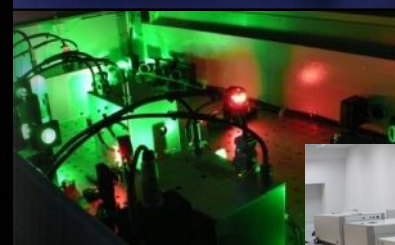




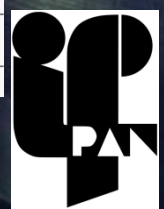
Zespół Oddziaływania Promieniowania Laserowego z Materiał,
Instytut Optoelektroniki,
Wojskowa Akademia Techniczna

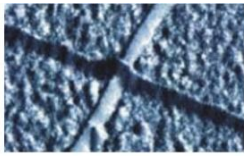


***Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu EUV
i miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR
z wykorzystaniem kompaktowych źródeł***

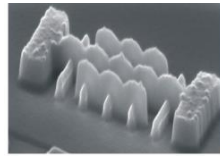
Przemysław W. Wachulak

Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia
Techniczna, Warszawa, Polska
wachulak@gmail.com





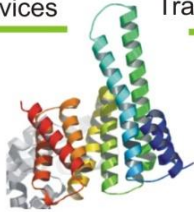
Quantum devices



Transistor gates



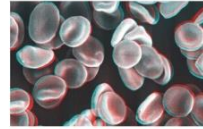
MEMS devices



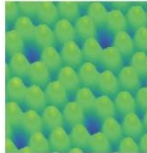
Proteins



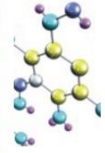
Visible light



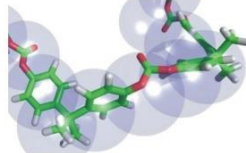
Cells



Atoms



Molecules



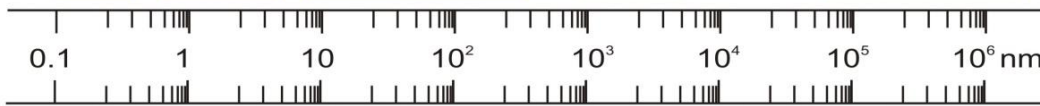
Polymers



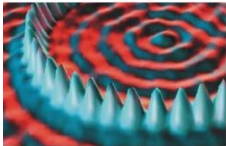
Bacteria



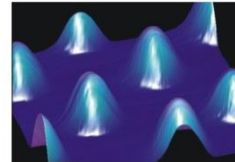
Liquid drops



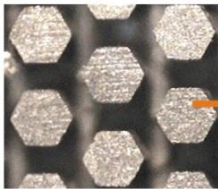
Scanning Probe lithography



Electron Beam lithography



Masked deposition

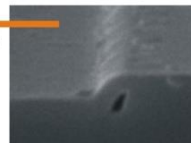


Molding and embossing

Contact printing



Edge lithography



Nanotechnologia:

Manipulowanie obiektami (atomami, molekułami, itp.) i obserwacja rezultatów tej manipulacji w skali nanometrowej

„NANO”

1nm =0.000 000 001m=
10 atomów H

Średnica ludzkiego

Włosa: 50 000nm

Najmniejsza odległość

widziana przez ludzkie

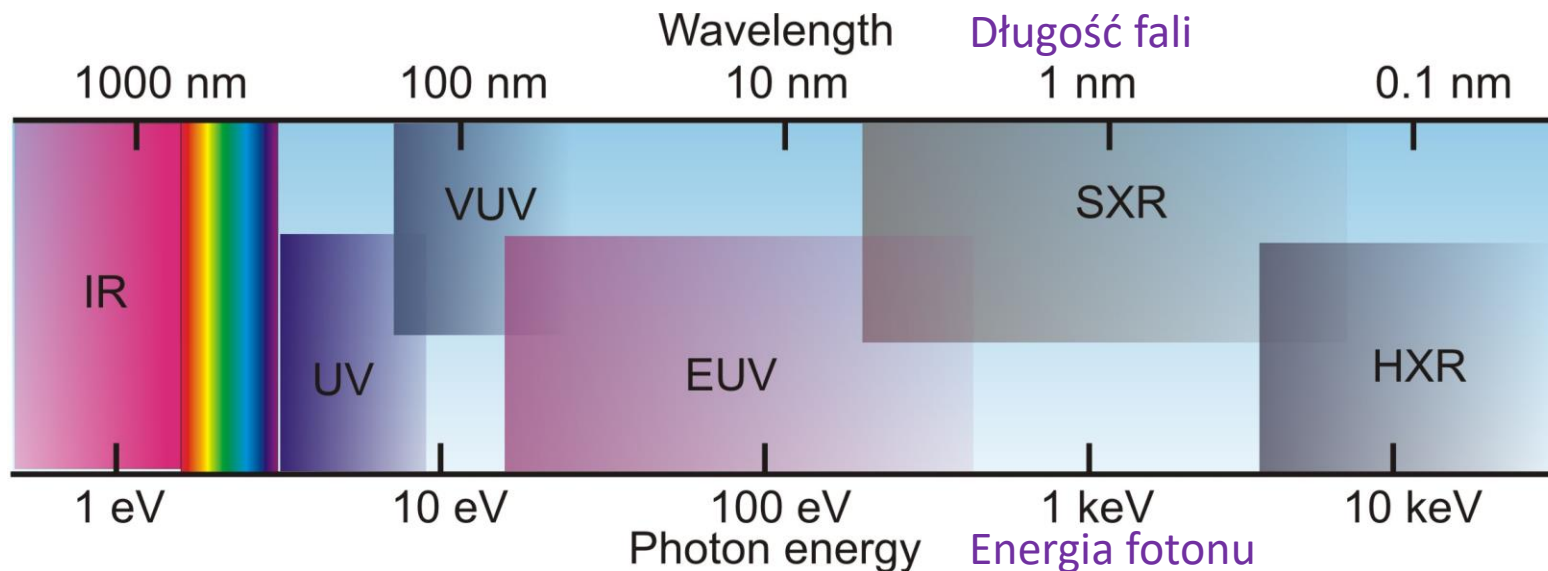
oko: 20 000 nm

Nanoobrazowanie:

Obrazowanie z

rozdzielczością: <100nm

Widmo elektromagnetyczne



Extreme Ultraviolet (EUV)

– skrajny nadfiolet

$$\lambda \sim 5-50 \text{ nm}$$

$$E_{\text{ph}} \sim 25-250 \text{ eV}$$

Soft X-rays (SXR)

- miękkie promieniowanie rentgenowskie

$$\lambda \sim \text{kilka } \text{\AA} - 5 \text{ nm}$$

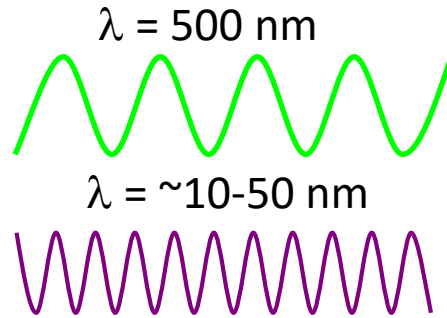
$$E_{\text{ph}} \sim 250 - \text{kilka keV}$$

Zalety promieniowania EUV i SXR

EUV

- krótsza długość fali λ – lepsza rozdzielczość przestrzenna

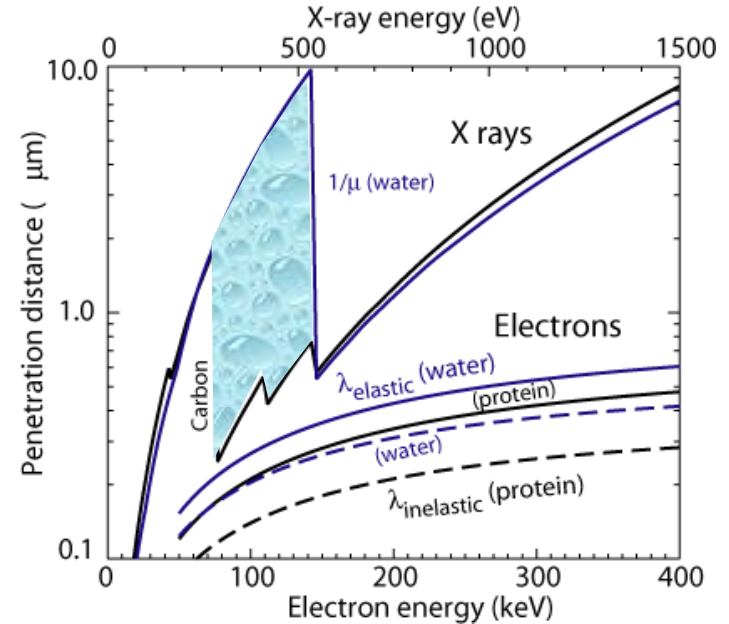
$$\delta = \frac{k \cdot \lambda}{NA}$$



Promieniowanie EUV „widzi”
10-100x mniejsze obiekty

- silny kontrast optyczny w zakresie EUV;
bardzo silna absorpcja w cienkich warstwach, praktycznie każdy materiał jest nieprzezroczysty włącznie z gazami (**bezpośrednia obserwacja gazów**).
- zastosowania w litografii EUV

SXR

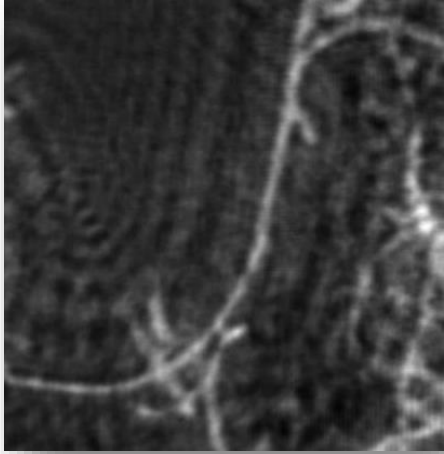


xray1.physics.sunysb.edu

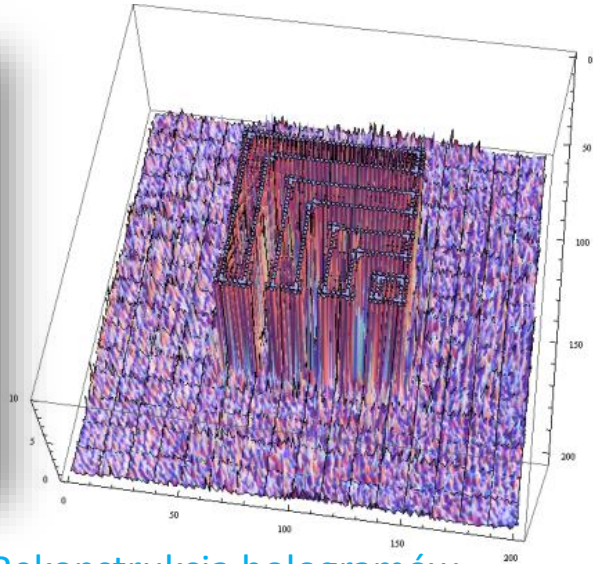
Water window: 284 - 543 eV, $\lambda = 2.3 - 4.4$ nm

- mała dł. fali -> możliwa **wysoka rozdzielczość przestrzenna** : $\delta = k\lambda/NA$.
- bardzo wysoki **kontrast optyczny pomiędzy materiałem organicznym (węgiel) i wodą**
- **promieniowanie o dużej penetracji** w zakresie dziesiątek mikrometrów dla materiałów biologicznych,

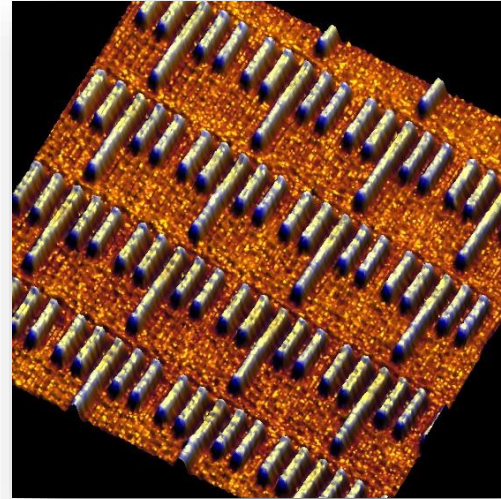
Metody nanoobrazowania



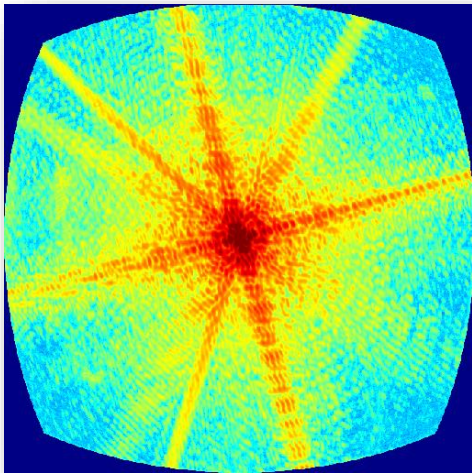
Holografia EUV
(Gabora i Fouriera)



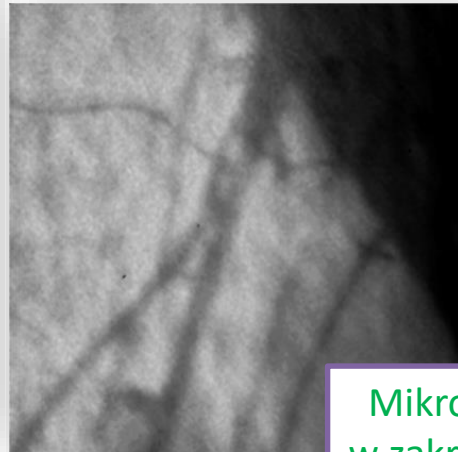
Rekonstrukcja hologramów
generowanych
komputerowo CGI



Obrazowanie
Talbota

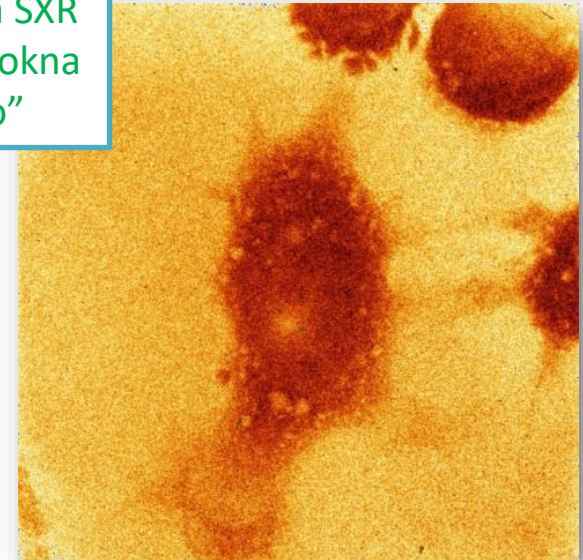


Obrazowanie
dyfrakcyjne

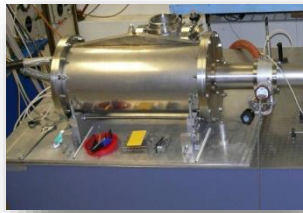


Mikroskopia
w zakresie EUV

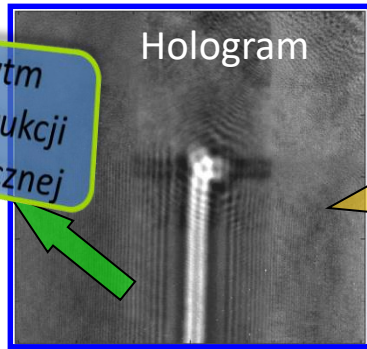
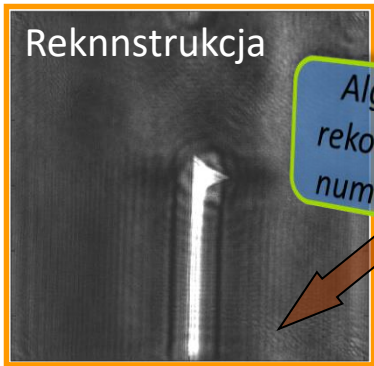
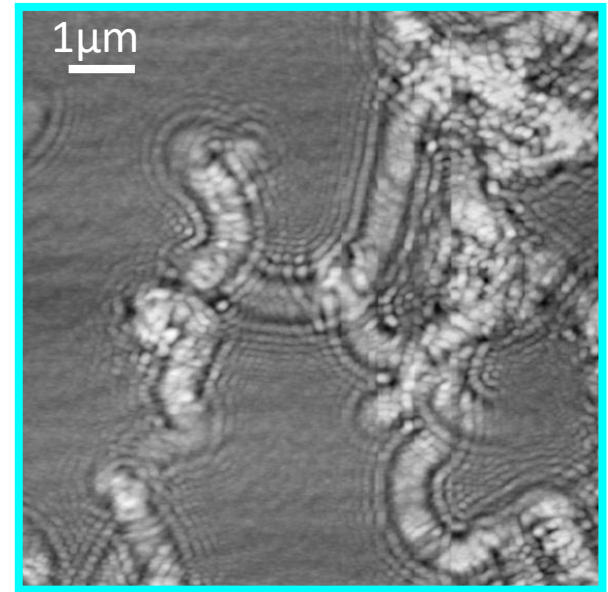
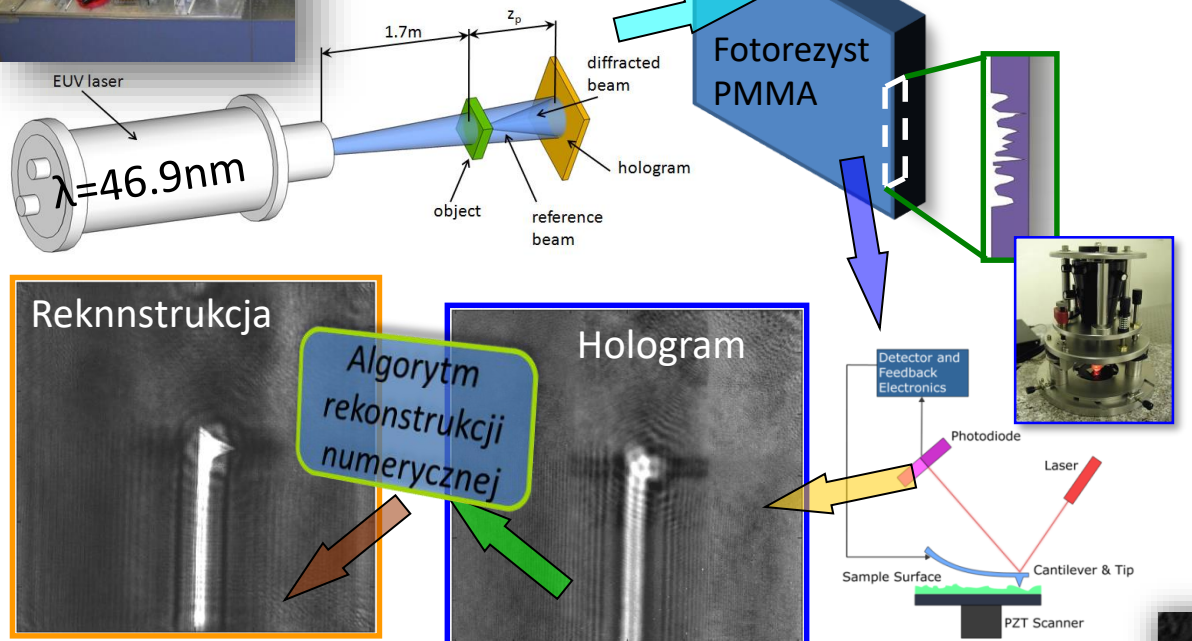
Mikroskopia SXR
w zakresie „okna
wodnego”



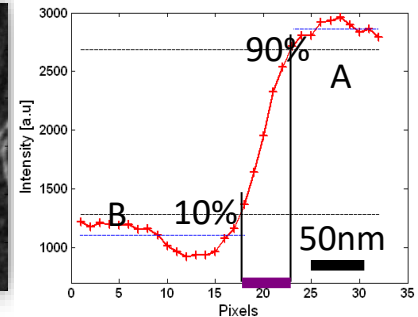
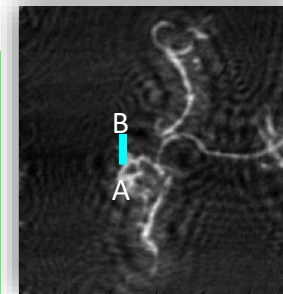
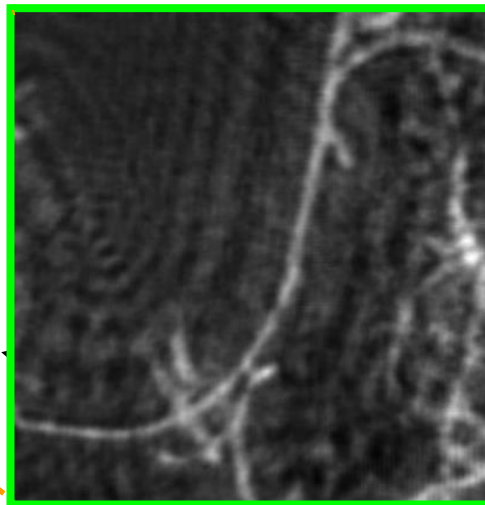
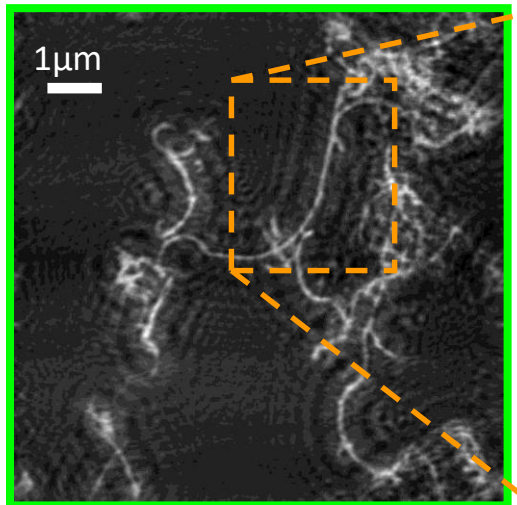
Nanoholografia Gabora z rozdzielczością <math>< 50\text{nm}</math>



Schemat do nanoholografii Gabora



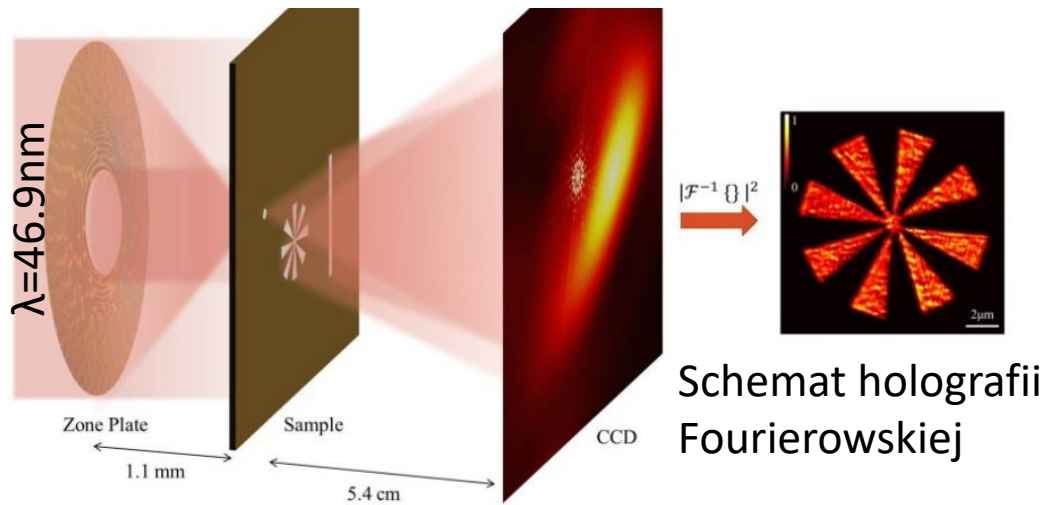
Algorytm rekonstrukcji numerycznej



✓ Rozdzielczość: $\delta = 45.8 \pm 1.9 \text{ nm}$

P. W. Wachulak, et al., J. Opt. Soc. Am. B, 25, 11, 1811 (2008).

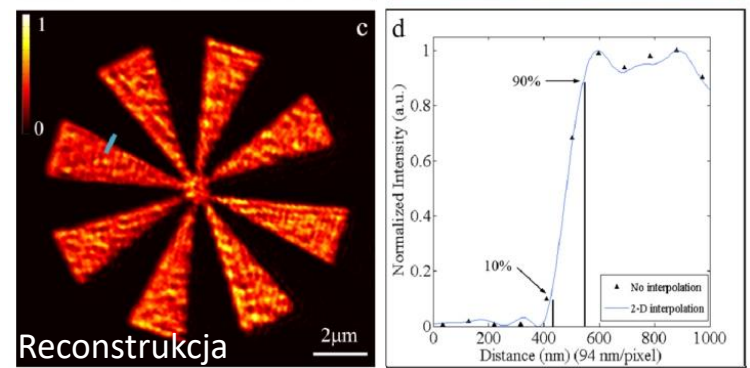
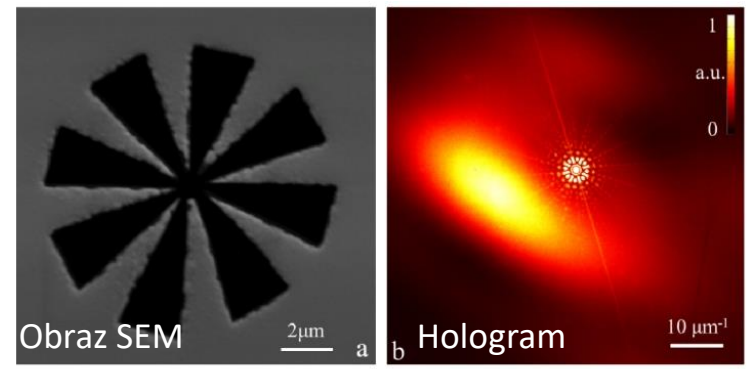
Holografia Fourierowska EUV z nanosekundową rozdzielczością czasową



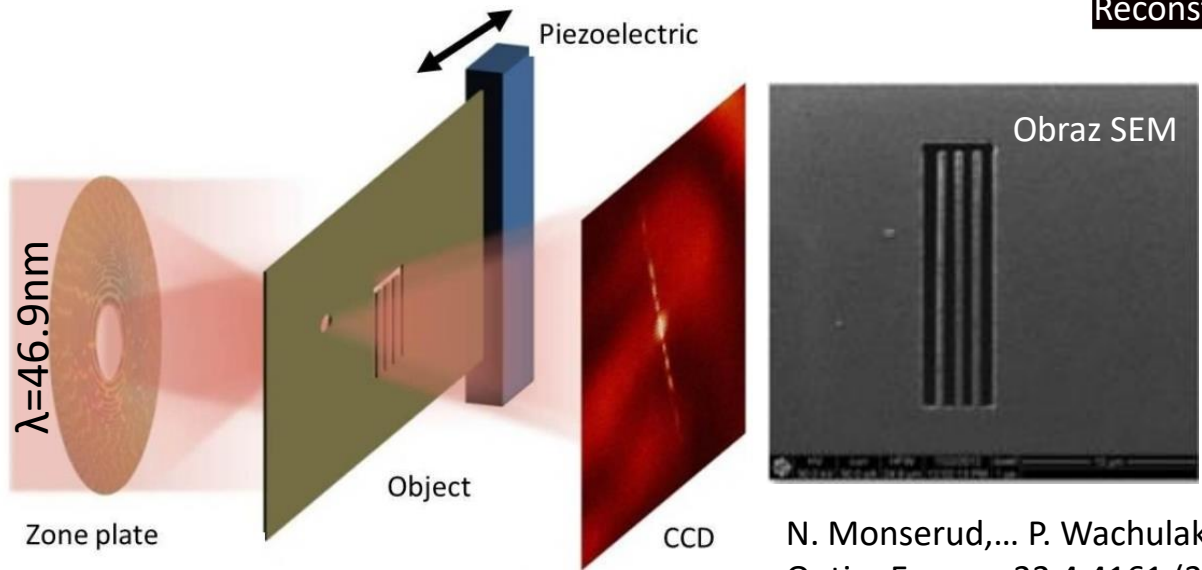
Schemat holografii Fourierowskiej

Rozdzielczość przestrzenna **120 nm**
 Rozdzielczość czasowa **~1 ns**

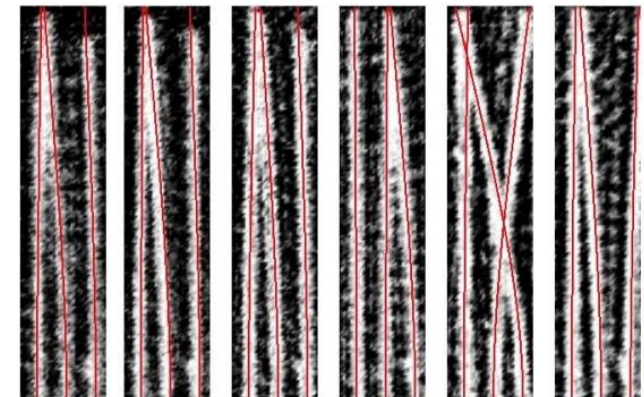
E. Malm, ... P. Wachulak et al., Optics Express 21,8,9959 (2013)



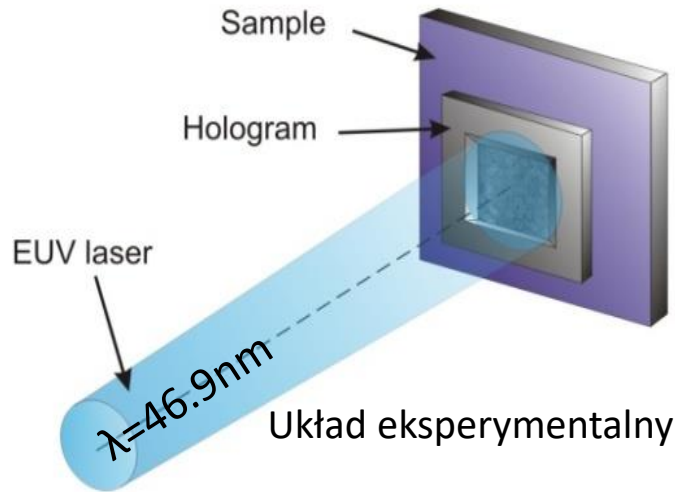
Rekonstrukcje oscylujących nanoprętów



N. Monserud, ... P. Wachulak et al., Optics Express 22,4,4161 (2014)



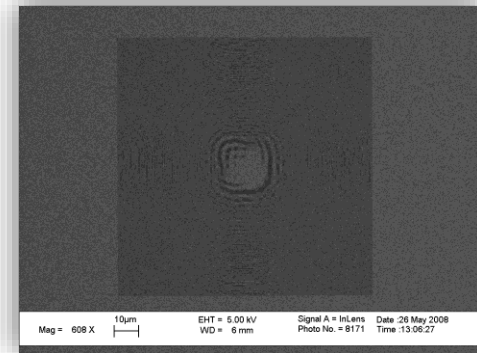
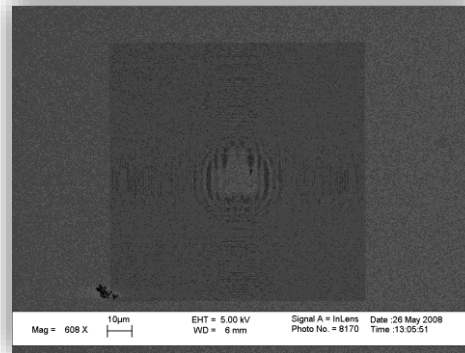
Rekonstrukcja EUV hologramów wygenerowanych komputerowo



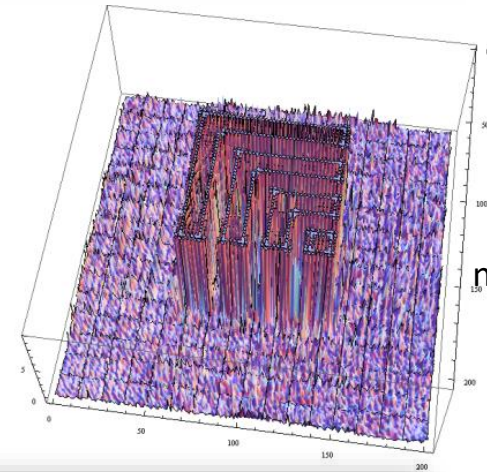
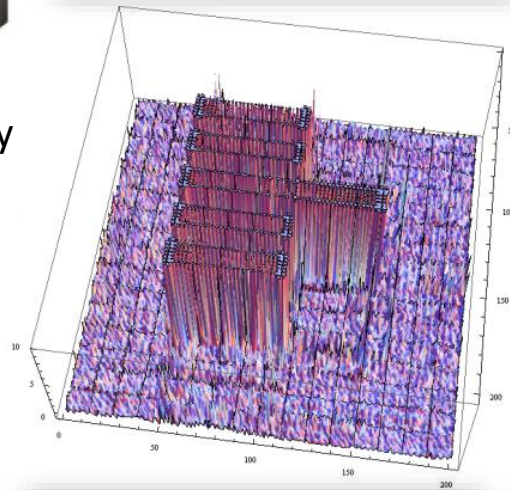
Zalety:

- obiekt nie musi fizycznie istnieć
- Hologram może być częściowo zniszczony, bez wpływu na jakość rekonstrukcji.

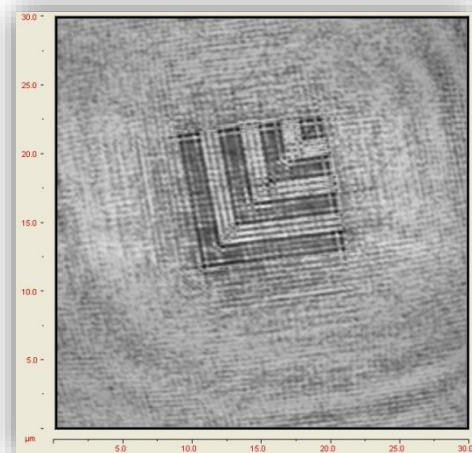
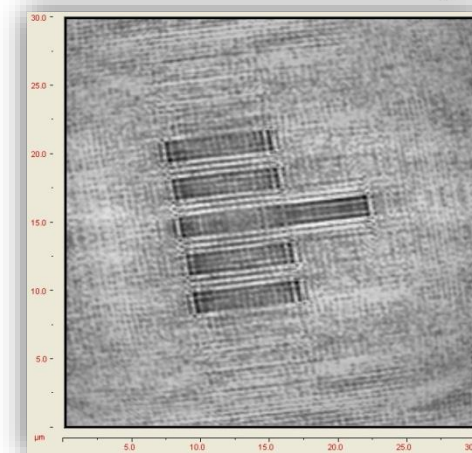
A. Isoyan, ...P. Wachulak, et al.,
Journal of Vacuum Science & Technology B, 27, 6, 2931-2937
(2009)



Obrazy SEM
masek
wykonanych
wiązką
elektronów



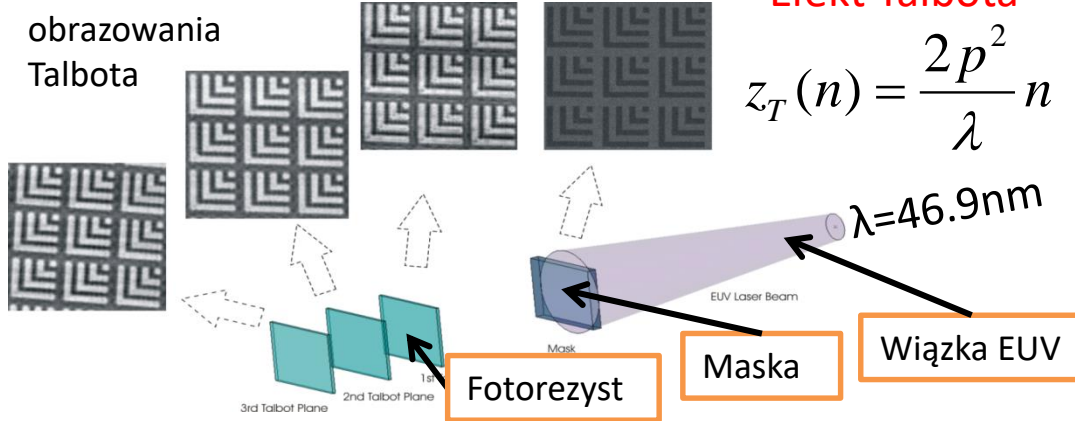
Symulacje
numeryczne



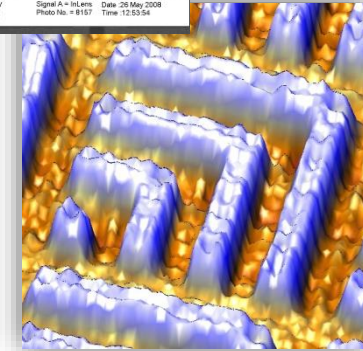
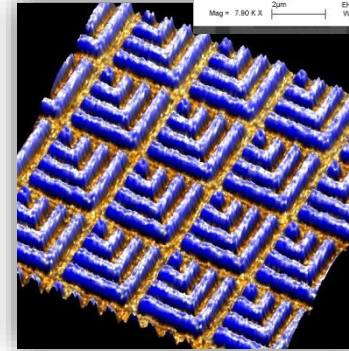
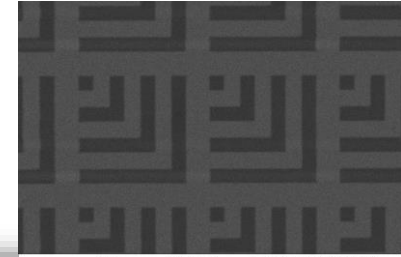
Rekonstrukcje
w powierzchni
fotorezystu

Obrazowanie Talbota w zakresie EUV

Schemat obrazowania Talbota

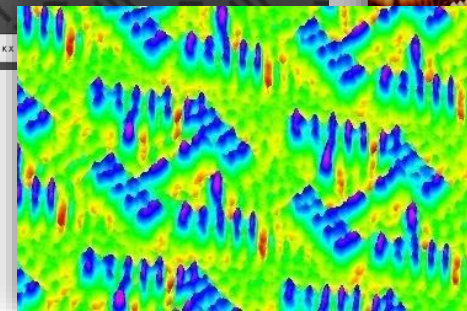
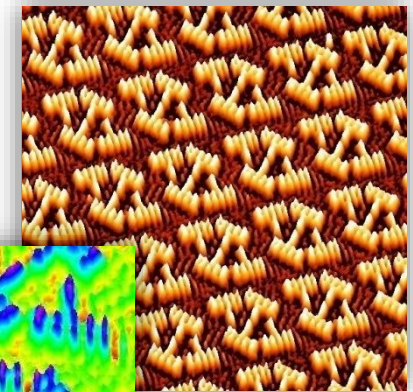
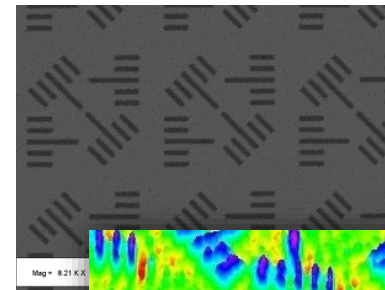
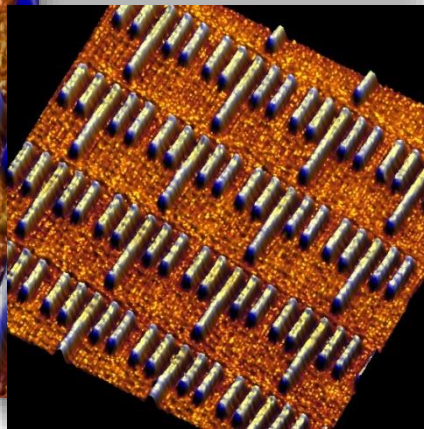
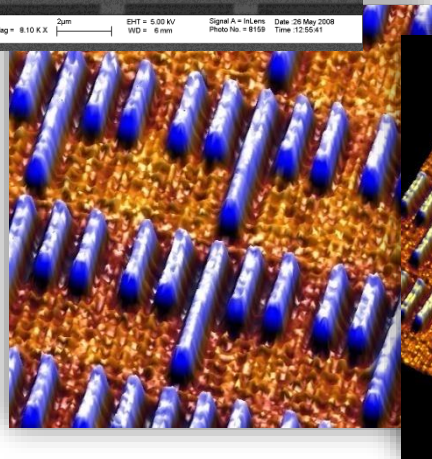
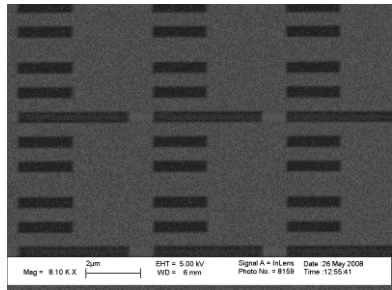


Obrazy SEM różnych masek Talbota

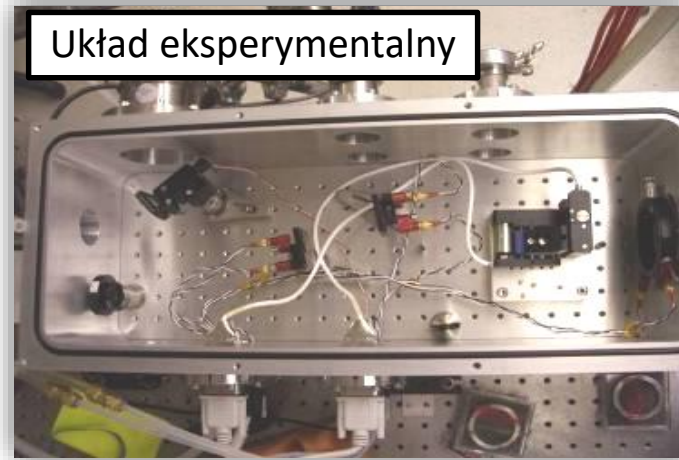
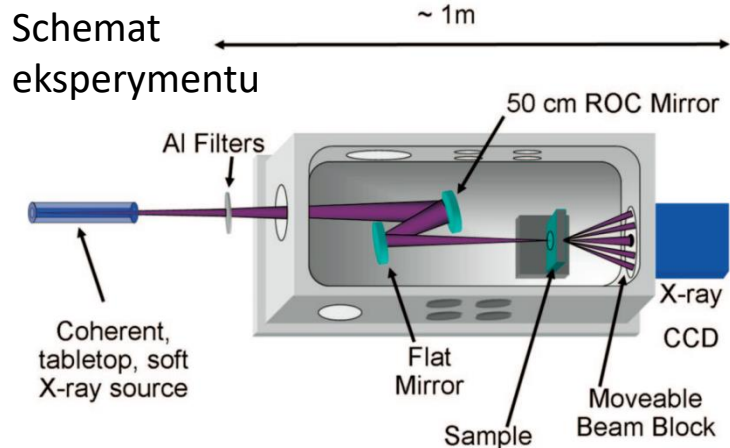


Obrazy Talbota 1 rzędu w fotorezycie PMMA

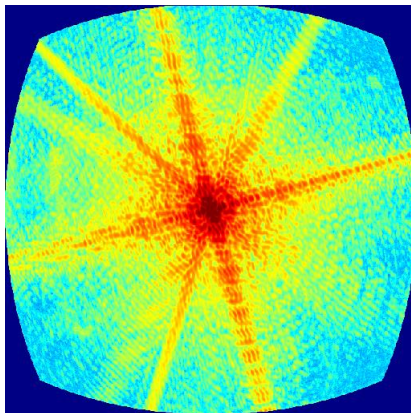
- ✓ obiekty o szerokości 140nm bardzo dobrze rozróżnialne
- ✓ Rozdzielczość teoretyczna < 90nm



Obrazowanie dyfrakcyjne - bezsoczewkowe



Obraz SEM

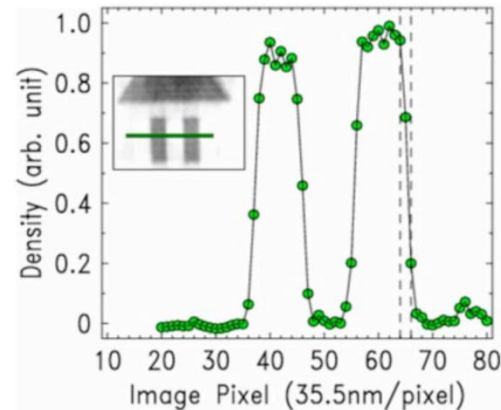


Obraz dyfrakcyjny



Rekonstrukcja numeryczna (rekonstrukcja fazy)

Pomiar rozdzielczości przestrzennej



Zalety:

- brak optyki
- rozdzielczość przestrzenna $\sim \lambda$

Wady:

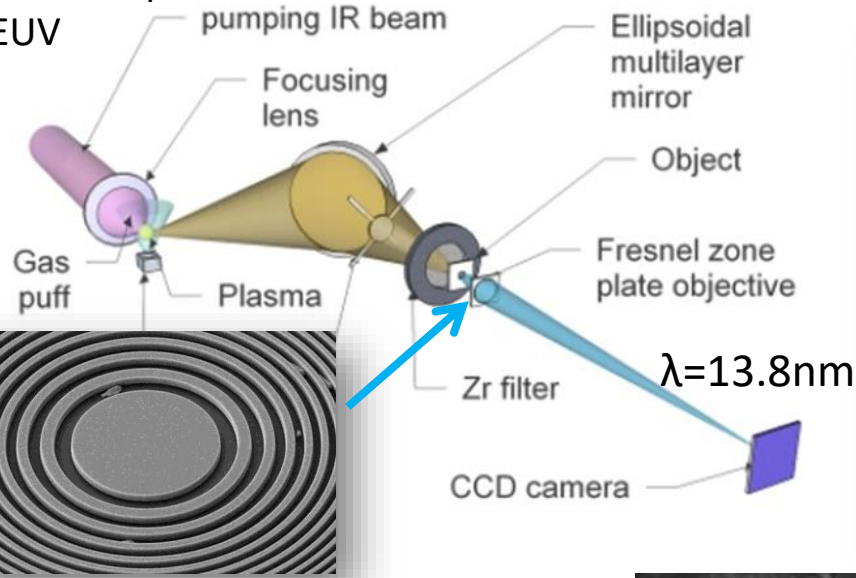
- Czasochłonna rekonstrukcja (kilka tysięcy iteracji)

- ✓ Wysoka apertura numeryczna obrazu dyfrakcyjnego ($NA > 0.6$) pozwala na rozdzielczość 72 nm (1.5λ)

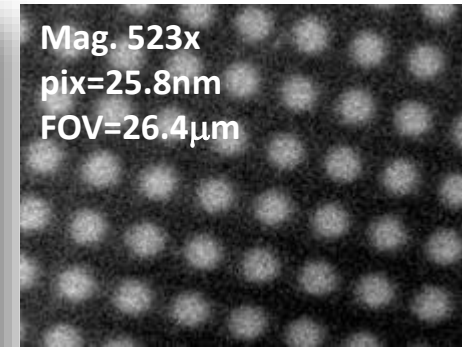
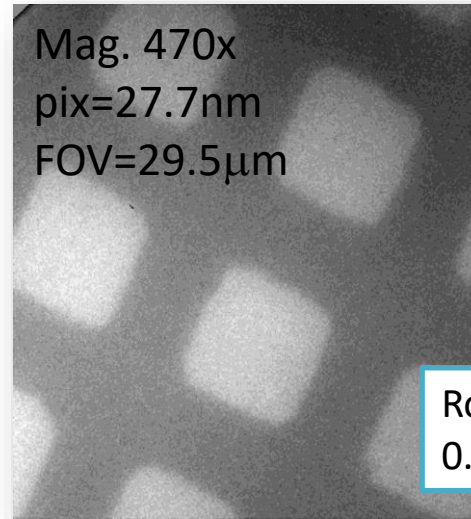
R.L. Sandberg, C. Song, P.W. Wachulak, et al, Proceedings of the National Academy of Science, 105, (1), 24-27, (2008), and Research Highlights, Nature Photonics 2, 64 (2008).

Mikroskopia EUV

Schemat
mikroskopu
EUV



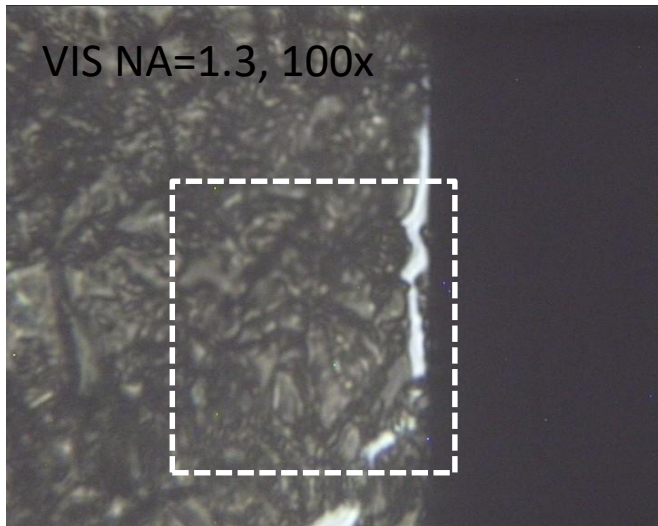
Obrazowanie obiektów testowych



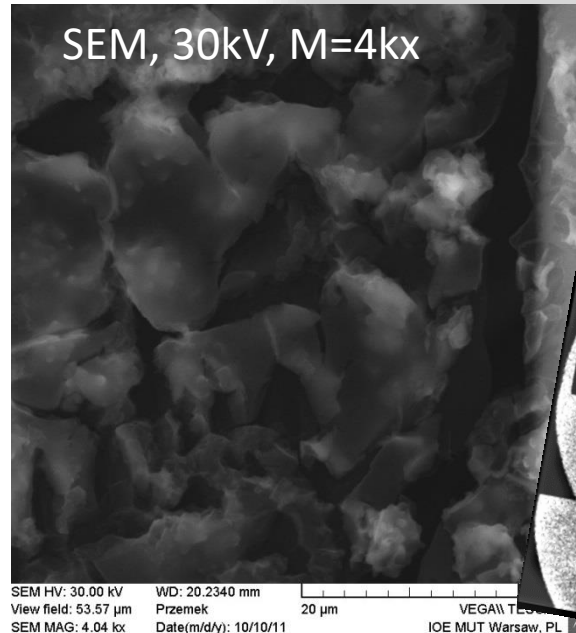
Rozdzielczość połówkowa
 $0.5\Delta_{10-90\%} \sim 50\text{nm}$

Obrazowanie cienkich warstw

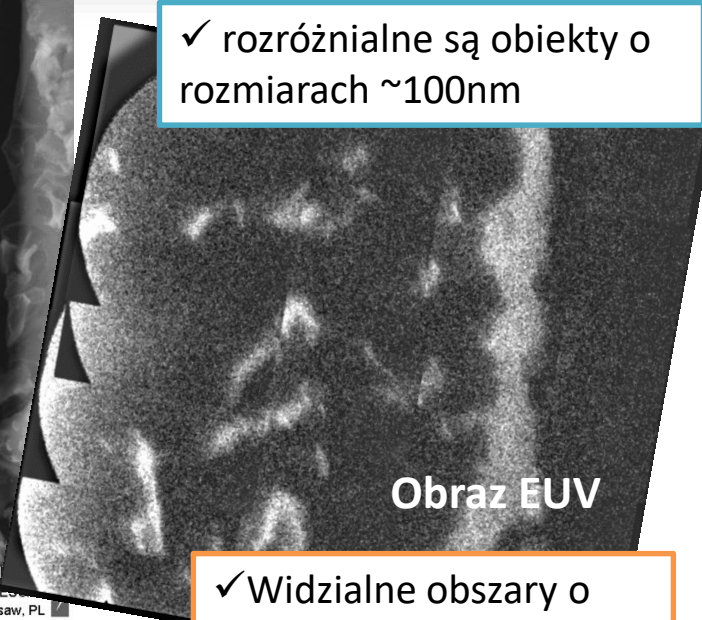
VIS NA=1.3, 100x



SEM, 30kV, M=4kx



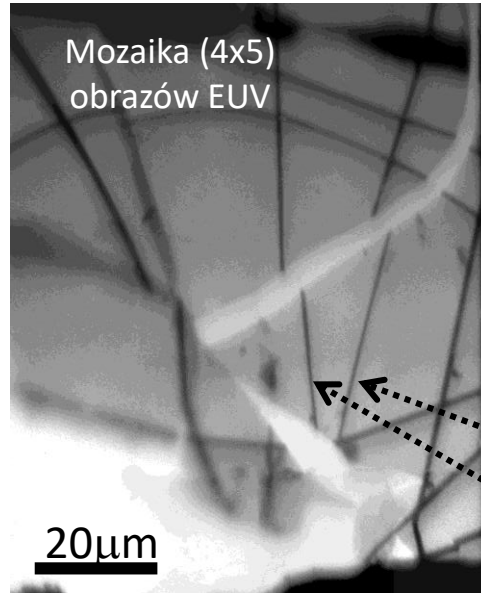
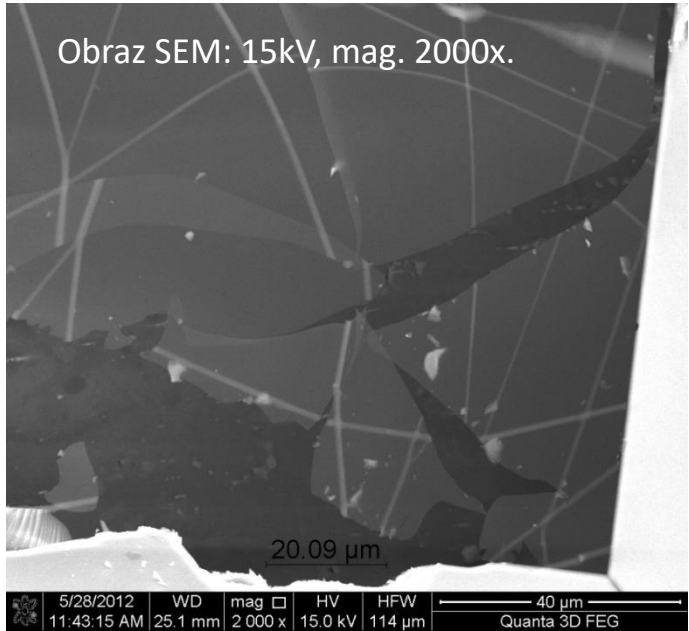
✓ rozróżnialne są obiekty o rozmiarach ~100nm



Obraz EUV

✓ Widzialne obszary o grubości <100nm

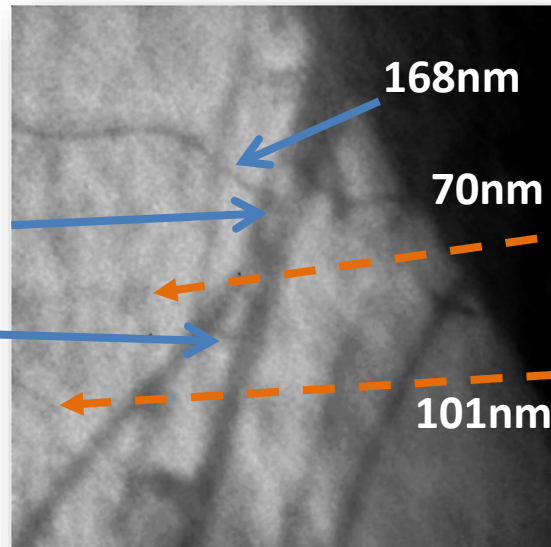
Obrazowanie nanostruktur: nanowłókna ZnO



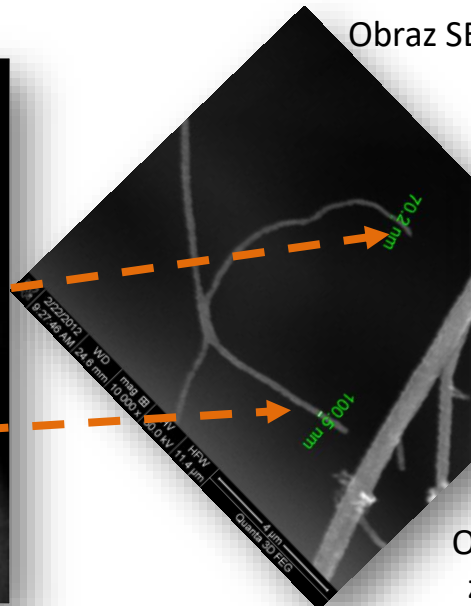
ZnO jest materiałem o szerokich zastosowaniach we współczesnej elektronice

Włókna ZnO o średnicy 380-570nm

Obraz z mikroskopu EUV

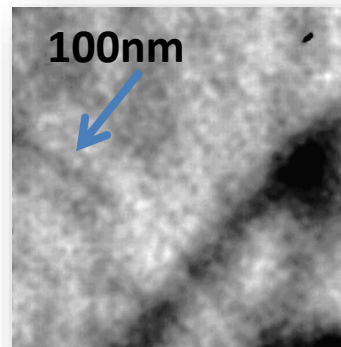


Obraz SEM, U=30kV



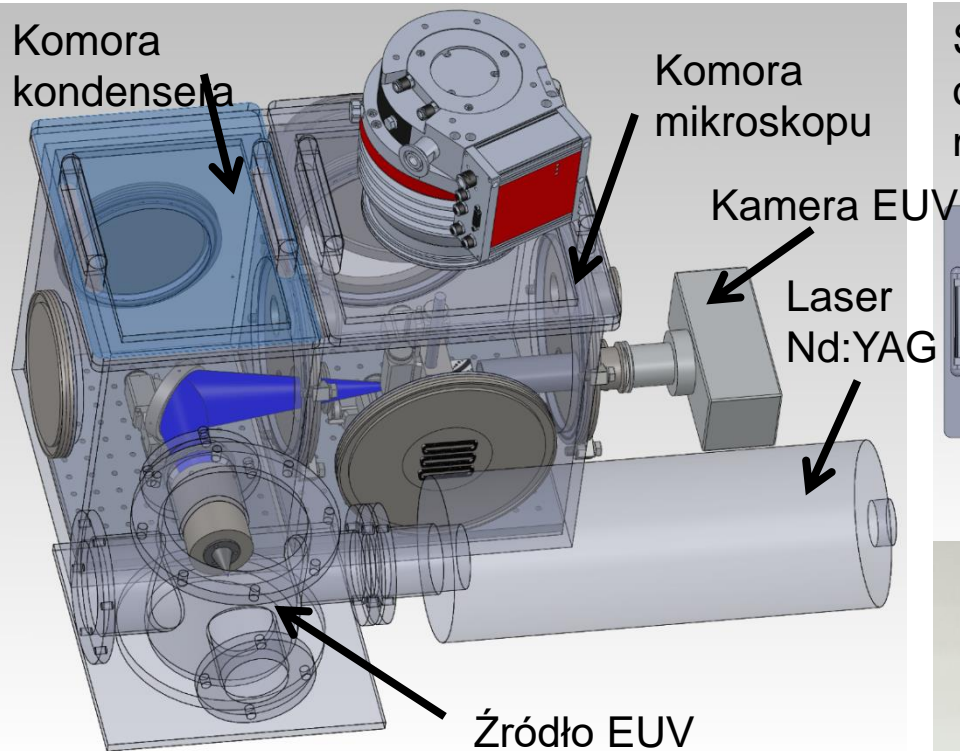
Obraz z mikroskopu w zakresie widzialnym

P. Wachulak et al., Radiation Physics and Chemistry 93 (2013) 54–58



Otwór 300nm
165nm

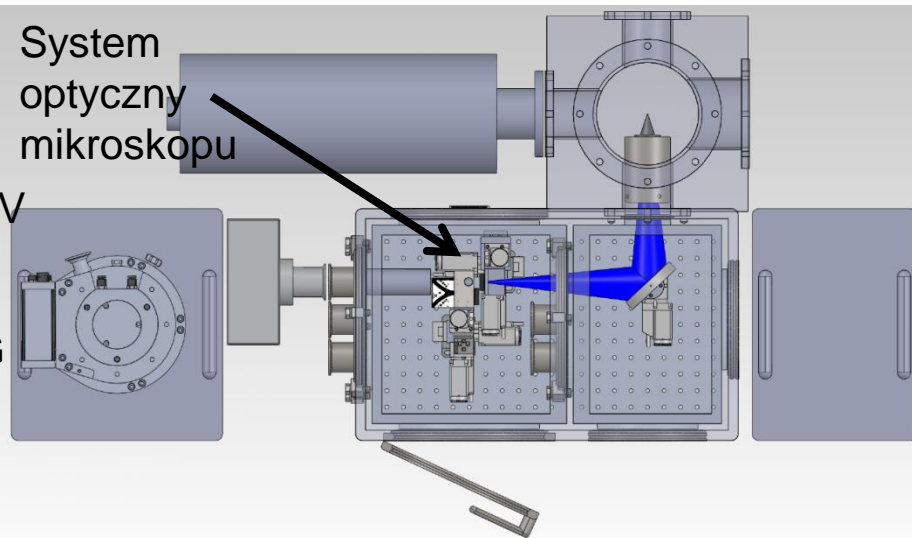
Komercjalizacja???



Wizualizacja 3-D mikroskopu na zakres EUV

Narodowe Centrum Badań i
Rozwoju, projekt LIDER #
LIDER/004/410/L-
4/12/NCBR/2013

<http://www.ztl.wat.edu.pl/zoplzm/lider/>



Zdjęcie mikroskopu
na zakres EUV –
aktualne prace



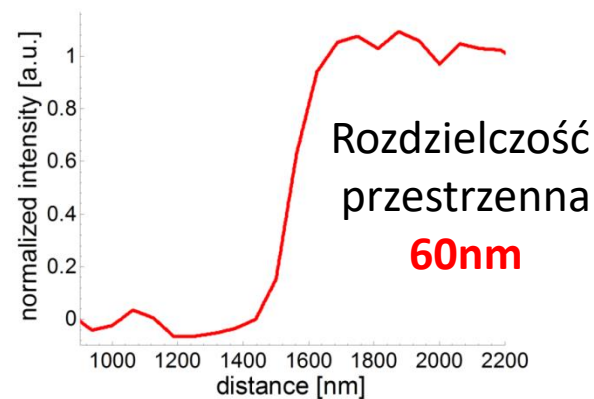
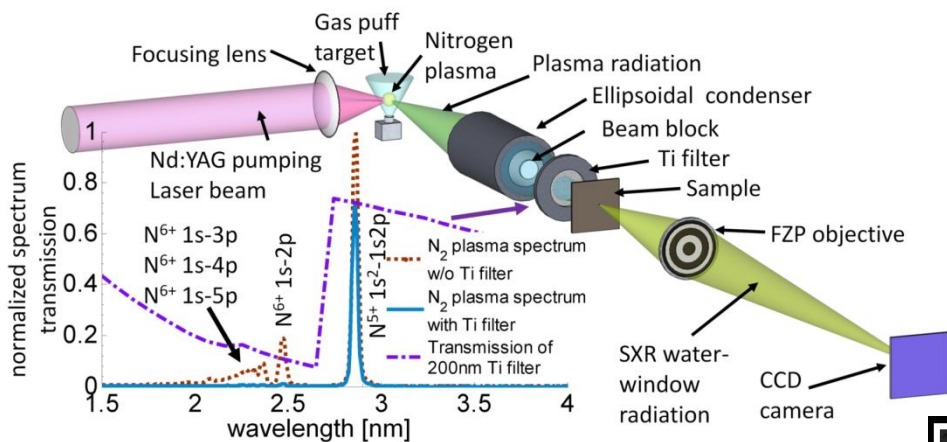
LIDER 2012 Mikroskop EUV

Realizacja projektu została
sfinansowana przez



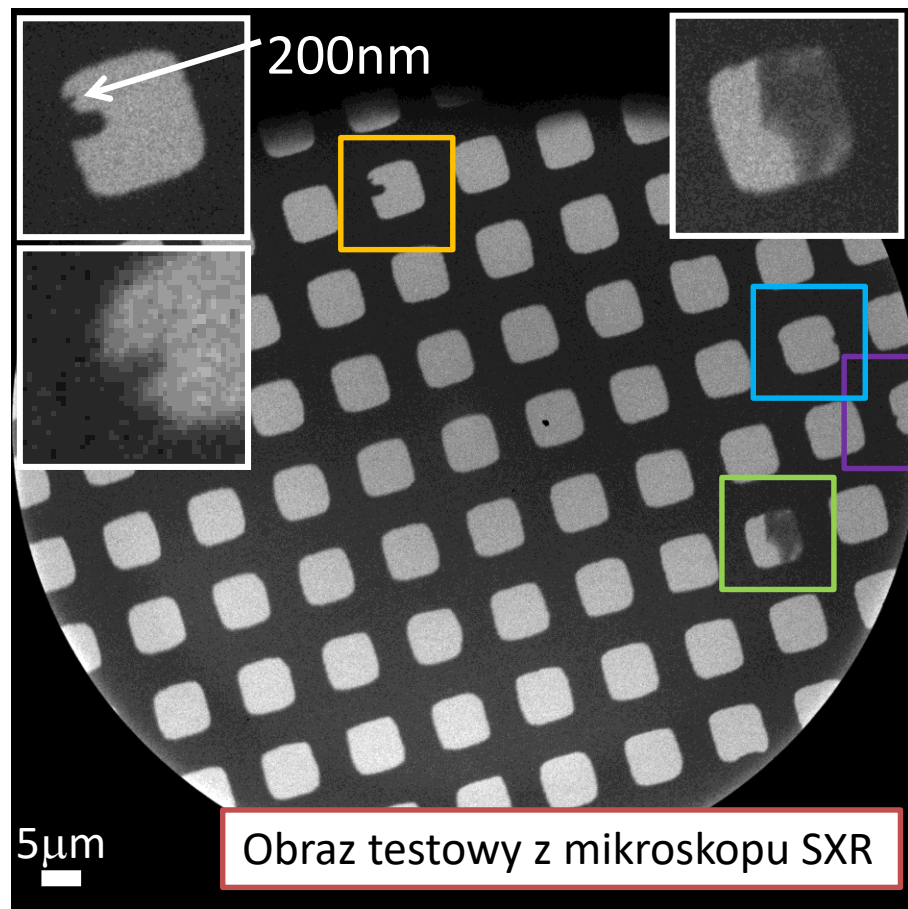
Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Mikroskopia SXR w zakresie „okna wodnego”

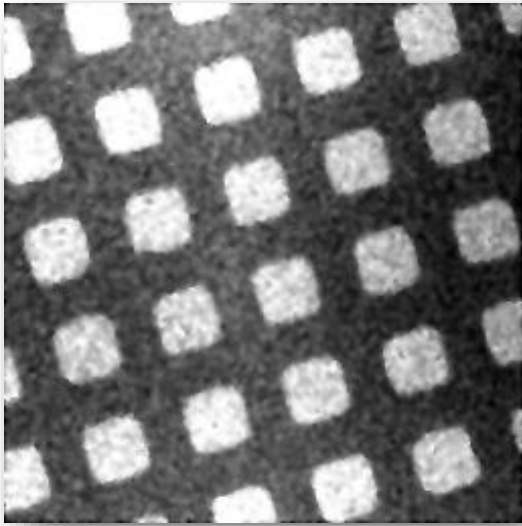


Schemat mikroskopu SXR oraz widmo emisji źródła

Obraz z mikroskopu na zakres widzialny
Obiektyw 40x, NA=0.7



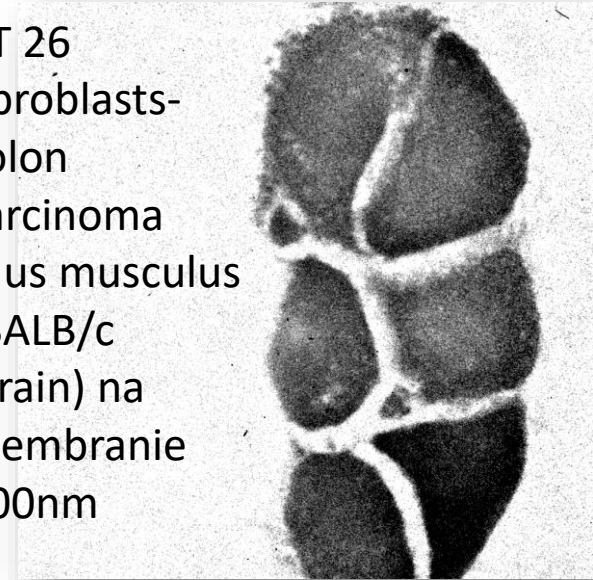
Zastosowania mikroskopii w zakresie „okna wodnego”



Obraz SXR z rozdzielczością czasową 3ns i przestrzenną ~250-300nm

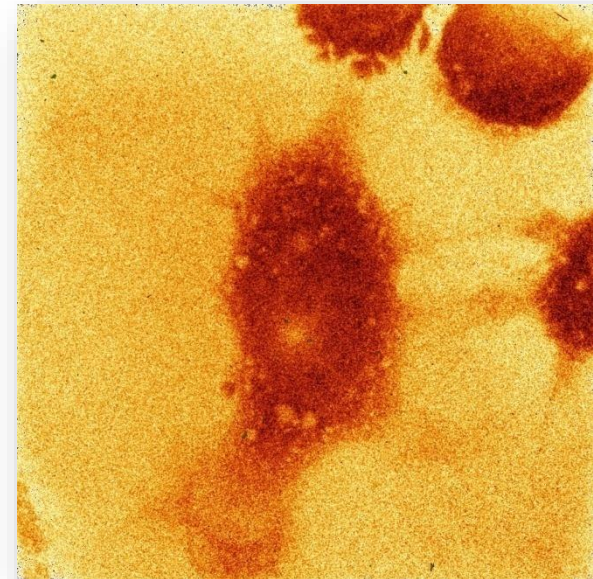
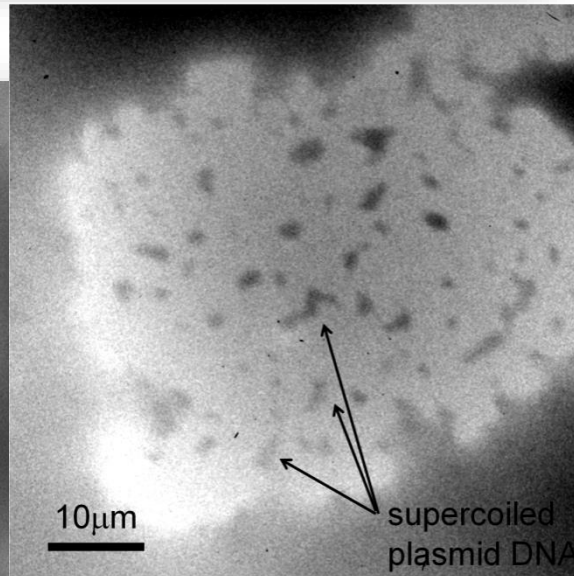


CT 26 fibroblasts-colon carcinoma Mus musculus (BALB/c strain) na membranie 100nm



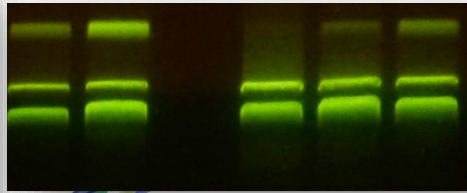
Supercoiled pBR322 DNA (4361bp)-circular double-stranded DNA z firmy Inspiralis, UK, 100ng/ μ l na membranie Si_3N_4 50nm,

Grubość warstwy ~160nm

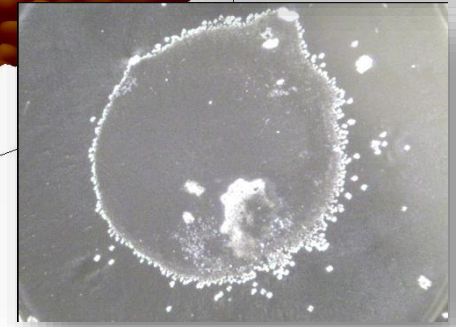
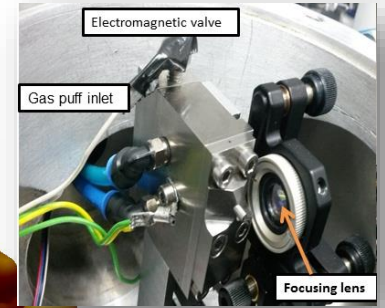
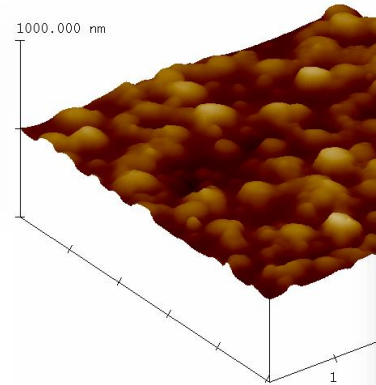


Czym się również zajmujemy?

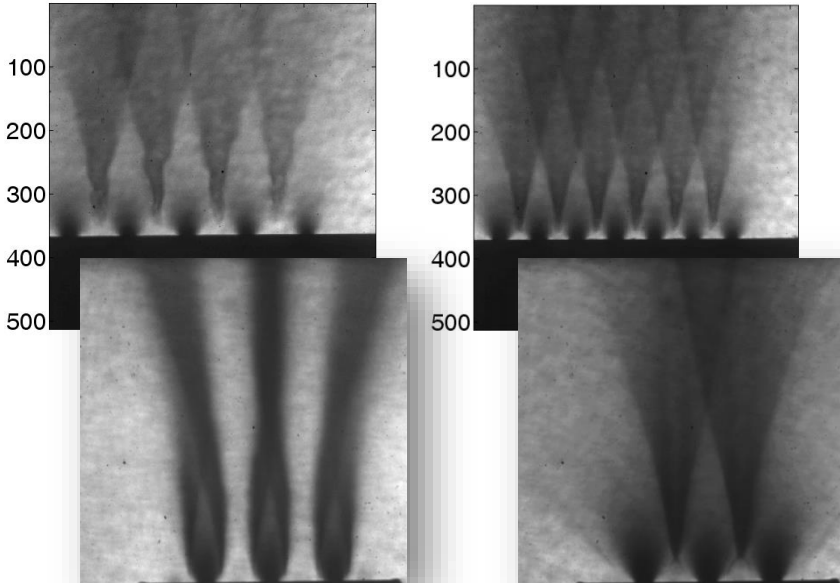
Radiobiologia



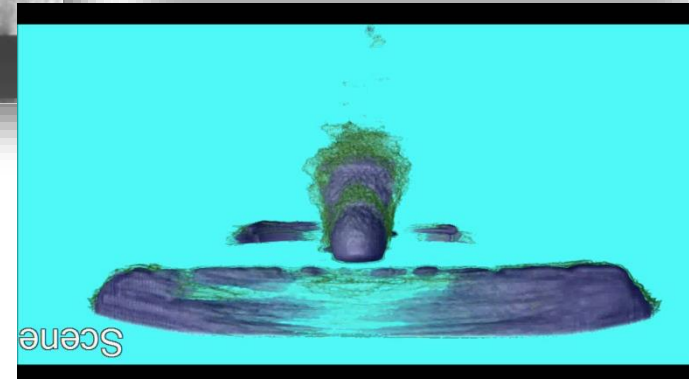
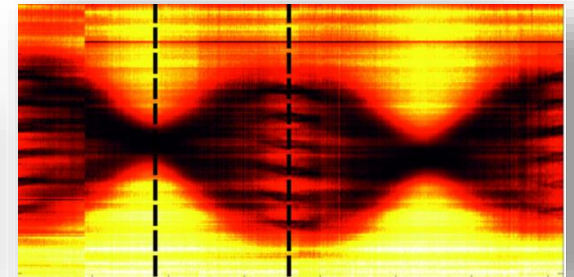
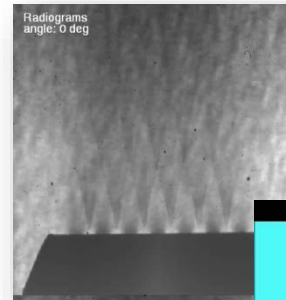
Mikroskopia kontaktowa



Rentgenografia impulsowa EUV



Tomografia EUV



Podziękowania



Laser Matter Interaction Laboratory
(Zespół Oddziaływania Promieniowania Laserowego z Materią)
<http://www.ztl.wat.edu.pl/zoplzm/>

D. Adjei	T. Fok	M. Szczurek
M. G. Ayele	R. Jarocki	A. Torrisi
A. Bartnik	J. Kostecki	I. Ul Ahad
H. Fiedorowicz	A. Szczurek	L. Wegrzynski



Czech Technical University w Pradze, Czechy
M. F. Nawaz, A. Janczarek, J. Limpouch,
S. Vondrova, J. Turnova, P. Bruza, D. Panek



Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk,
Warszawa, Polska
A. Baranowska-Korczync, D. Elbaum, K. Fronc



Rigaku, Inc. L. Pina
www.rigaku.com



Astronomical Institute of the ASCR, v.v.i.
i Czech Technical Univ. w Pradze
R. Hudec

H. T. Kim and S. Ch. Jeon



Colorado
University of Colorado at Boulder

Engineering Research Center, Colorado
State University, University of
Wisconsin, Colorado University, JILA,
Los Alamon National Laboratory, USA,

greateyes M. Regehly
Greateyes, GmbH, Germany



M. Marconi, C. Menoni, J. Rocca, R.
Bartels, A. Isoyan, R. Sandberg, M.
Murnane, H. Kapteyn



Finansowanie:

- Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, LIDER IV edycja, # LIDER/004/410/L-4/12/NCBR/2013
- Narodowe Centrum Nauki, projekt nr DEC-2011/03/D/ST2/00296
- Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, program Homing, projekt nr HOM/2009/14B
- EC's 7. Framework Program LASERLAB-EUROPE III



