

Od polerowanych "kamieni" do sub-Å: historia oraz nowoczesne metody obrazowania z wysoką rozdzielczością przestrzenną.

Przemysław W. Wachulak

Instytut Optoelektroniki Wojskowa Akademia Techniczna wachulak@gmail.com



Światło towarzyszy ludziom od zawsze. Zmysł wzroku dostarcza nam najwięcej informacji o otaczającym świecie.

Zakres widzialny: długość fali 400-700 nm Obraz

Obrazowanie – wytwarzanie obrazów obiektów.

 uzyskanie nowej lub rozszerzonej informacji o obiekcie badanym, której nie można uzyskać wskutek bezpośredniej obserwacji
 inny zakres spektralny widma e-m –

odmienne własności materii inne nośniki informacji (elektrony, jony)



60% kory mózgowej uczestniczy w percepcji i interpretacji bodźców wzrokowych

< 3000BC - Polerowane kamienie do skupiania światła i powiększania obiektów







Szkło



Soczewka z Nimrud – 750-710 r. p.n.e. Średnica 38mm Grubość 23mm f=12cm, M=3x Kwarc, znaleziona w Nimrud, Irak

- surowiec piasek kwarcowy
- naturalne pochodzenie: uderzenia meteorytów, procesy wulkaniczne,
- Mezopotamia 2500-1500 r. p.n.e.
- fabryka szkła w Egipcie 1250 r. p. n.e.



Soczewka z Nimrud w British Museum

Refrakcja – pojedyncze soczewki



- II w.p.n.e. Klaudiusz Ptolemeusz opisuje gałąź, która wydaje się "skrzywiona" w pojemniku z wodą i dokładnie zapisuje kąty padania i ugięcia z dokładnością do 0.5°.
 - I w.n.e. Seneka Młodszy pisze: "litery, pomimo, iż małe i niewidoczne widziane są powiększone poprzez kulę ze szkła wypełnioną wodą"
- Ibn al-Haytham, "Book of Optics" 1021 r.n.e., prekursor do pierwszych okularów w XIII w. we Włoszech, we Florencji 1270 r.





Tommaso da Modena - 1352r.

Conrad von Soest – 1403r.

Układy wielosoczewkowe

1590r. - Hans and Zacharias Janssen Pierwszy mikroskop w układzie dwóch soczewek, powiększenie 9x





Prawo refrakcji -1621r., Willebrord Snellius (Snell) odkryte ponownie po Ibn Sahl'u – 984r., Bagdad



1609r. Galileusz – mikroskop z soczewką wypuklą i wklęsłą

1624r. – układ trójsoczewkowy Trzy soczewki dwuwypukłe, powiększenie około 30x





1665r. – Robert Hooke "Micrographia", pozwalał na obserwację komórek, powiększenie oszacowano na kilkadziesiąt x



1674r. – Anton van Leeuwenhoek –pierwsze obrazy bakterii, struktura kości i mięśni, krwinki czerwone, bakterie, orzęski, itp.



Trinacria, rozmiar ok. 100µm

mikroskop Zeiss'a 1879 r.



1868- 1878 r. – Ernst Abbe – pionierskie prace dotyczące nowoczesnej mikroskopii,

Rozdzielczość dyfrakcyjna



Nowoczesny mikroskop na zakres widzialny (ograniczony dyfrakcyjnie)

> komórki 1-100µm wirusy 100nm białka 10nm cząsteczki złożone 1nm

λ=500nm, NA=1, d= λ/2=250nm Immersyjny NA=1.3 d~ λ/2.6~190nm

Rodzaje mikroskopów na zakres widzialny

- fluorescencyjny (Siedentopf, 1903r.)
- z kontrastem fazowym (Zernike , ~1930r., Nobel 1953r.)
- Nomarskiego (z kontrastem interferencyjnym DIC) (Nomarski, 1952 r.)
- konfokalny (Minsky, 1957r.)

- STED (STimulated Emission Depletion), (Hell, Wichmann, 1994r., Nobel

2014r.) – superrozdzielczość **~50nm** w zakresie widzialnym (λ /10)







Z kontrastem fazowym

Konfokalny

Pełnego pola

STED

Widmo elektromagnetyczne



 fotony- krótsza długość fali λ – wyższa rozdzielczość przestrzenna



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



Extreme Ultraviolet (EUV)

 – skrajny nadfiolet
 λ~10-100nm, Eph~10-120eV
 Soft X-rays (SXR)

 miękkie promieniowanie rentgenowskie

 λ~kilka Å-10nm, Eph~120 - kilka keV

Water window – "okno wodne" 284 - 543 eV, λ = 2.3 – 4.4 nm

• bardzo wysoki kontrast optyczny pomiędzy materiałem organicznym (węgiel) i wodą

Nanoholografia Gabora



holos = całość, grapho = piszę

Obrazowanie dyfrakcyjne - bezsoczewkowe



Yukio Takahashi, SPIE Newsroom, 10.1117/2.1201309.005099

Krystalografia

- metoda obrazowania dyfrakcyjnego
- dyfrakcja na periodycznych strukturach kryształach
- możliwość obrazowania białek, częsteczek, sieci krystalicznych,
- rozdzielczość pojedyncze Å –
- 1.6 Å Tenboer et al. Science 346, 6214, 1242-1246 (2014)

Krystaliczna próbka Sygnał dużo większy od periodycznych struktur

Źródło

Obraz dyfrakcyjny





1895r. – Roentgen – odkrycie promieni

X, Max von Laue – propagacja promieni

https://www.jic.ac.uk/staff/david-lawson/xtallog/summary.htm

Mikroskopia EUV, λ=13.84 nm

William Lawrence Bragg – 1940r., pierwsze użyteczne obrazy w zakresie X Paul Kirkpatrick – 1947-1949r., mikroskopy na zakres X na bazie optyki zwierciadlanej – rozdzielczość gorsza niż optycznych Sterling Newberry – 1950r., mikroskopia projekcyjna w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego Albert Baez – 1960r. – zaproponował soczewki Fresnela jako wysokorozdzielcze obiektywy Janos Kirz – 1982r. Pierwszy mikroskop skaningowy na zakres rentgenowski (synchrotron)



Lampa EUV/SXR do metrologii – bazująca na podwójnej tarczy gazowej, prof. H. Fiedorowicz, dr A. Bartnik, dr R. Jarocki, dr J. Kostecki, dr M. Szczurek, IOE WAT





 e_{j} , e_{j

P. W. Wachulak, A. Bartnik, et al., Optics Expresss 19, 10, 9541 (2011)



Zastosowania: Obrazowanie nanostruktur: nanowłókna ZnO

P. Wachulak, A. Bartnik, et al., Applied Physics B (2015), DOI 10.1007/s00340-015-6044-x

Tomografia rentgenowska

τόμος *tomos*, "slice, section" and γράφω *graphō*, "to write," 1953r. – B. Pollak - planography

Trójwymiarowa rekonstrukcja Rozdzielczość **~130nm**

M. Bertilson et al., Optics Express 17, 13, 11057 (2009)

Ptychografia – wysokorozdzielcza skaningowa mikroskopia dyfrakcyjna

"Advanced Light Source Sets Microscopy Record" (2014) – 5nm

http://newscenter.lbl.gov/2014/09/10/ advanced-light-source-sets-microscopy-record/ Obrazowanie ptychograficzne – połączenie technik obrazowania dyfrakcyjnego i skaningowej mikroskopii transmisyjnej -Rozdzielczość możliwa do uzyskania z nadpróbkowanego zbioru danych

- wysoka rozdzielczość (dla HXR ~5-20nm)
- dla obiektów testowych,
- brak optyki
- kontrast fazowy

- Wady:
- trudna rekonstrukcja

Algorytm e-PIE. siatka 6x6, rozmiar wiązki D=80 pix, 8 pętli.

Skaningowa Mikroskopia Tunelowa STM

1982r. Gerd Binning, Heinrich Rohrer – skaningowy mikroskop tunelowy, Nobel 1986r.

Mikroskopia elektronowa

1926r. – Hans Busch – soczewka elektromagnetyczna1931r. - Ernst Ruska, Maks Knoll – prototypowy mikroskop elektronowy

Rozdzielczość mikroskopu: wiązka elektronowa – 1.2 nm (dla 30 kV), Konkurencja: JEOL JSM-7610F @30kV – 8Å

Transmisyjny mikroskop elektronowy TEM JEM-ARM300F, JEOL

5

Rekordowa rozdzielczość w komercyjnych TEM - 0.63Å

http://www.jeolusa.com

B. Korczyc, J. Kostecki, IOE 2012

O'Keefe, M.A. et al. Ultramicroscopy 89, 4: (2001) 215-241.

rozdzielczość: 0.78Å

LiCoO₂ z baterii litowej obrazujący położenie atomów

Shao-Horn,Y., et al., Nature Mat. 2, (2003) 464-467

nanocząstka złota: kolumny atomów (białe kropki), cząstka ~70Å

O'Keefe, M.A., et al., Microscopy & Microanalysis 9, 2: (2003) 278-279

"A million-volt field emission TEM microscope" Akira Tonomura, Hitachi, napięcie przyspieszające 1MV (zazwyczaj 300kV) rozdzielczość 0.5Å

T. Kawasaki et al., App. Phys. Lett. 76, 1342, 2000.

Inne techniki obrazowania

Obrazowanie projekcyjne

Rozdzielczość ~rozmiaru źródła Rekord (2013) **4.3nm**

F. Döring, et al., Optics Express 21, 16, 19311 (2013) image

1987r. - Magnetic Force Microscopy (MFM) Odmiana AFM – wykrywa oddziaływania magnetyczne pomiędzy namagnesowaną sondą, a badaną próbką

Kamera obscura – kamera "otworkowa"

- Grecja, Chiny 300 400 r. p.n.e.
- Arystoteles 330 r.p.n.e.
- Euklides 300 r.p.n.e.
- Ibn al-Haytham, 1021 r.n.e.
 Rozdzielczość przestrzenna = kilkadziesiąt μm

Mikroskopia sił magnetycznych MFM

Rozdzielczość przestrzenna – dziesiątki nm

Prof. Ladislav Pina, Czech Technical University, Rigaku (2011)

długość Plancka T 1.62x10⁻³⁵m

Podziękowania

| | | • | | | | |
|--|---|---|--|---|--|--|
| LMI La (Z ht | iser Matter Interaction espół Oddziaływania F <u>tp://www.ztl.wat.edu</u> | n Laboratory Promieniowania Laserowego z Mater . <u>pl/zoplzm/</u> | D. Adjei rią) M. G. Ayele A. Bartnik H. Fiedorowicz | T. Fok R. Jarocki J. Kostecki A. Szczurek | M. Szczurek A. Torrisi I. UI Ahad L. Wegrzynski | |
| A B | Czech Technical Univ M. F. Nawaz, A. Janc S. Vondrova, J. Turno | ical University w Pradze, Czechy A. Janczarek, J. Limpouch, J. Turnova, P. Bruza, D. Panek | | | | |
| Q Rige | Rigaku, In | C. L. Pina | stronomical Institut | e of the ASCR | ., v.v.i. | |
| H. T. Kim and S. C. | Dzięku | ję serdecznie | za uw | agę | | |
| Colorado State University | Los Alamos | Colorado iversity of Colorado at Boulder Engineering Research Center Colo | Greateyes, | GmbH, Germ | legehly any | |
| EUV A Mild Expressing Research Conce THE UNIVERSITY | | State University, University of Wisconsin, Colorado University, JIL Los Alamon National Laboratory, L | M. Marco A, Bartels, A JSA, Mu | M. Marconi, C. Menoni, J. Rocca, R. Bartels, A. Isoyan, R. Sandberg, M. Murnane, H. Kapteyn | | |
| WISCONS MARISON | IN | 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 Eundacia na rzecz Nauki Polskiej, program Homing, projekt nr HOM/2000/14P | | | | | | |
| •EC's 7. Framework Program LASERLAB-EUROPE II. III. COST Action | | | | | | |
| +**. | | | | | | |

Laserlab Europe Fundacja na rzecz Nauki Polskiej

O W E U M Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Physics Today 53(6), 9 (2000); doi: 10.1063/1.2405472 Odnośniki literaturowe PRL 102, 096101 (2009) Eur. Phys. J. D 21, 167-179 (2002) (niewspomniane w prezentacii) Brief History of Imaging Technology, April 2013, v28 Tim Vitale © 2000-2013 The Development of Fluorescence Microscopy, Barry R Masters, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA A History of Imaging: Revisiting the Past to Chart the Future, Joseph N. Mait, www.osa-opn.org Sub-Ångstrom Electron Microscopy for Sub-Ångstrom Nano-Metrology, Michael A. O'Keefe and Lawrence F. Allard, National Nanotechnology Initiative Workshop on Instrumentation and Metrology for Nanotechnology, Gaithersburg, MD (2004) http://www.history-of-the-microscope.org/microscope-history-timeline-design-development-inventions.php OPTICS LETTERS, Vol. 19, No. 11, 1994 SCIENTIFIC REPORTS | 4 : 3857 | DOI: 10.1038/srep03857 Acta Cryst. (1969). A25, 495 High-Resolution Scanning X-ray Diffraction Microscopy, Pierre Thibault, SCIENCE VOL 321 (2008) PRL 103, 110801 (2009) OPTICAL SYSTEMS FOR SOFT X RAYS, Alan G. Michette, King's College London, England, PLENUM PRESS • NEW YORK AND LONDON, 1986 X-ray Microscopes, by Malcolm R. Howells, Janos Kirz and David Sayre, SCIENTIFIC AMERICAN February 1991, p. 88 http://www.softicons.com/object-icons/free-crystal-icons-by-aha-soft/amber-icon http://www.history-of-the-microscope.org/microscope-history-timeline-design-development-inventions.php http://bolvan.ph.utexas.edu/~vadim/Classes/2014f/Optics.html http://lensonleeuwenhoek.net/content/galileos-microscope "Sketchbook on military art, including geometry, fortifications, artillery, https://en.wikipedia.org/wiki/Nimrud lens mechanics, and pyrotechnics,, https://en.wikipedia.org/wiki/File:FluorescentCells.jpg http://www.microscopyhttps://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroskop si%C5%82 atomowych uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopyhttp://www.nanoscience.de/HTML/methods/stm.html uk.org.uk/mag/artjul07/hl-loncke2.html http://journals.iucr.org/a/issues/1969/04/00/issconts.html https://en.wikipedia.org/wiki/Protein http://newscenter.lbl.gov/2014/09/10/advanced-light-source-sets-microscopy-record/ http://www.providence.va.gov/research/Genomics Laboratory.asp https://en.wikipedia.org/wiki/Ptychography https://en.wikipedia.org/wiki/10 picometres http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/guantum/debrog2.html https://en.wikipedia.org/wiki/Protein http://www.uic.edu/classes/phys/phys461/phys450/MARKO/N003.html http://jmicro.oxfordjournals.org/content/47/5/395.short?rss=1&ssource=mfc http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Electron microscope https://en.wikipedia.org/wiki/File:Electron Microscope.png http://www.sci.sdsu.edu/emfacility/555class/class1.html http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/TransmissionElectronMicroscopes(TEM)/300kV/JEM-ARM300F/tabid/1302/Default.aspx http://www.ou.edu/research/electron/bmz5364/resolutn.html http://hypertextbook.com/facts/2000/IlyaSherman.shtml http://dberard.com/home-built-stm/ http://www.2spi.com/catalog/new/hopgsub.php http://www.personal.psu.edu/ewh10/ResearchBackground.htm http://www.vanderbilt.edu/AnS/physics/courses/F00/Phys110a 02/chapter2/ https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction limit https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence microscope