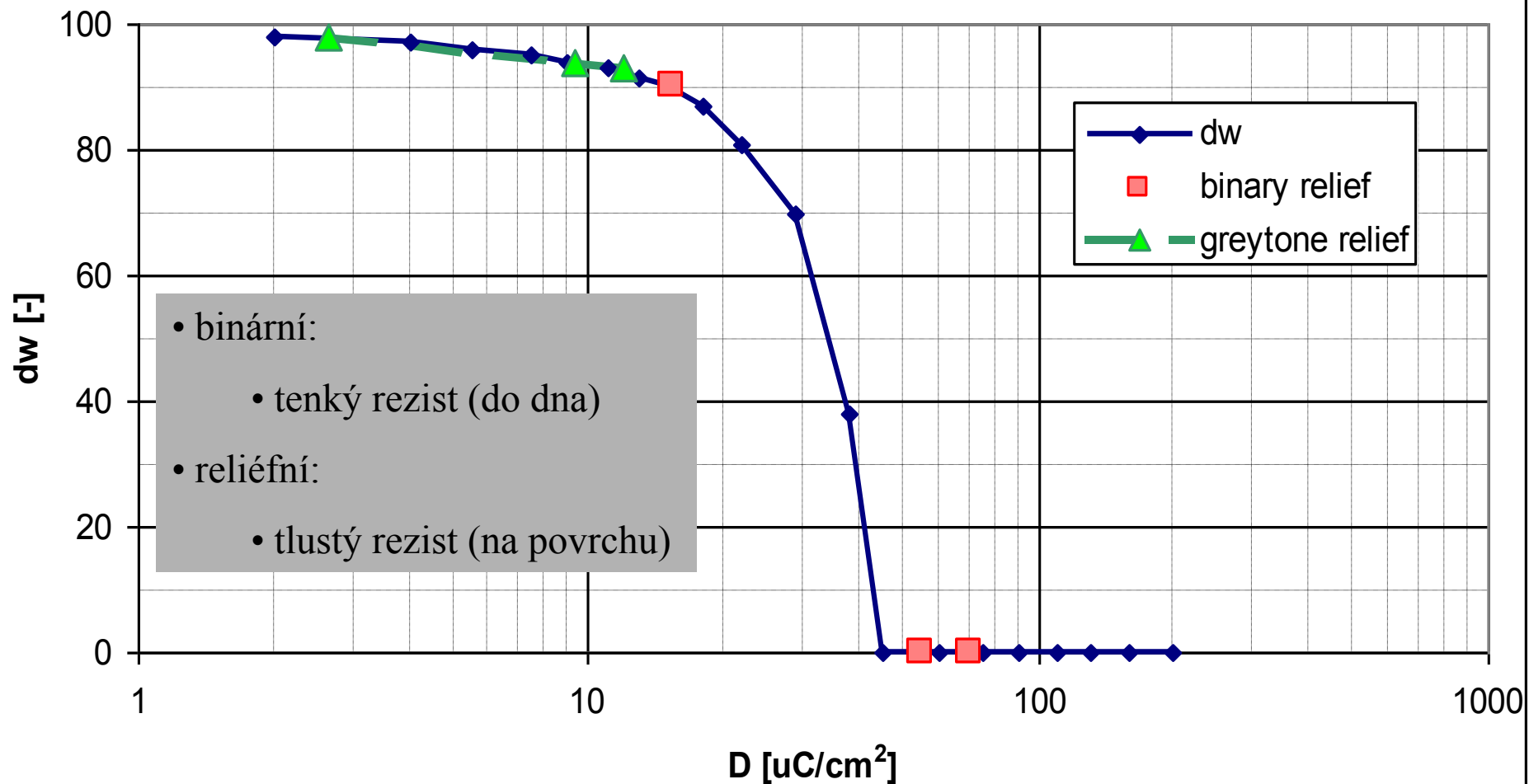
Vyvolávání rezistu

PMMA/ nAAC *Sensitivity* (example)



Typ reliéfu

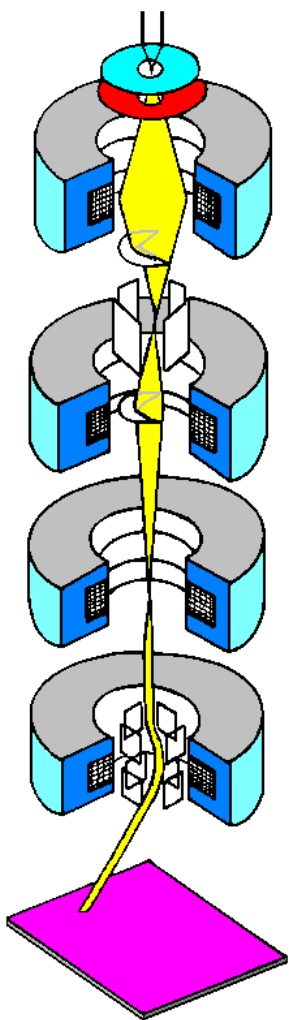
Binary and Greytone Relief



(2) Zvýšení rozlišení

- Zpřesnění velikosti razítka
 - zvýšení rozlišení D/A převodníku tvarovacího systému
 - **změna nastavení zmenšovací čočky**
- Zpřesnění pozice razítka
 - zvýšení rozlišení D/A převodníku vychylovacího systému
 - diagonální krok 70 nm
 - SW korekce pozice: dvojexpozice + nastavení časů
 - snížení šumu

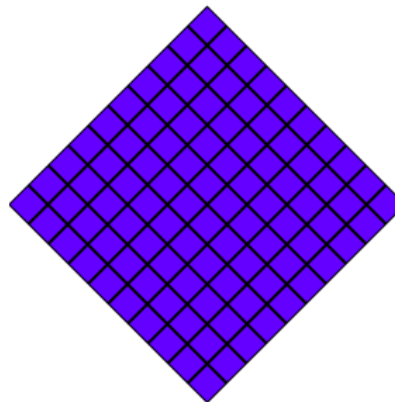
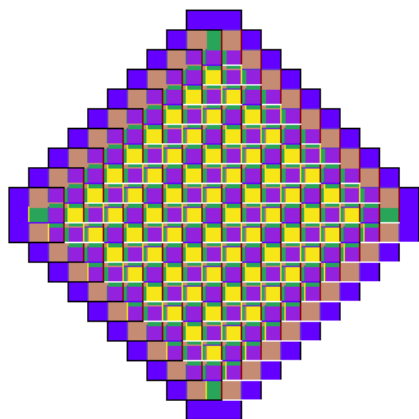
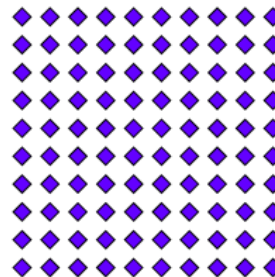
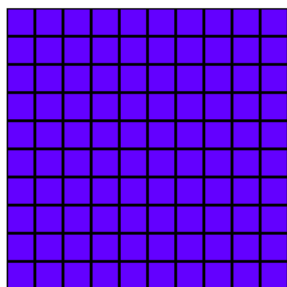
Zmenšení razítka (TZ): analýza



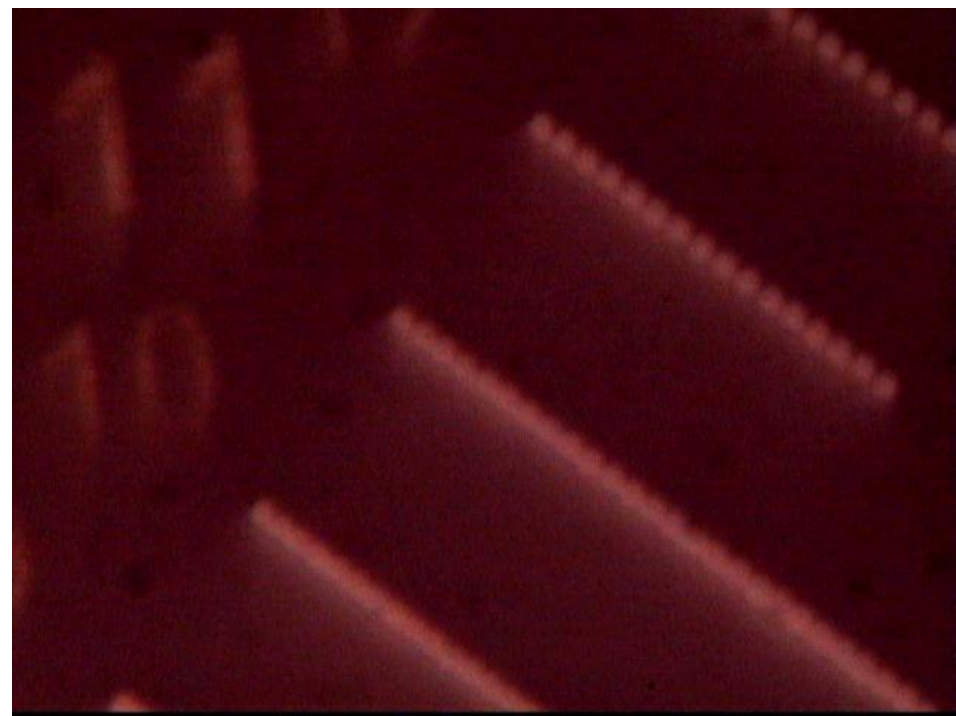
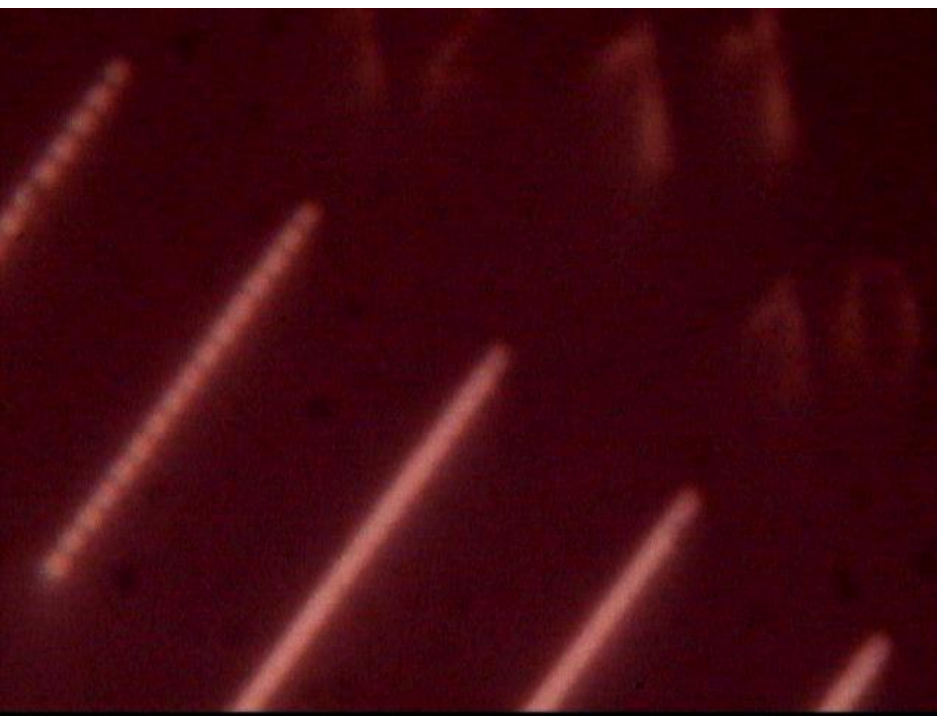
- Výpočet optické soustavy ELG (Prof. Lencová)
- Analýza Coulombovských interakcí (Tomáš Radlička)
- Závěr:
 - možnost zmenšení rozměru svazku na 50%
 - otočení tvaru razítka o -45° vzhledem k vychylování

TZ - „*Simulace simulace*“

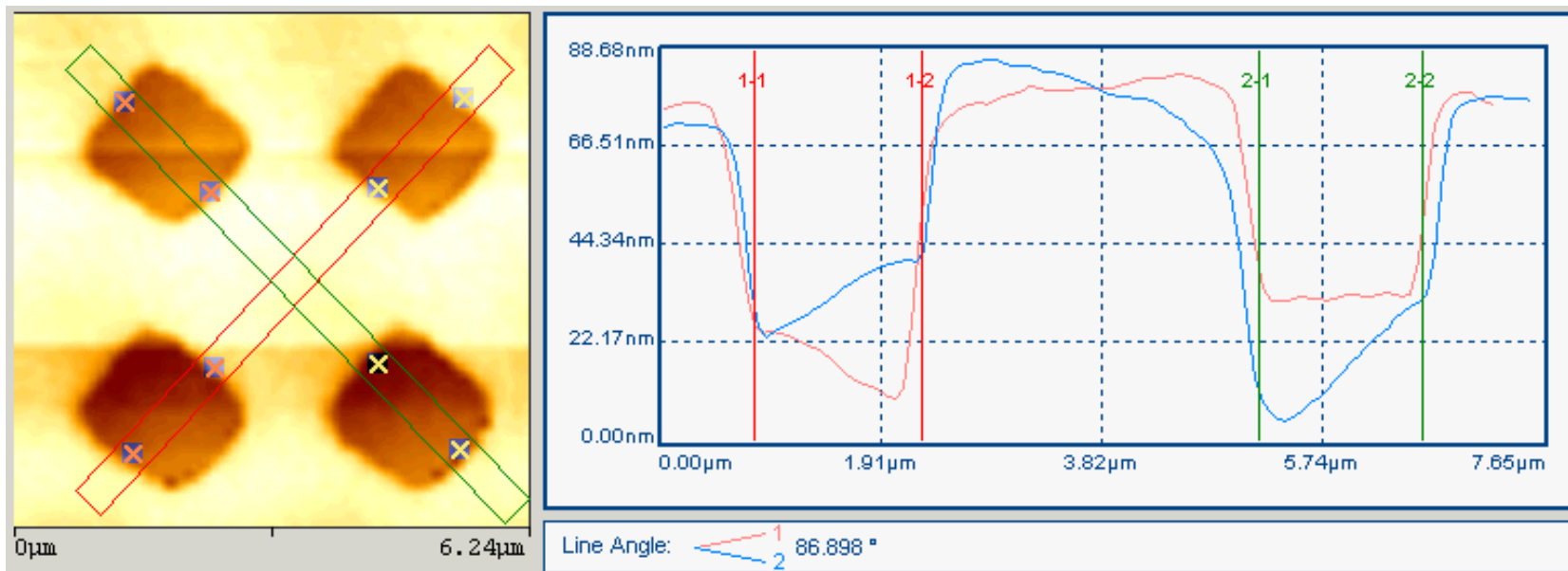
původní návrh $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$ výsledek v režimu TZ



TZ – rozměr razítka (optika)



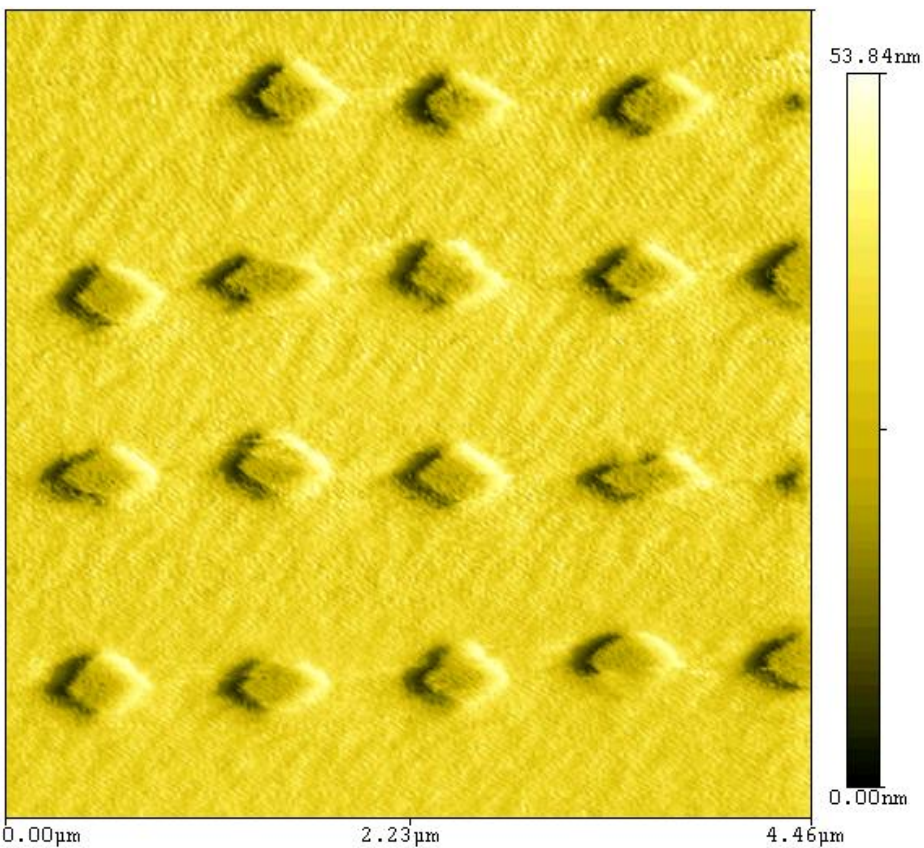
TZ – rozměr razítka (AFM)



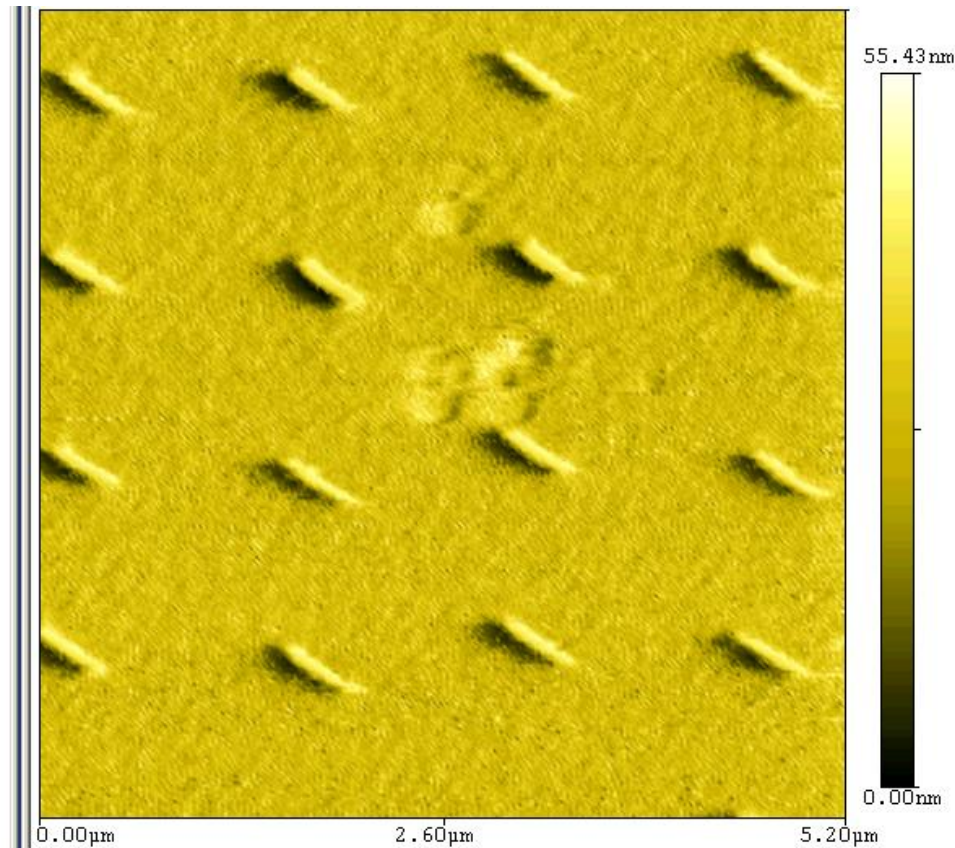
		Pair 1		Pair 2	
		D (μm)	Z (nm)	D (μm)	Z (nm)
Line1	1	0.782	27.728	5.175	40.455
	2	2.241	51.004	6.598	46.735
	distance	1.458	23.275	1.423	6.280
	pt.angle	0.91 °		0.25 °	
Line2	1	0.782	33.138	5.175	11.645
	2	2.241	42.332	6.598	32.073
	distance	1.458	9.194	1.423	20.428
	pt.angle	0.36 °		0.82 °	

TZ: tvar razítka

razítko 500 x 500 nm

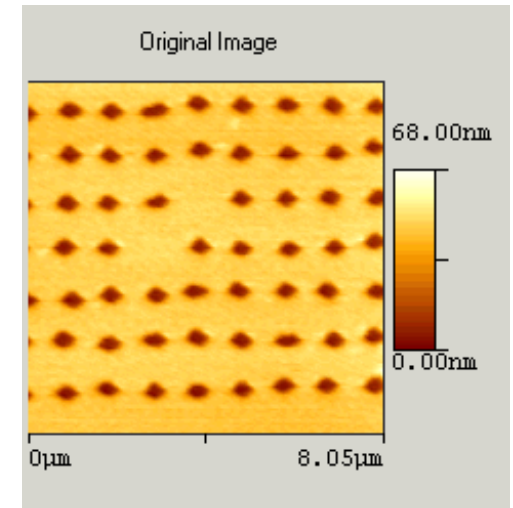
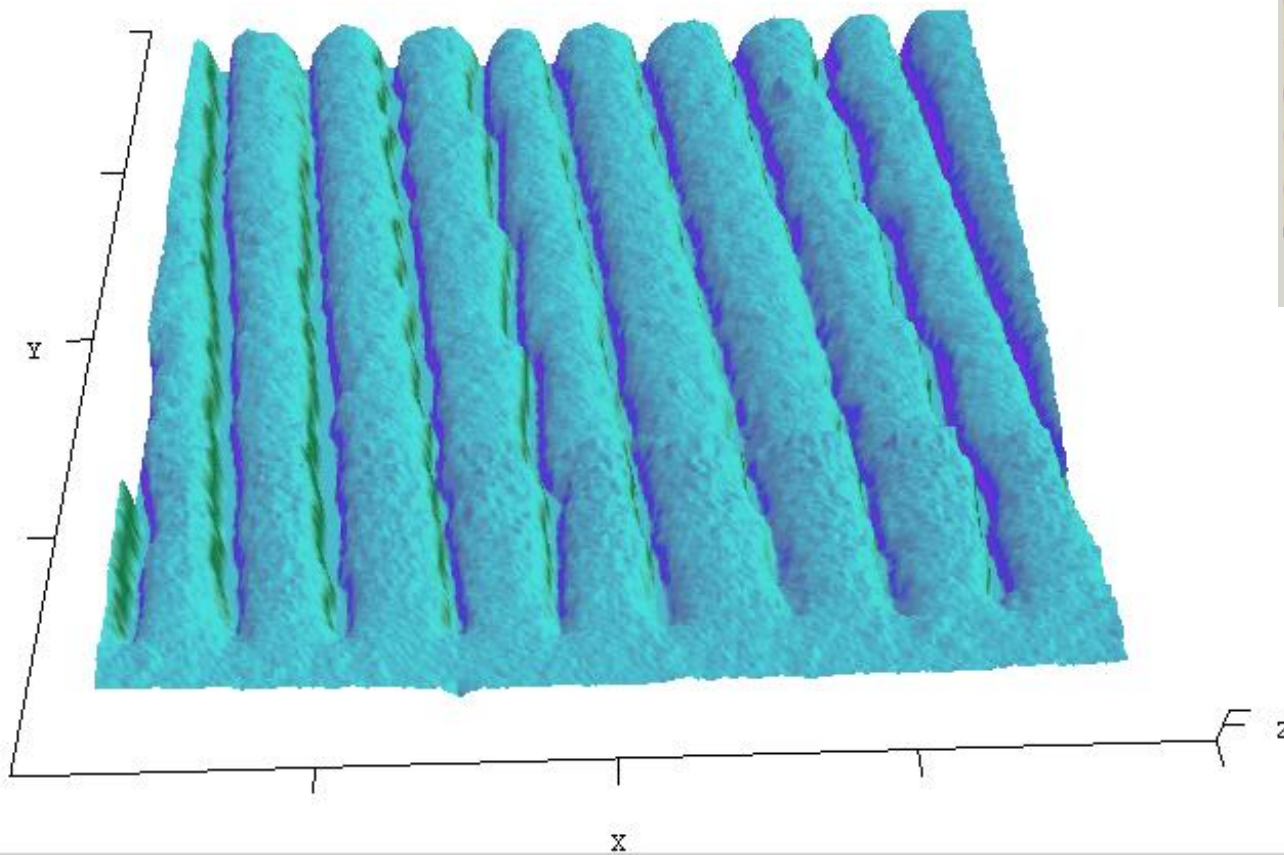


razítko 750 x 250 nm



Vychylování svazku

- Krok vychylování:
25 – 50 – 100 – 200 nm



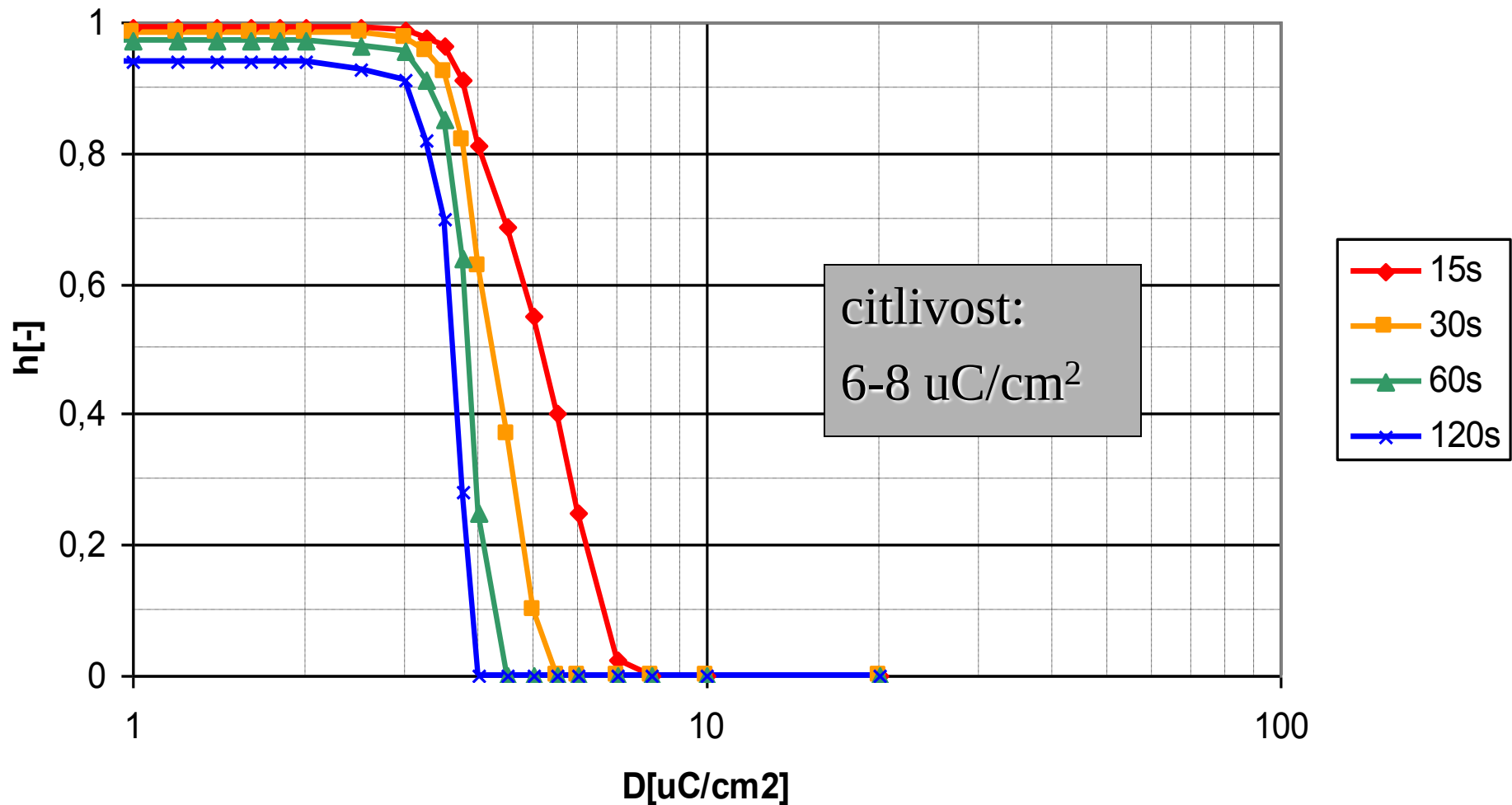
Analýza šumu
vychylování:
 σ_x 50 nm
 σ_y 80 nm

(3) Zvýšení expoziční rychlosti

- **Zkrácení expoziční režijní doby**
 - komunikační modul DSP mezi řídicím PC a elektronikou litografu
- **Zvýšení citlivosti rezistu**
 - chemicky aktivovaný rezist (FEP-171)
- **Zvýšení proudové hustoty svazku**
 - v režimu zmenšeného razítka zvýšení 4x
- **Zkrácení/upřesnění doby ustálení vychylovacího systému**
 - nový D/A převodník a tabulka časů
- **Zvýšení proudu katody**
 - možné, ale problematické

FEP - citlivost

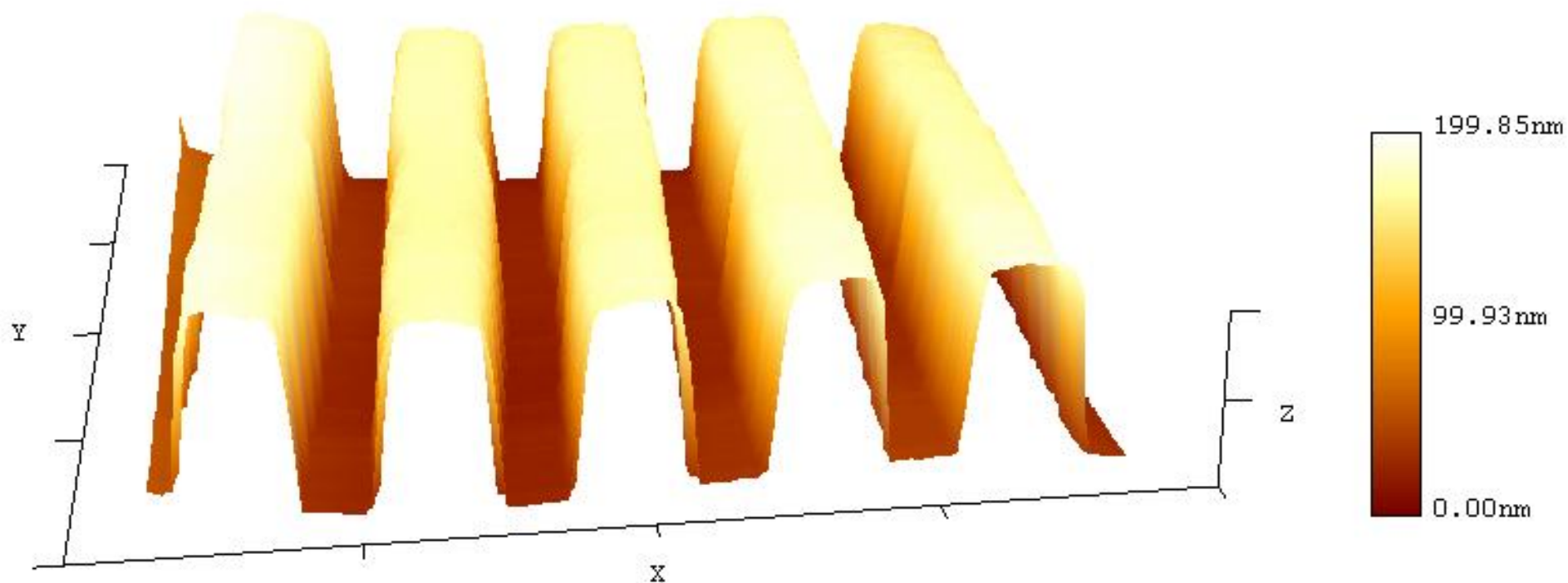
Development characteristics of FEP 200nm



FEP - technologie

- + promotor adheze hexa-metyl-disilazan (HMDS)
- + post-exposition baking (PEB)
- tloušťka rezistu 200-300 nm
 - ředění: 70-120 nm

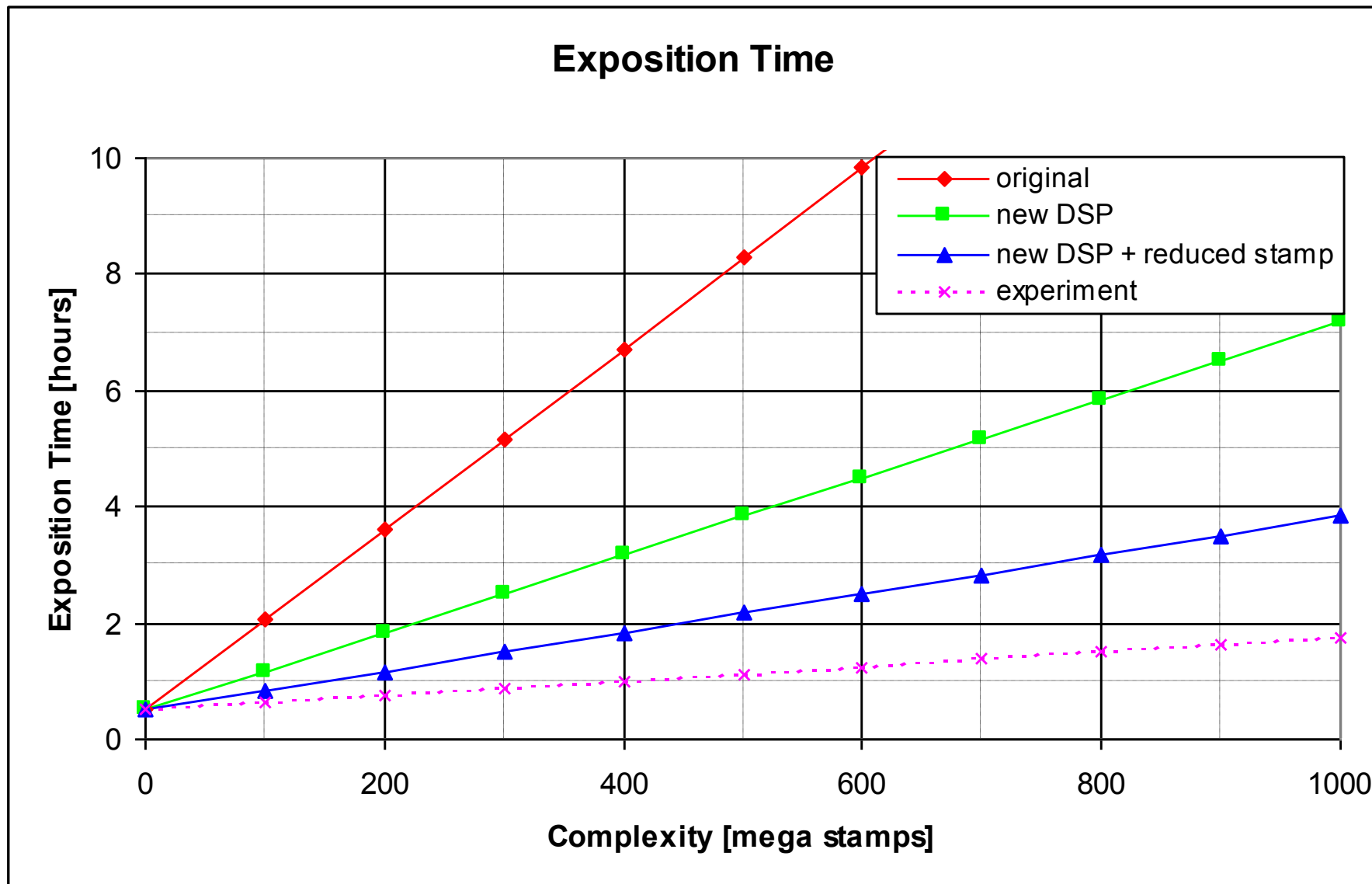
FEP – binární struktura



Scan Distance (5.99 μ m)

Z Distance (199.85nm)

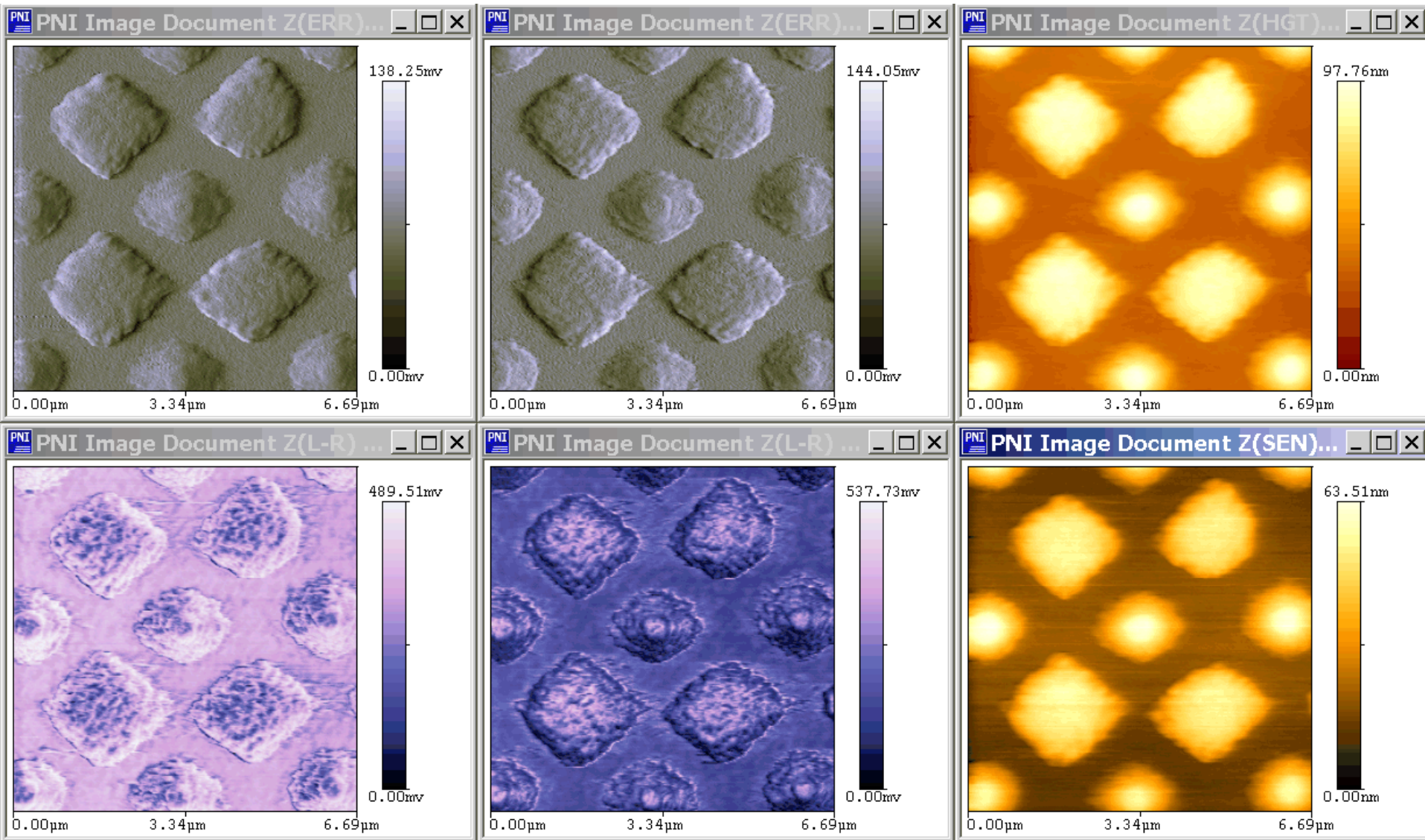
Doba reálné expozice



(4) Metodika vyhodnocení struktur

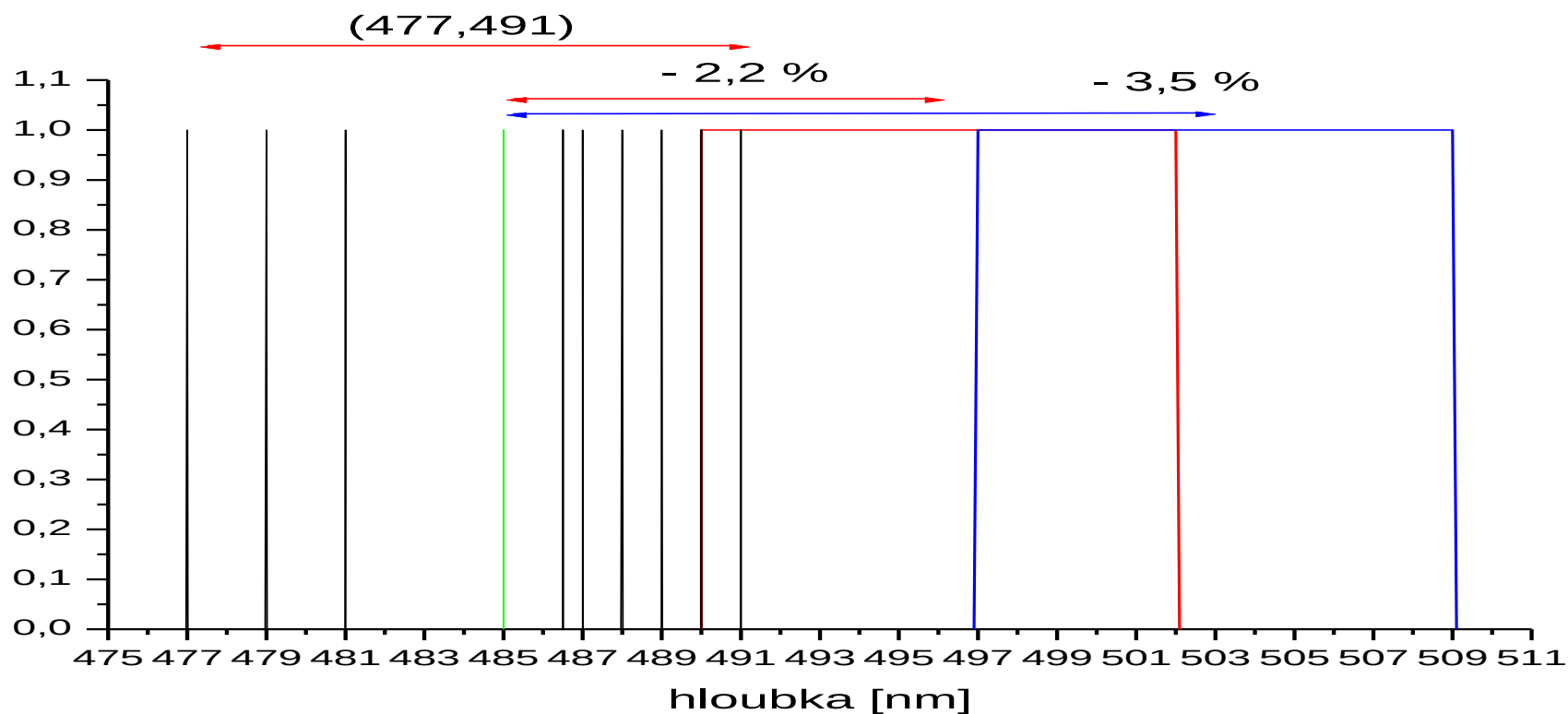
- optická mikroskopie
- elektronová mikroskopie (SEM)
- **mikroskopie skenovací sondou (AFM)**

AFM – 4 snímané signály



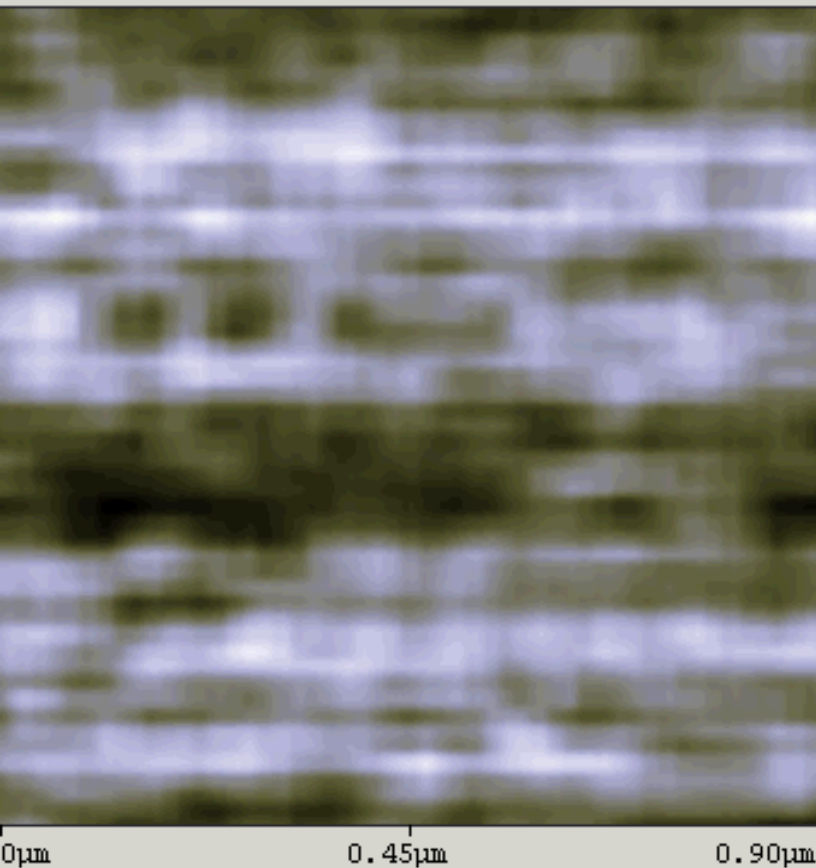
AFM - kalibrace

X: $\sim +1\%$ --- Y: $\sim +10\%$ --- Z: -2.8%



AFM – rozlišení v ose z

Roughness Measurement



	Whole Area
Total Area St.	0.8138 μm^2
Roughness Avg. Sa:	0.3528 nm
Root mean square Sq:	0.4276 nm
Ten Points Height Sz:	2.3498 nm
Range Sr:	2.4144 nm

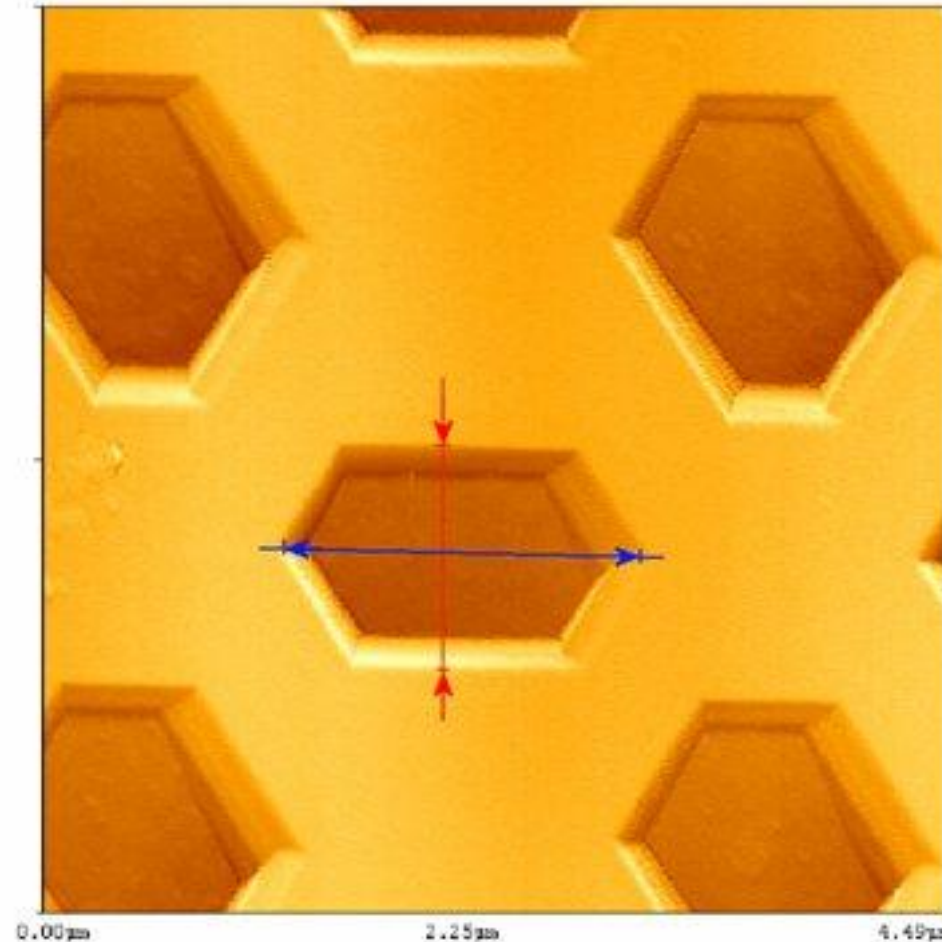
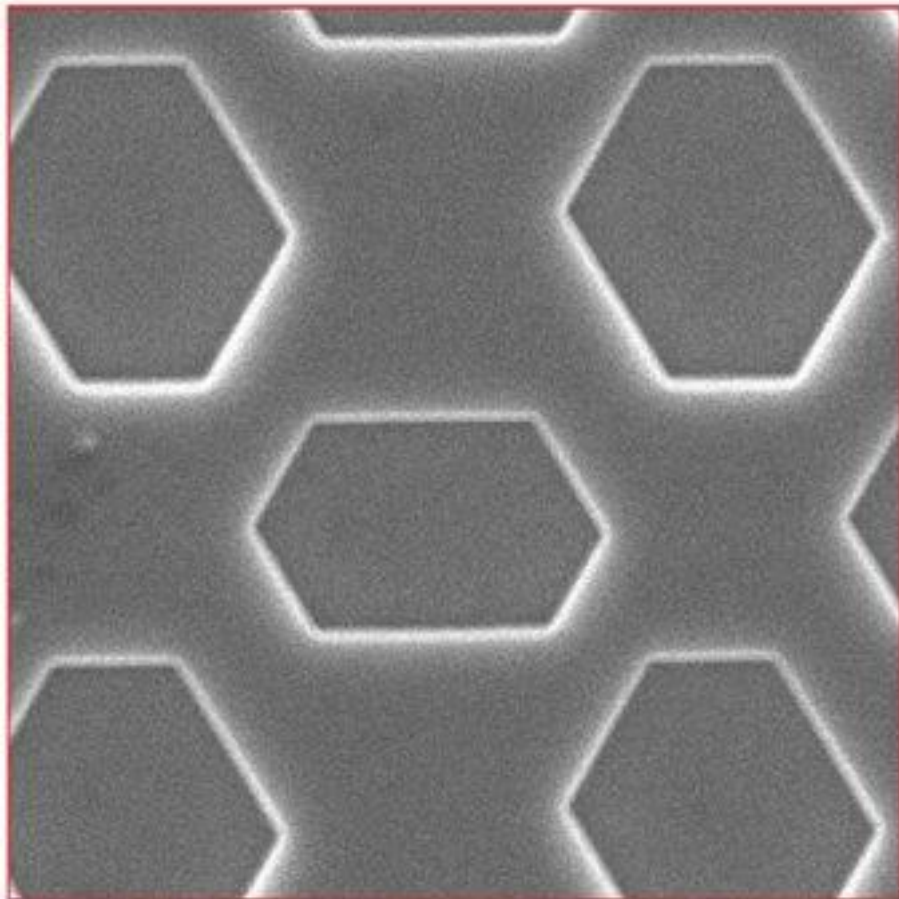
SEM vs. AFM (anizotropní lept Si)

+ rozměry X-Y

+ informace o hloubce Z

- informace o hloubce Z

- artefakty (hrany)



(5) Případové studie

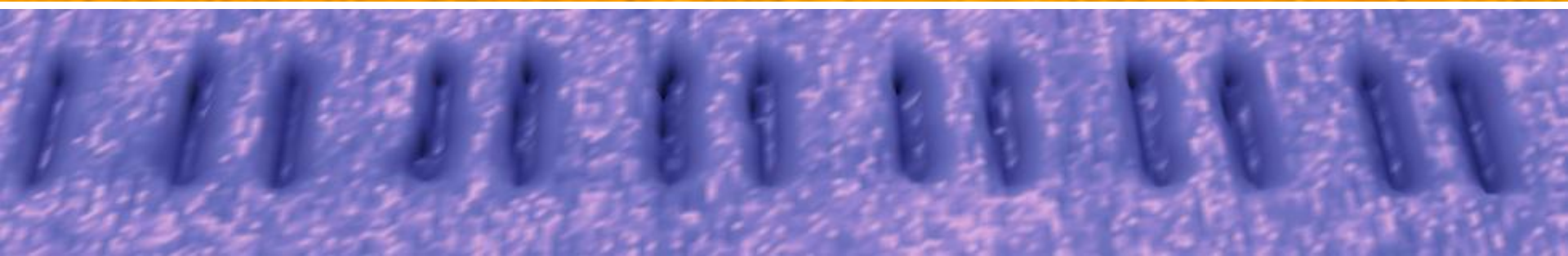
- Binární reliéf
- Stupňovitý reliéf
- Kombinované mřížky

Test dvojčar (FEP, TZ)

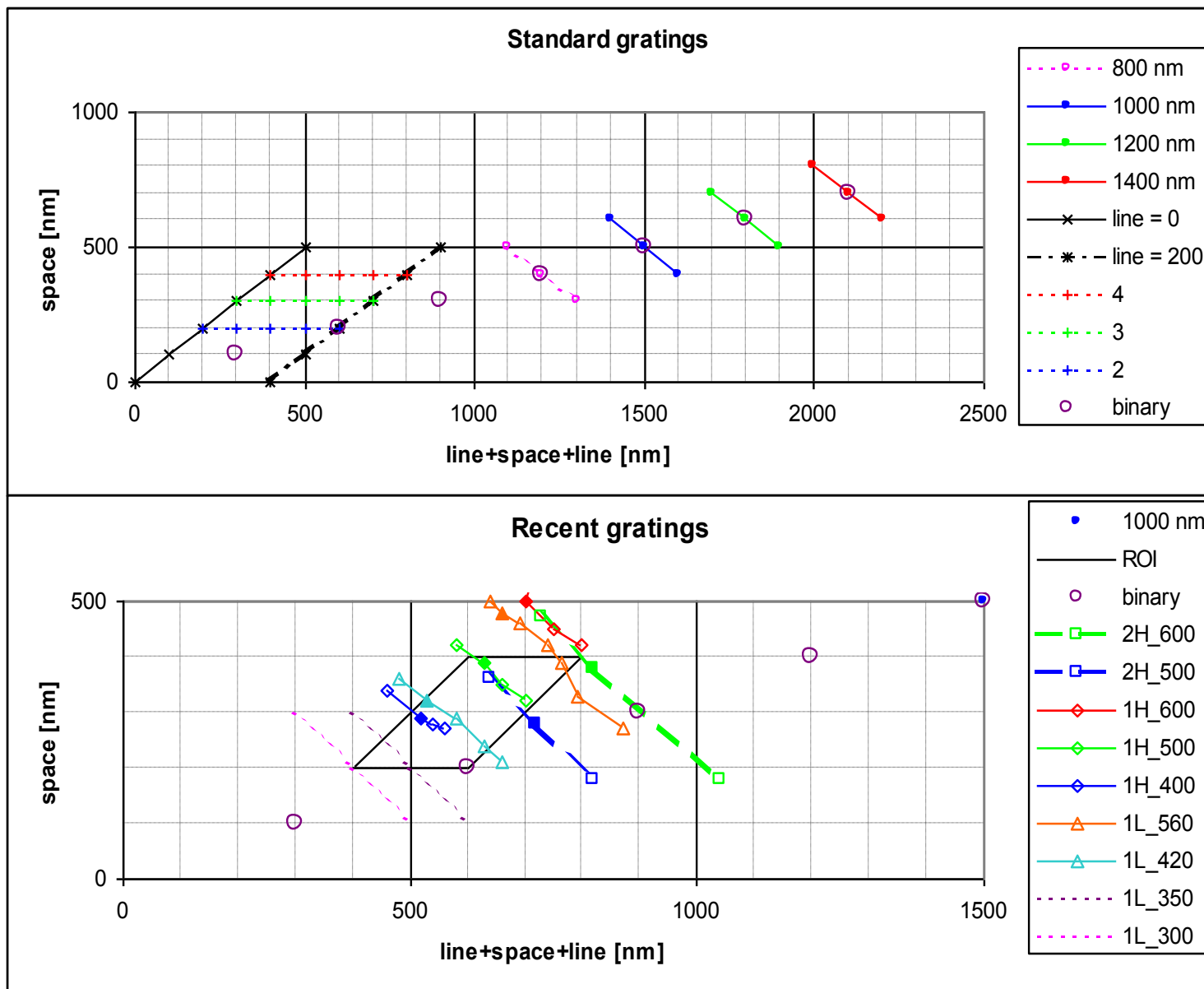
Čáry délky 1 μm

Rozteč 500 a 800 nm

Hloubka 80 nm

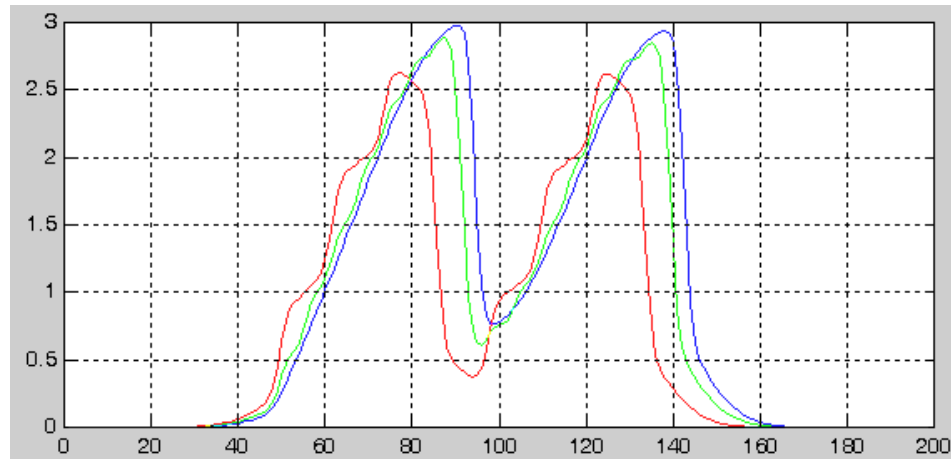
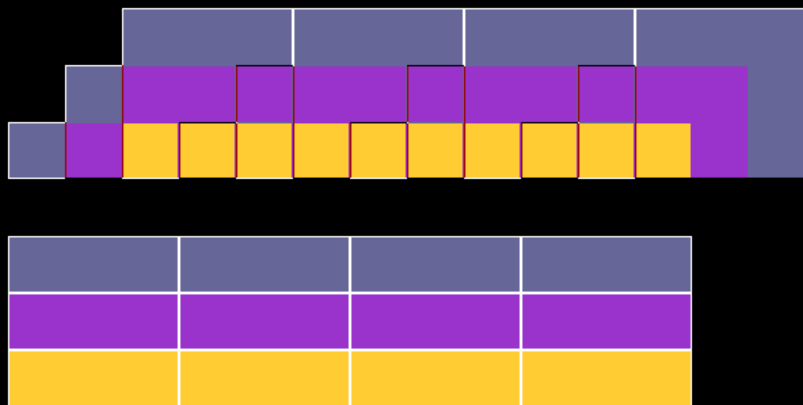
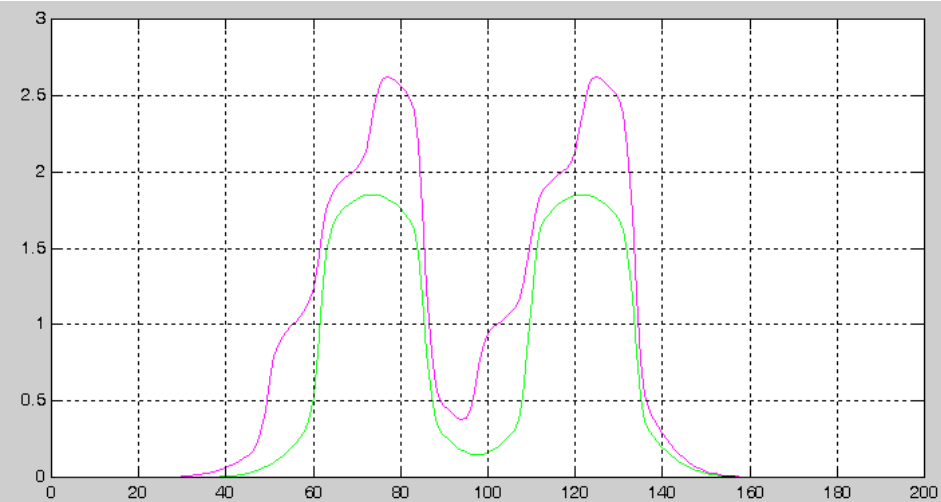
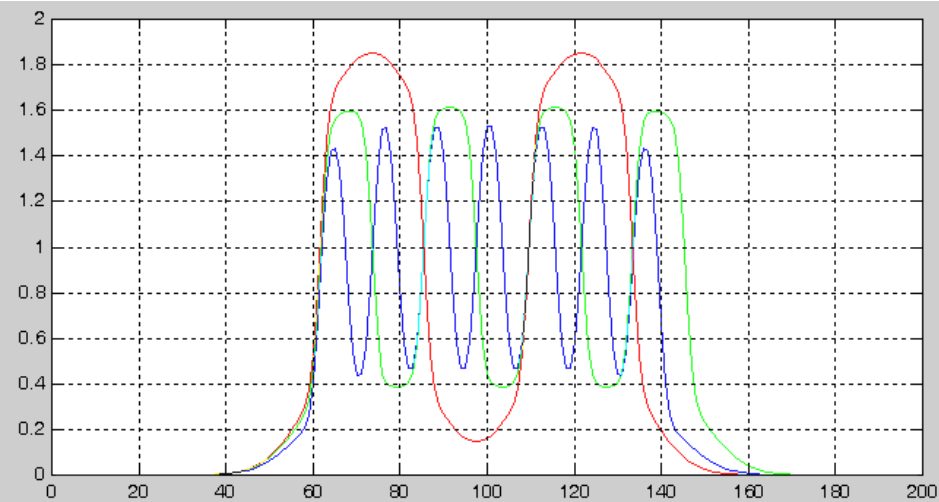


Měření čar (FEP, TZ)

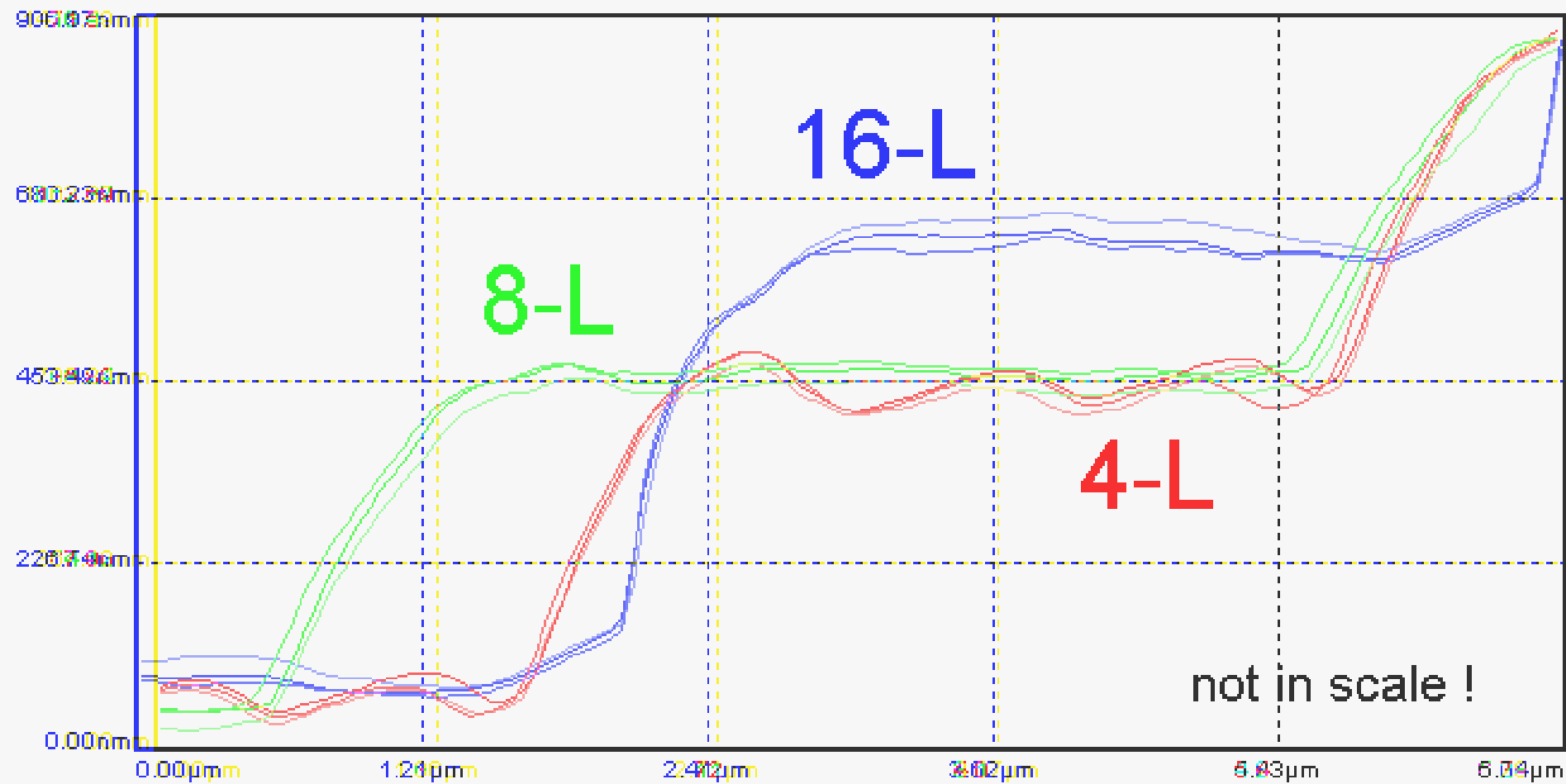


Reliéfni mřížky

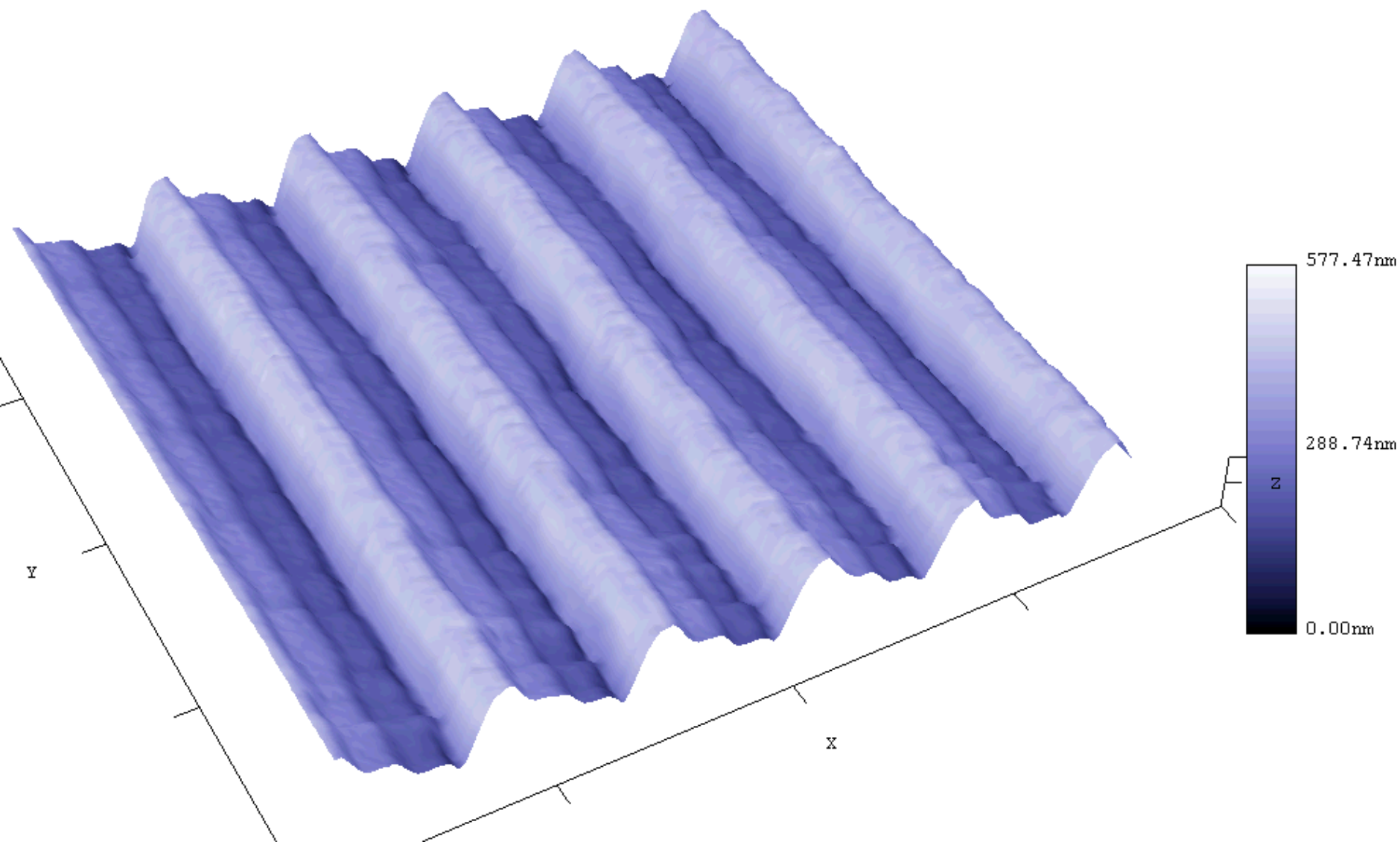
simulace tvaru reliéfu



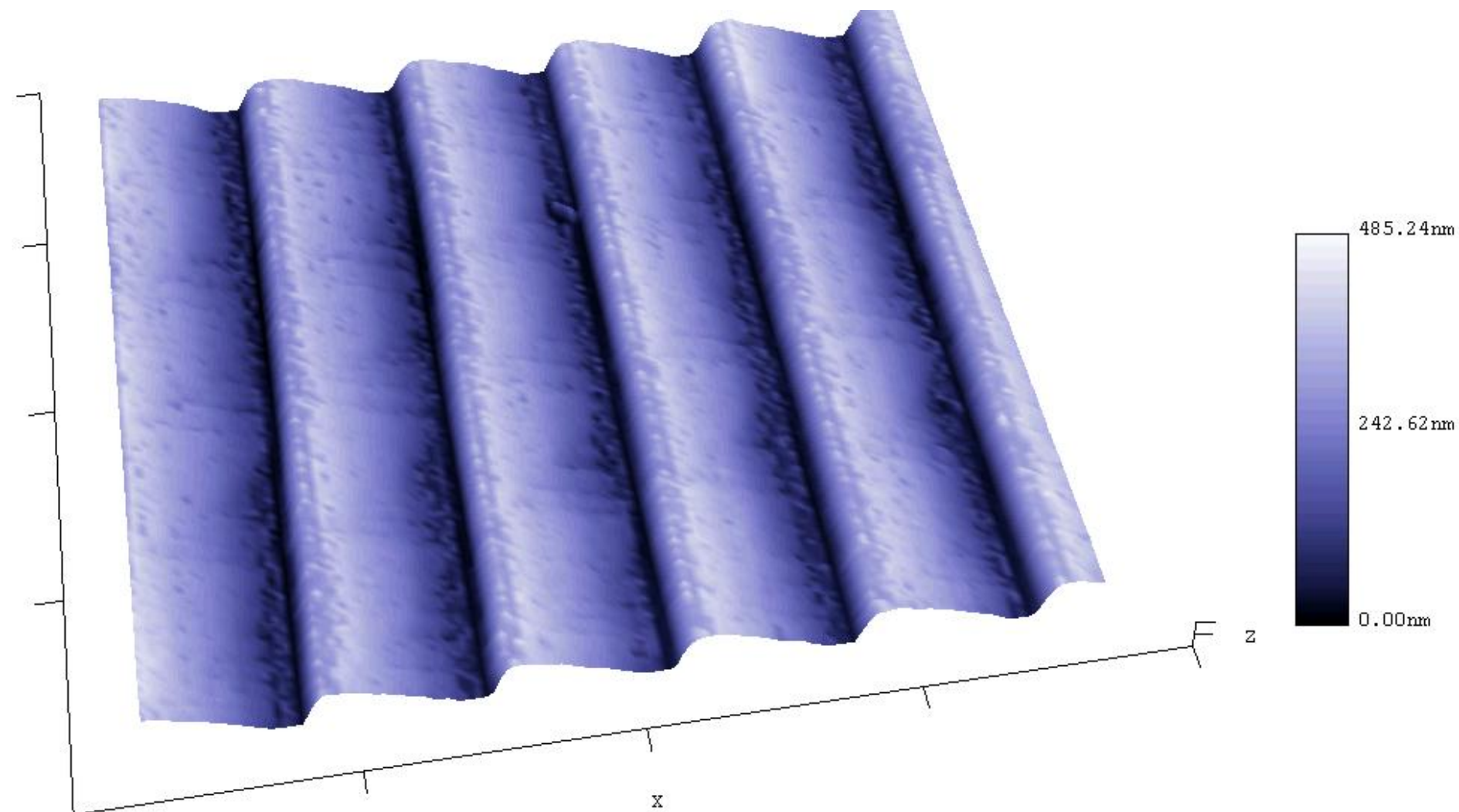
Měření tvaru reliéfu (PMMA, V11)



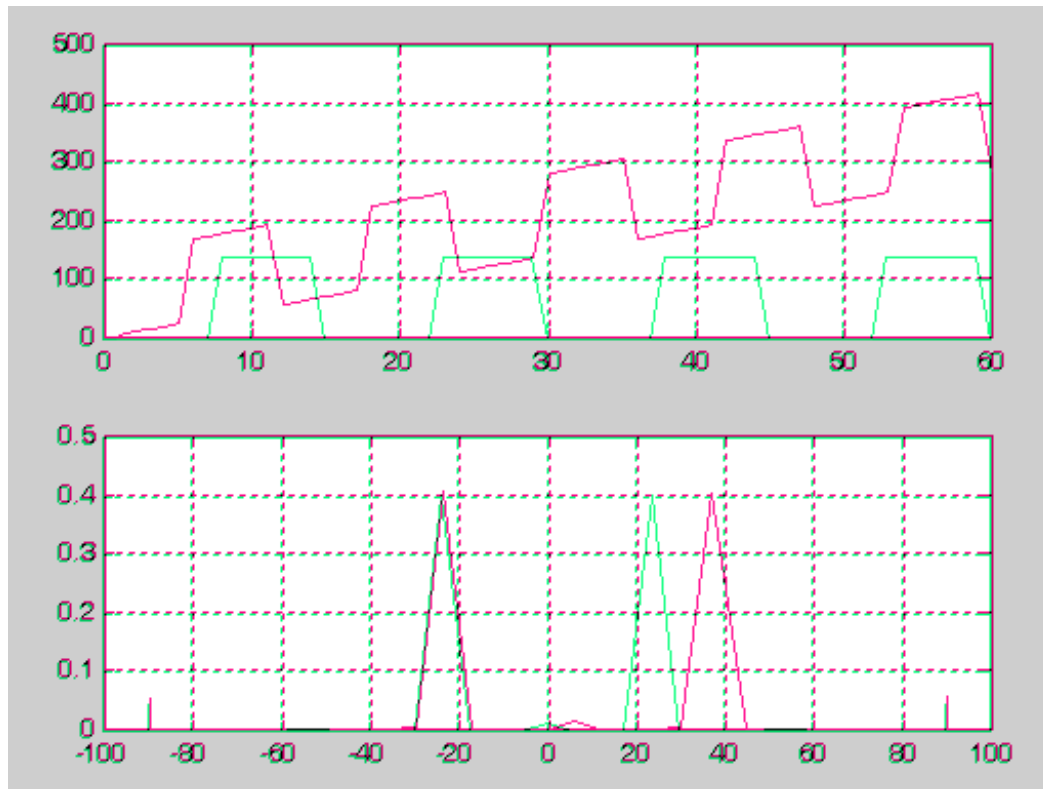
Víceúrovňová struktura



Vyhlazená struktura



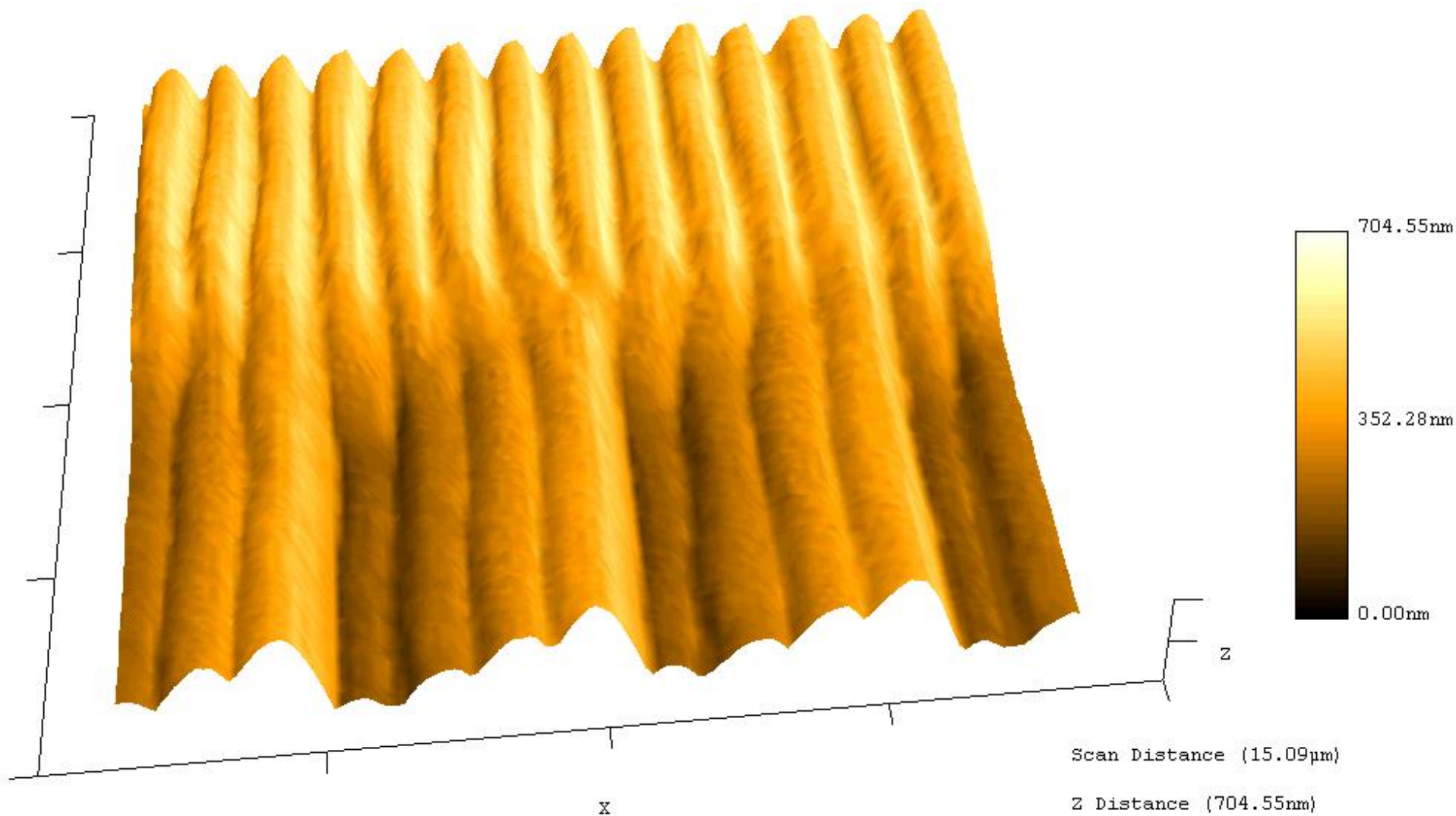
Kombinovaná mřížka - simulace

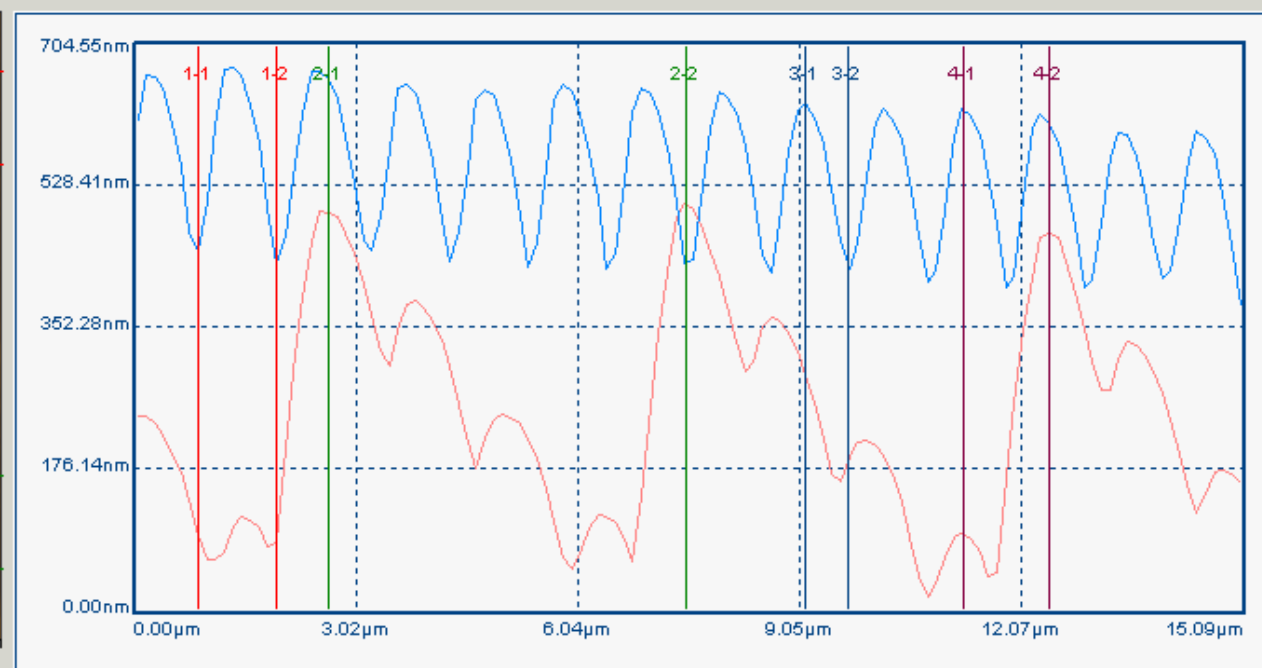
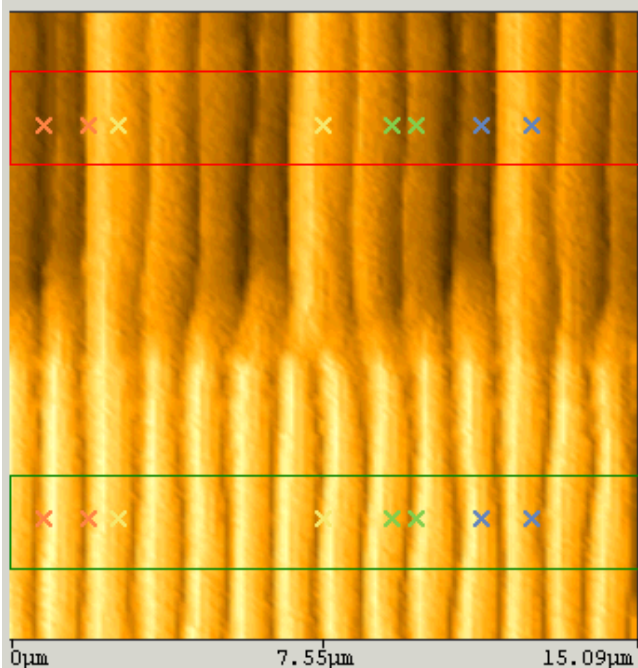


relief

difrakce

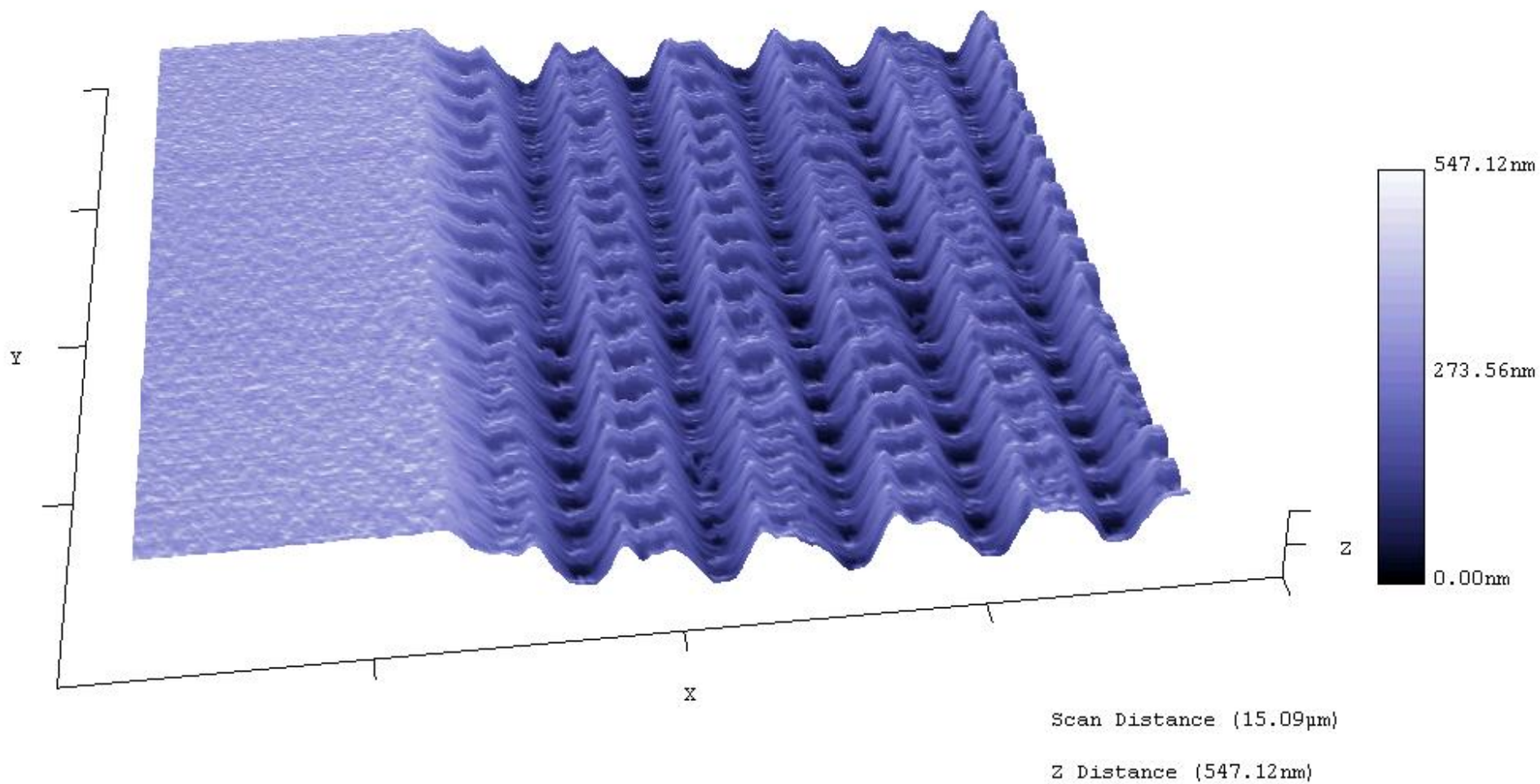
Kombinovaná mřížka (PMMA/V11)





		Pair 1		Pair 2		Pair 3		Pair 4	
		X (µm)	Z (nm)	X (µm)	Z (nm)	X (µm)	Z (nm)	X (µm)	Z (nm)
Line1	1	0.816	98.215	2.600	495.749	9.125	299.231	11.292	93.883
	2	1.886	81.416	7.494	506.813	9.712	181.970	12.465	470.245
	distance	1.071	-16.799	4.894	11.064	0.586	-117.261	1.173	376.363
	pt.angle	-0.90 °		0.13 °		-11.31 °		17.80 °	
Line2	1	0.816	452.075	2.600	664.999	9.125	632.204	11.292	625.251
	2	1.886	442.095	7.494	433.947	9.712	435.888	12.465	609.436
	distance	1.071	-9.980	4.894	-231.053	0.586	-196.316	1.173	-15.816
	pt.angle	-0.53 °		-2.70 °		-18.51 °		-0.77 °	

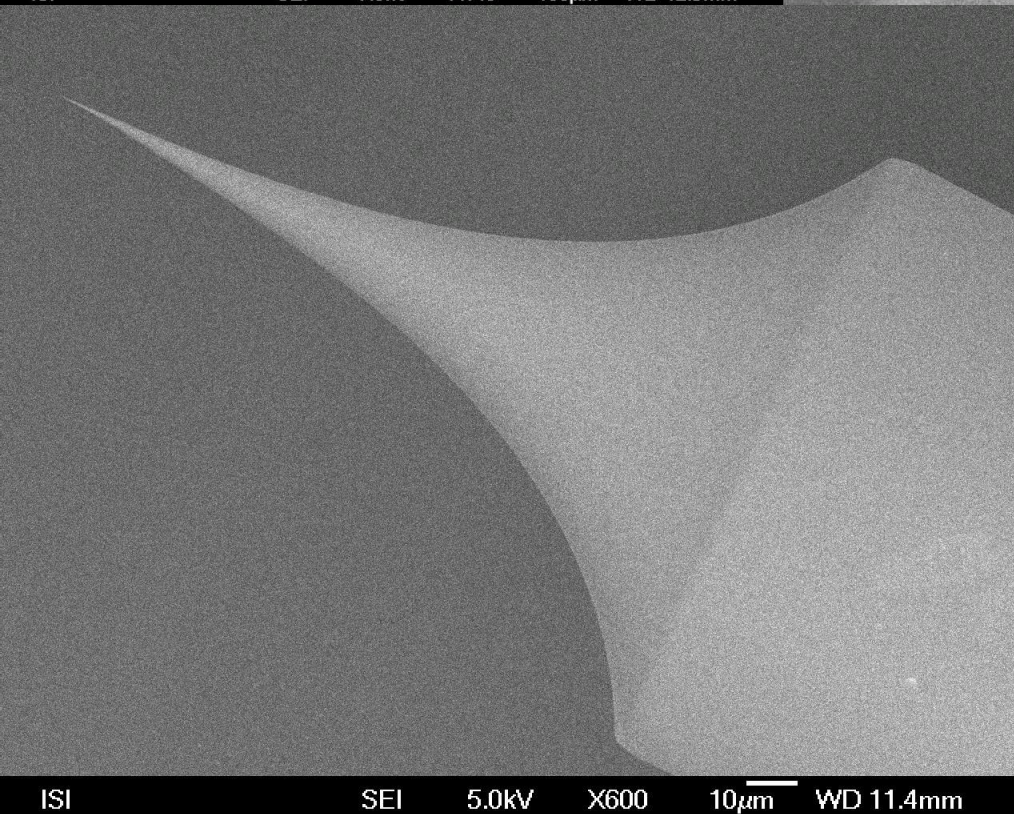
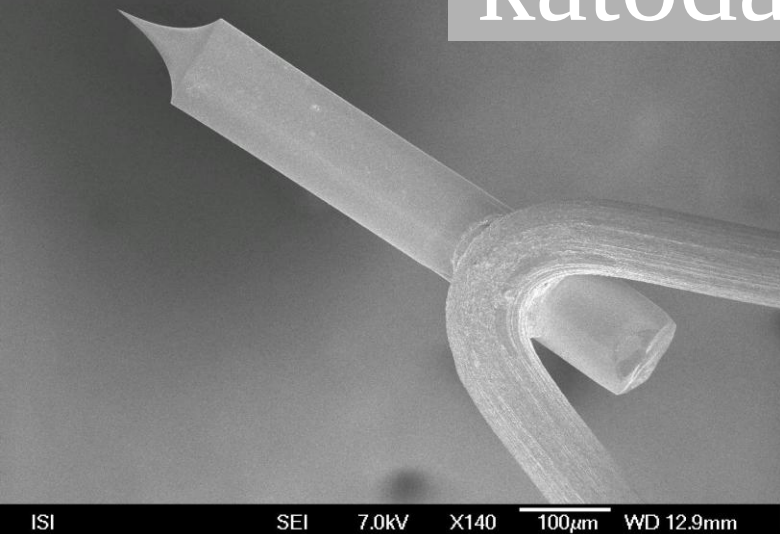
Křížová mřížka



(6) Související aspekty

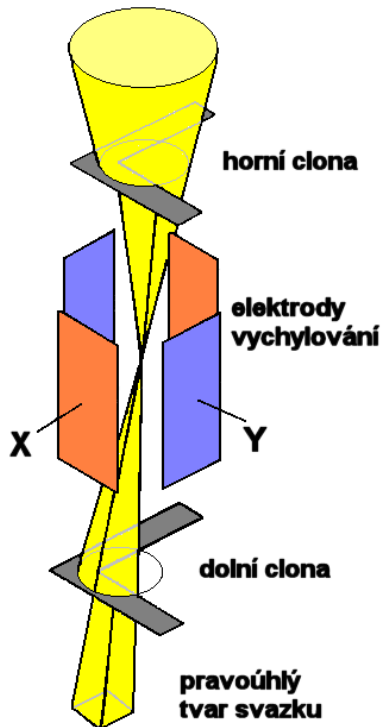
- Katody
- SW pro nastavení čoček
- EXPO SW
- Negativní chování rezistu FEP
- Dolet *BS* elektronů
- Litografie AFM

katoda ELG (SEM)

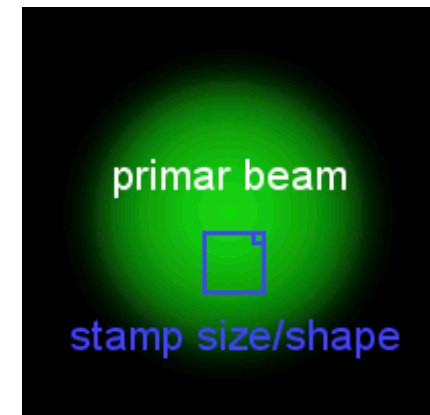
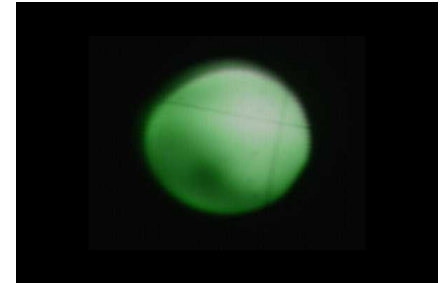


V X190,000 100nm WD 9.1mm

Katody - parametry

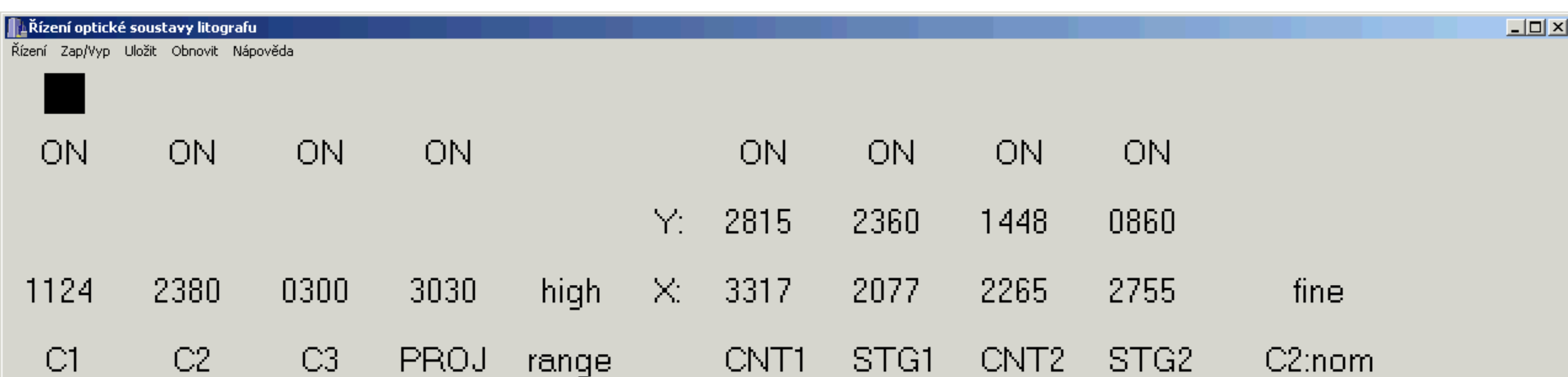


- Základní požadavky:
 - plošná homogenita
 - časová stálost
- Proudová hustota:
 - 0.1 A/cm^2 : extrémně nízká
 - 0.3 A/cm^2 : dolní limit
 - 1.0 A/cm^2 : optimum (10^{-8} A/um^2)
 - 3.0 A/cm^2 : horní limit (křížiště!)
- Proud v segmentu $6.3 \times 6.3 \text{ um}$:
 - 0.4 uA (při 1 A/cm^2)
- Proud v primárním svazku (6x):
 - 2.4 uA (odhad) $\rightarrow \sim 23 \text{ mA/sr}$
- Produkce: cca 6 katod / rok



SW pro nastavení čoček

- Řízení optické soustavy litografu (Miroslav Horáček)
- SW na expozičním PC
- Uložení nastavených parametrů





Parameters Log Watch

Stamp statistics for: C:\BS601\MN

A \ B	1	2	3	4	5	6	7	8
1	24050	0	0	0	0	0	0	
2	0	13050	0	0	0	0	0	
3	0	0	15950	500	0	0	0	
4	0	0	0	6550	0	0	0	
5	0	0	0	0	22650	0	0	
6	0	0	0	0	0	4050	0	25
7	0	0	0	0	0	0	3450	25
8	0	0	0	0	0	0	0	330
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	800	800	800	800	8800	800	800	80
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	6000	0	0	

Close Total stamps: 2754

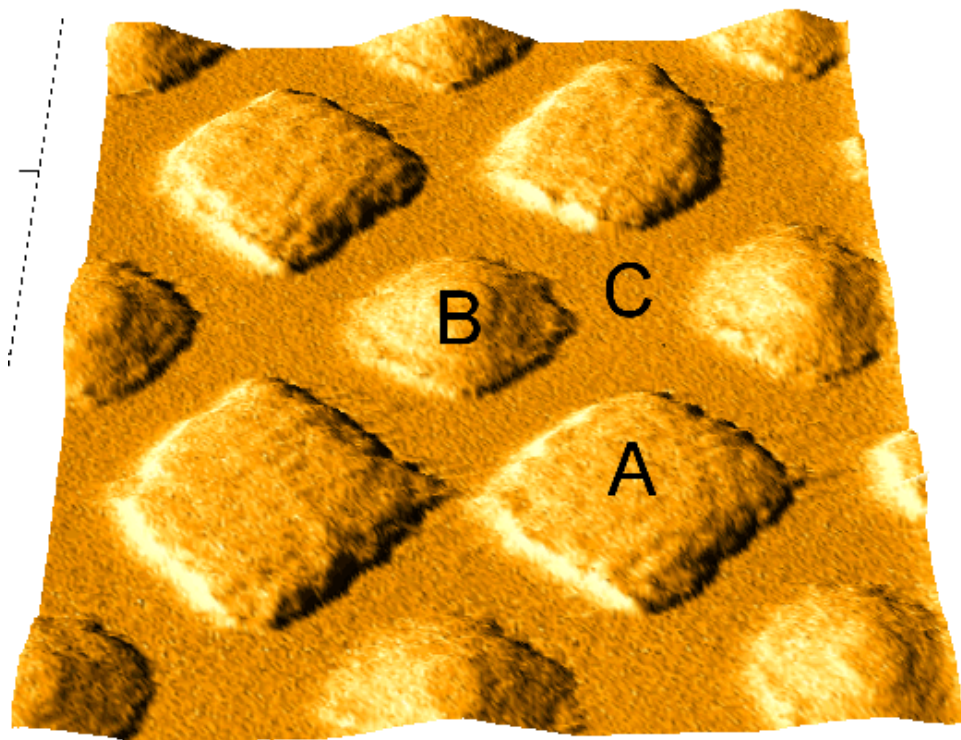
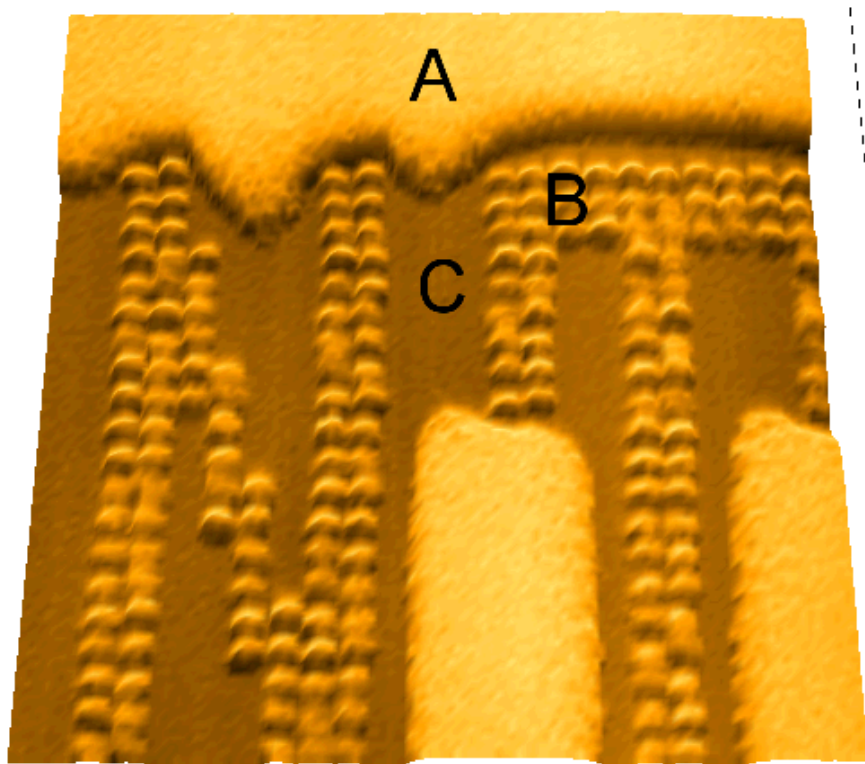
 TZG3 TEST000 TEST001 **MNTH2** T

FEP – negativní chování (TZ)

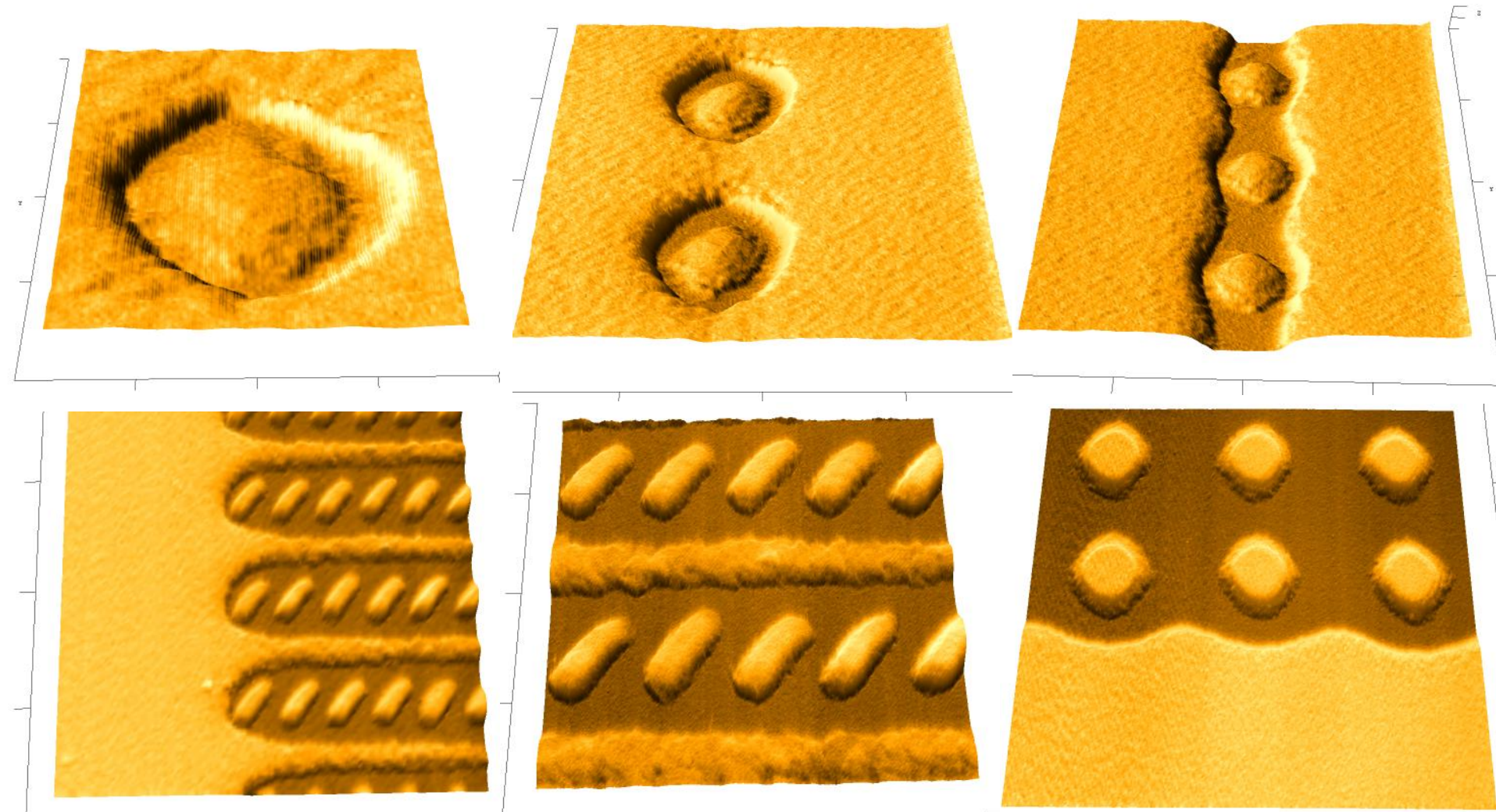
A: neexponovaná oblast

B: negativní chování v oblasti přexpozice primárními elektrony

C: pozitivní chování v oblasti expozice zpětně odraženými elektrony

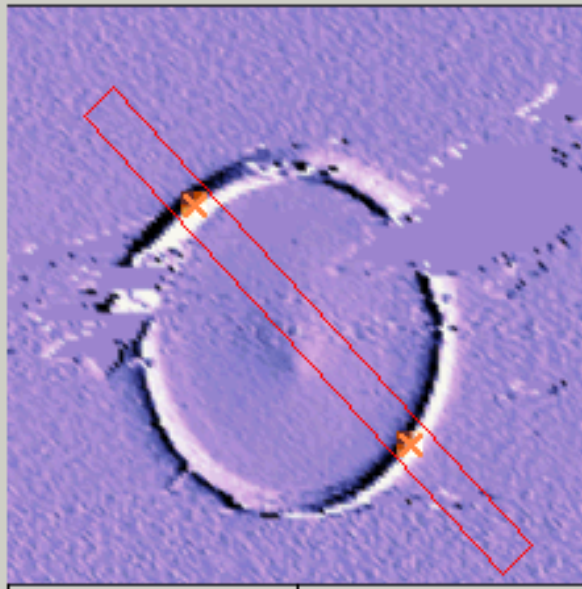


FEP – negativní chování (*pokr.*)

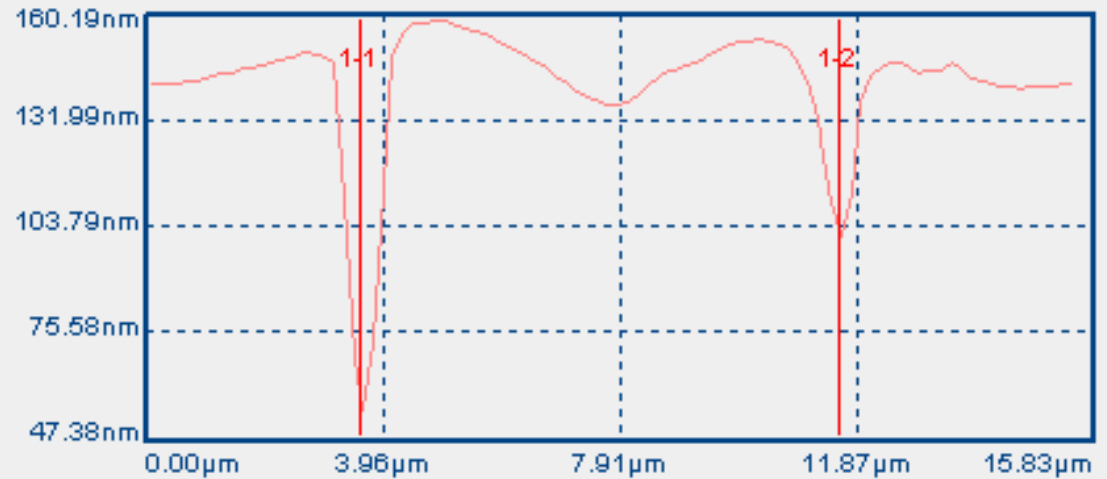


charakterizace citlivosti → binární + reliéfní struktury⁴⁴

Dolet BS e⁻



0 μm 14.63 μm

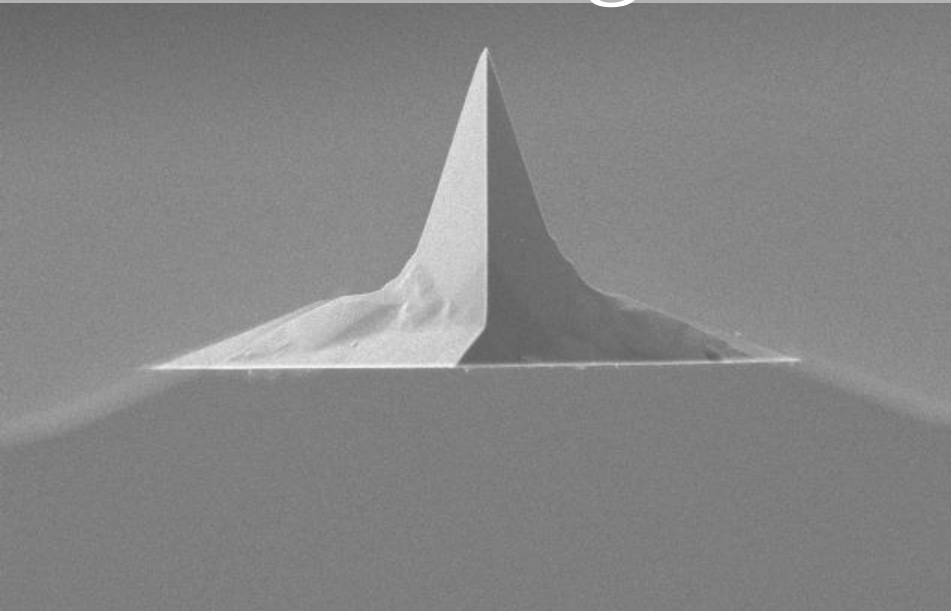


Line Angle:

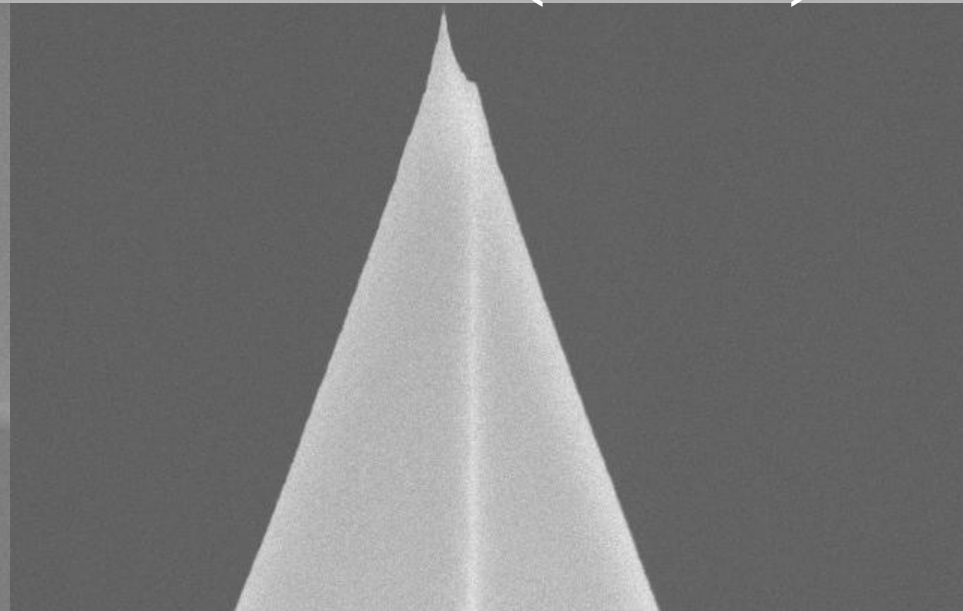
		Pair 1	
		D (μm)	Z (nm)
Line1	1	3.529	59.258
	2	11.629	103.084
	distance	8.100	43.826
	pt.angle	0.31 °	



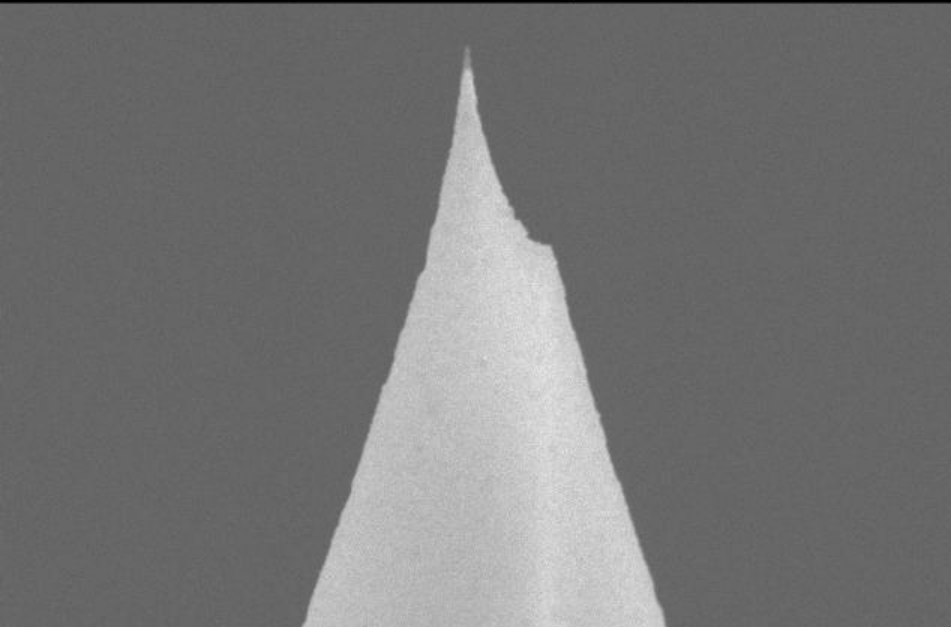
AFM litografie - hrot AFM (SEM)



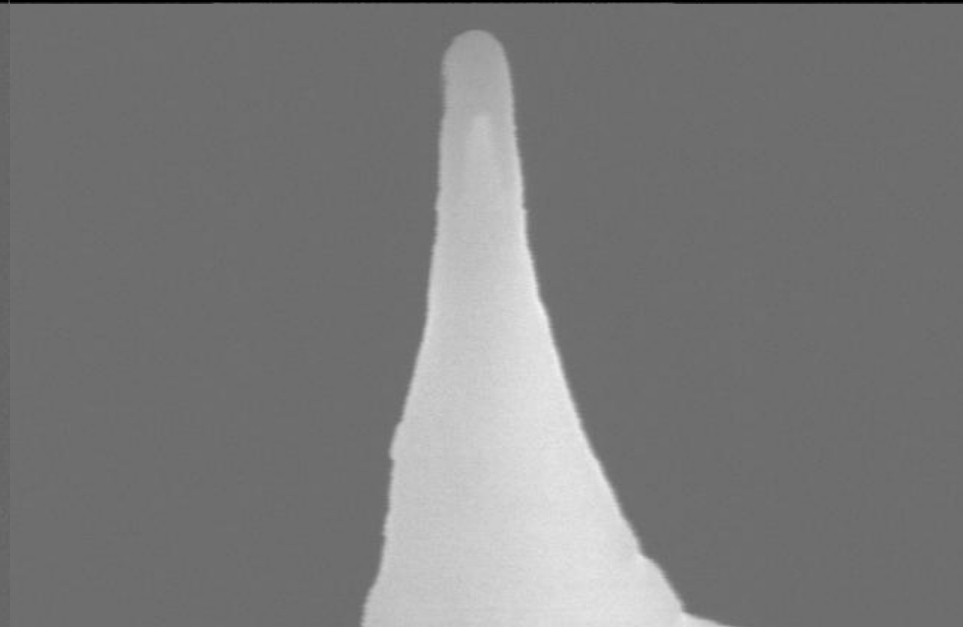
ISI LEI 5.0kV X2,000 10 μ m WD 7.9mm



ISI SEI 5.0kV X20,000 1 μ m WD 6.0mm



ISI SEI 5.0kV X50,000 100nm WD 6.0mm

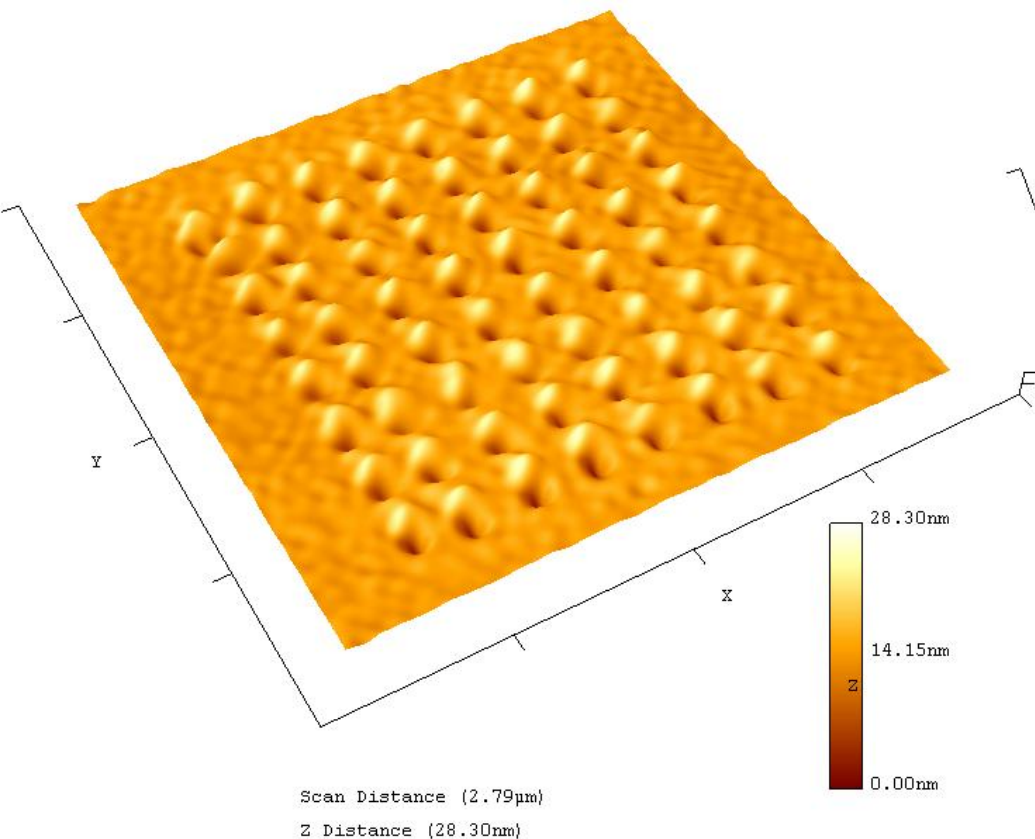


ISI SEI 5.0kV X150,000 100nm WD 4.0mm

AFM litografie - struktury

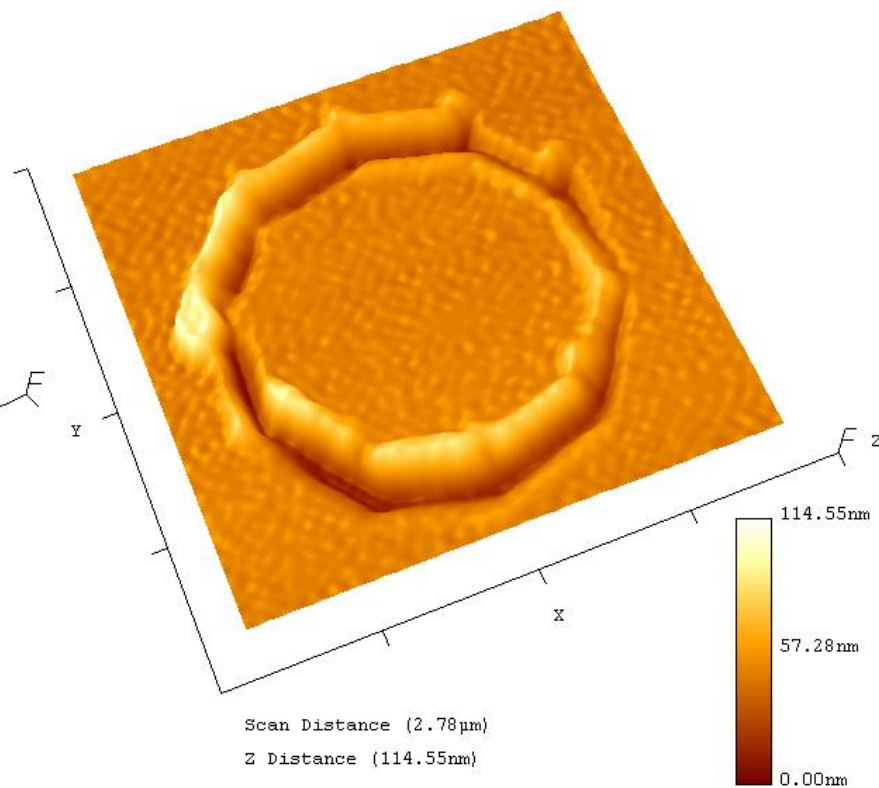
vpichy, rozteč 300 nm

hloubka +/- 10 nm



rýhy, poloměr 1000 nm

hloubka +/- 40 nm



opotřebení hrotu → hroty s povrchovou úpravou

Závěr

Litograf			
<i>parametr</i>	<i>původní</i>	<i>aktuální</i>	<i>rozměr</i>
velikost svazku	100-6300	50-3125	[nm]
rel. proudová hustota	1	4	[-]
krok vychylování	100	<100	[nm]
režie instrukce	40	8	[us]