

Załącznik nr 2
Autoreferat w języku polskim

Spis treści

Cirriculum Vitae.....	2
Przebieg pracy naukowej	6
Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora.....	6
Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.....	7
Cykl publikacji naukowych pod zbiorowym tytułem „Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu i miękkiego promieniowania rentgenowskiego widma elektromagnetycznego”	10
Wprowadzenie	10
Lista prac włączonych do cyklu publikacji	10
Opis wkładu habilitanta do rozwoju dziedziny	11
1R. Kompaktowy układ do mikroskopii dyfrakcyjnej o dużej aperturze numerycznej i rozdzielczości 70 nm.....	14
2R. Litografia z wykorzystaniem efektu Talbota; samoobrazowanie skomplikowanych struktur.	16
3R. Obrazowanie nanostruktur z nanometrową rozdzielczością przestrzenną i nanosekundową rozdzielczością czasową w zakresie skrajnego nadfioletu.....	18
4R. Mikroskopia masek litograficznych na zakres skrajnego nadfioletu przy użyciu kompaktowego lasera emitującego na długości fali 13.2nm.	20
5R. Kompaktowe, quasi-monochromatyczne laserowo-plamowe źródło promieniowania EUV, bazujące na dwustrumieniowej tarczy gazowej, emitujące promieniowanie o dł. fali 13.8nm.	22
6R. Kompaktowe, laserowo-plazmowe źródła z zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego, oparte na tarczy gazowej.....	24
7R. Mikroskopia na dł. fali 13.8nm z rozdzielczością przestrzenną poniżej 70nm i użyciem laserowo-plazmowego źródła EUV.....	26
7R. Mikroskopia na dł. fali 13.8nm z rozdzielczością przestrzenną poniżej 70nm i użyciem laserowo-plazmowego źródła EUV.....	26
8R. Obrazowanie z nanometrową rozdzielczością przestrzenną przy użyciu laserowo-plazmowego źródła skrajnego nadfioletu EUV.	28
9R. Obrazowanie w zakresie EUV z rozdzielczością przestrzenną 50nm – wpływ grubości próbki i pasma emisji źródła na rozdzielczość przestrzenną.....	30
10R. Charakterystyka tarcz gazowych o wydłużonej geometrii, w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego, przeznaczonych do eksperymentów oddziaływania promieniowania laserowego z materią i generacji wyższych harmonicznych.	32
11R. Obrazowanie w skali nanometrowej z użyciem kompaktowych źródeł z zakresu skrajnego nadfioletu.	34
12R. Aspekty obrazowania w skali nanometrowej z użyciem laboratoryjnych źródeł z zakresu skrajnego nadfioletu (EUV).	36

Cirriculum Vitae

Dane personalne:

Przemysław Wojciech Wachulak
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Wykształcenie:

- Studia wyższe techniczne:
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, czerwiec 2004r. Średnia ze studiów 4.81/5.00. Tytuł pracy magisterskiej: „Generator parametryczny pobudzany wewnątrz rezonatora lasera neodymowego z Q-modulacją”, promotor: płk. dr inż. Waldemar Żendzian,
- Studia doktoranckie:
Uniwersytet Stanowy w Kolorado, Fort Collins, CO, USA, Wydział Elektryczny i Komputerowy, grudzień 2008r. Średnia ze studiów 3.94/4.00. Tytuł rozprawy doktorskiej: “Applications of extreme ultraviolet compact lasers to nanopatterning and high resolution holographic imaging”, promotor: Prof. Mario C. Marconi. Doktorat nostryfikowano jako doktor nauk technicznych w zakresie elektroniki z dniem 1 czerwca 2009r. na Politechnice Warszawskiej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych.

Miejsce zatrudnienia i stanowisko:

2004 - Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa
2005-2008 - Uniwersytet Stanowy w Kolorado, Fort Collins, CO, USA, graduate teaching assistant, graduate research assistant
2009-2011 - Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa, inżynier
2011-aktualnie - Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa, asystent

Doświadczenia naukowe zdobyte za granicą:

- 2010 - staż podoktorski (post-doc) na Uniwersytecie Stanowym w Kolorado, Fort Collins, CO, USA
- 2005-2008 - doktorat w Colorado State University, Fort Collins, CO, USA.
- 2003 - praktyka naukowa w Instytucie Maxa – Borna, Berlin, Niemcy,

Publikacje naukowe opisane w bazie:

- Web of Science: liczba publikacji: 63, liczba cytowań: 238, bez autocytowań: 161, H-index: 9
- Scopus: liczba publikacji: 62, liczba cytowań: 243, bez autocytowań: 168, H-index: 9
- Google Scholar: liczba publikacji: 80, liczba cytowań: 266, H-index: 10

Wykaz referatów zapraszanych:

1. P. W. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, A. Isoyan, R. L. Sandberg, L. Urbanski, R. A. Bartels, C. S. Menoni, J.J. Rocca and M. C. Marconi, „Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu z nanometrową rozdzielczością przestrzenną przy użyciu kompaktowych źródeł EUV typu table-top”, tytuł ang. „Nanometer spatial resolution imaging in the extreme ultraviolet using compact, table-top EUV sources”, Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, 13 października 2011
2. P. W. Wachulak, A. Isoyan, L. Urbanski, A. Bartnik, R. A. Bartels, C. S. Menoni, H. Fiedorowicz, J.J. Rocca and M. C. Marconi, “Nanometer scale imaging with table top extreme ultraviolet sources”, Konferencja X-ray and XUV Plasma sources and applications, Czech Technical University w Pradze, FNSPE – Dept. of Physical Electronics, Praga, Czechy, 24 listopad 2010,
3. P. W. Wachulak, R. Sandberg, A. Isoyan, F. Brizuela, L. Urbanski, A. Bartnik, M.C. Marconi, R. Bartels, C. S. Menoni, J. J. Rocca and H. Fiedorowicz, “Nanometer scale imaging with table top extreme ultraviolet sources”, konferencja 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference, Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Liptovský Ján, Słowacja, 6-10 wrzesień 2010
4. Przemysław W. Wachulak, Mario C. Marconi, Randy A. Bartels, Carmen S. Menoni, Jorge J. Rocca, “Nano-holografia z wykorzystaniem lasera skrajnego nadfioletu”, seminarium w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska, 3 listopad 2009
5. Przemysław W. Wachulak, Mario C. Marconi, Carmen S. Menoni, Jorge J. Rocca, “Zastosowanie lasera skrajnego nadfioletu do wytwarzania nanostruktur i holografii”, seminarium na Uniwersytecie Warszawskim, Instytut Geofizyki, Warszawa, Polska, 28 maj 2009
6. P. W. Wachulak, M. C. Marconi, R. A. Bartels, C. S. Menoni, and J. J. Rocca, “Sub-50nm extreme ultraviolet holographic imaging”, konferencja SPIE, Holography: Advances and Modern Trends, Praga, Czechy, 22 kwietnia 2009

Patenty:

- “Nanometer-scale lithography using extreme ultraviolet/soft x-ray laser interferometry”, Mario C. Marconi, Przemysław W. Wachulak, Carmen S. Menoni, Jorge J. Rocca, patent numer: US 7,705 332 B2, data: kwiecień 27, 2010.

Realizowane projekty badawcze:

- Program Fundacji na rzecz Nauki Polskiej HOMING 2009, HOM/2009/14B, tytuł projektu “Nanometer-Resolution Extreme Ultraviolet Imaging based on a gas puff target EUV source and Fresnel zone-plates”, Polska, 24 miesiące, przedłużony w 2011r. do 36 miesięcy, kierownik projektu i wykonawca
- Program Defense Threat Reduction Agency, HDTRA-1-08-10-BRCWMD-BAA, tytuł programu “New concepts in Nano-scale Chemical and Biological Sensing (Thrust 1)”, tytuł projektu “Single molecule detection for countering WMD using nano-mechanical resonator arrays”, USA, 36 miesięcy, wykonawca
- Grant numer 228 334, PRUE 31-146, “LASERLAB-EUROPE II– The Integrated Initiative of European Laser Research Infrastructures II”, Unia Europejska, 36 miesięcy, program ramowy Unii Europejskiej, wykonawca

- Grant numer 212 105, PRUE/31-322, “ELI – Extreme Light Infrastructure”, European Union, 36 miesięcy, program ramowy Unii Europejskiej, wykonawca
- Grant numer PBMN/36-562, narodowe dofinansowanie projektu międzynarodowego COST otrzymane z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, tytuł projektu “Lasero-plazmowe źródła promieniowania rentgenowskiego i skrajnego nadfioletu (EUV) do zastosowań w badaniach materiałowych, nanotechnologii i biomedycynie”, tytuł ang. “Laser-plasma based soft X-ray and extreme ultraviolet (EUV) sources for material science, nanotechnology and biomedicine applications”, Polska, 24 miesiące, wykonawca
- Projekt numer N N202 174939, PBG 537, z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, tytuł projektu “Oddziaływanie silnych impulsów skrajnego nadfioletu, wytwarzanych w lasero-plazmowym źródle promieniowania, z polimerami i dielektrykami nieorganicznymi: wpływ doświetlenia promieniowaniem laserowym na efektywność oddziaływania”, (tytuł ang. „Interactions of strong extreme ultraviolet pulses, generated by a laser-plasma source, with polymers and dielectrics: an influence of co-illumination with laser radiation on the effectiveness of interaction”, Polska, 24 miesiące, wykonawca

Projekty zakończone:

- Grant wewnętrzny Wojskowej Akademii Technicznej finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego numer PBW 08-662, tytuł projektu “Nanometer scale imaging in the EUV spectral range: applications of EUV microscope”, 12 miesięcy, kierownik projektu i wykonawca
- Grant habilitacyjny Wojskowej Akademii Technicznej, numer grantu GW-AD 16-857, Polska, 12 miesięcy, kierownik projektu i wykonawca
- Projekt Engineering Research Centers Program z National Science Foundation, numer projektu NSF EEC 0310717, USA, wykonawca
- Program NER, z National Science Foundation numer DMI-0508484, USA, wykonawca

Najważniejsze międzynarodowe i krajowe wyróżnienia wynikające z prowadzenia badań naukowych:

- nagroda za uzyskanie pierwszego miejsca w konkursie plakatowym dla młodego naukowca na konferencji Joint Final Conference of COST Actions IE0601 and MP0601, Centrum Naukowe Polskiej Akademii Nauk, Paryż, Francja, 14-18 listopada, 2011,
- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców w 2011 roku, październik 2011, http://www.nauka.gov.pl/fileadmin/user_upload/Finansowanie/finansowanie_nauki/Stypendia/20111003_STYPENDIA_2011.pdf
- grant w wysokości 250€ pokrycie kosztów podróży na International Workshop on X-ray Diagnostics and Scientific Application of the European XFEL, 14-17 lutego, 2010, Ryn, Polska,
- Laureat programu HOMING, edycja 2009- Subsydia dla powracających: http://www.fnp.org.pl/programy/aktualne_programy_fnp/stypendia_i_subsydia/program_powroty_homing/laureaci/laureaci/8, Warszawa, Polska, 2009,

- Brązowy medal za “Wkład do obronności kraju” od Ministra Obrony Narodowej, Warszawa, Polska, czerwiec 2009,
- 1-sze miejsce w konkursie na najlepszy plakat studencki na Colorado Photonics Industry Association, Boulder, CO, Stany Zjednoczone 2008r.
- Nagroda Research and Development 100 (R&D 100) prestiżowa, przyznawana od 47 lat nagroda dla firm i uniwersytetów za Extreme Ultraviolet Light Table-Top Microscope (EUVM-1), który okazał się ważnym wkładem w rozwój przemysłu i został ogłoszony jednym z najbardziej innowacyjnych pomysłów w 2008 roku. Wkład z Colorado State University: Fernando Brizuela, Courtney Brewer, Dale Martz, Michael Grisham, Scott Heinbuch, Przemysław Wachulak, Georgiy Vaschenko, Mario Marconi, Jorge Rocca, Carmen Menoni, z Center for X-Ray Optics oraz University of California, Berkeley: Weilun Chao, Erik Anderson, David Attwood, z P. N. Lebedev Physical Institute w Moskwie: Alexander Vinogradov, Igor Artyukov, z National Technical University Kharkov Polytechnical Inst.: Alexander Ponomarenko, Valeriy Kondratenko. Nagroda NSF numer EEC-0310717, link:
<http://www.rdmag.com/ShowPR.aspx?PUBCODE=014&ACCT=1400000101&ISSUE=0809&RELTYPE=A813&PRODCODE=00000000&PRODLETT=KJ&CommonCount=0>
- Nagroda za badania naukowe - Research Excellence Award otrzymana od Newport and The International Society for Optical Engineering SPIE, 27 sierpnia 2007r.
- 1-sze miejsce w konkursie na najlepszy plakat studencki na sympozjum American Vacuum Society (AVS), School of Mines, Golden, CO, Stany Zjednoczone 2006r.
- 3-cie miejsce w konkursie Prof. Smolińskiego na najlepszą pracę magisterską w 2003/2004 roku, Warszawa 2004r.
- Nagroda Rektora Uniwersytetu Wojskowego w Liptovsky Mikulas - płk. gst. prof. Ing. Michal Pruzinsky, CSc., dla najlepszego studenta Wojskowej Akademii Technicznej, Słowacja 2004r.
- Nagroda Prezydenta – Aleksandra Kwaśniewskiego dla najlepszego studenta Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 2004r.

Przebieg pracy naukowej

Przebieg pracy naukowej podzielono na dwa etapy: pierwszy - przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora, oraz drugi - po uzyskaniu stopnia naukowego doktora. Dla każdego etapu przedstawiono tematykę badań, w których zaangażowany był habilitant, oraz listę publikacji związanych z tą tematyką. Po kompletnej liście publikacji proszę jednak sięgnąć do Załącznika nr 4.

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

2004: Wojskowa Akademia Techniczna.

- Praca magisterska pod tytułem „Generator parametryczny pobudzany wewnątrz rezonatora lasera neodymowego z Q-modulacją”.
- Praca nad źródłem promieniowania krótkofalowego bazującego na cynie wykorzystującego strugę cieczy.
- Pomiar rozkładów przestrzennych i widmowych źródła krótkofalowego na 13.5nm bazującego na tarczy gazowej ksenonowo helowej.

Publikacje związane z powyższą tematyką:

1. “Metrology of Mo/Si multilayer mirrors at 13.5 nm with the use of a laser-produced plasma extreme ultraviolet (EUV) source based on a gas puff target”, R. Rakowski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, J. Krzywiński, J. Mikołajczyk, L. Pina, L. Ryc, M. Szczurek, H. Ticha, P. Wachulak, *Optica Applicata*, **36**, 4, (2006)
2. “High-repetition-rate, intracavity-pumped KTP OPO at 1572 nm”, Zendzian, W, Jabczynski, JK, Wachulak, P., et al., *Applied Physics B* **80** (3): 329-332 (2005)

2004-2008: Colorado State University.

- Wytwarzanie nanostruktur o rozmiarach poniżej 50 nanometrów z użyciem promieniowania krótkofalowego oraz litografii interferometrycznej.
- Holograficzne obrazowanie dwuwymiarowe z rozdzielczością poniżej 50 nanometrów oraz trójwymiarowe z rozdzielczością 200 nanometrów.
- Analiza numeryczna zrekonstruowanych obiektów z hologramów zarejestrowanych w zakresie EUV w celu uzyskania informacji na temat ich rozdzielczości i wielkości obrazowanych elementów bazująca na analizie korelacyjnej.
- Wytwarzanie urządzeń fotonicznych za pomocą interferometrii i promieniowania krótkofalowego w szkle fotoczułym.

Publikacje związane z powyższą tematyką:

3. “Nanoscale patterning in high resolution HSQ photoresist by interferometric lithography with table top EUV lasers”. P. W. Wachulak, M.G. Capeluto, M. C. Marconi, D. Patel, C. S. Menoni, J.J. Rocca. *Journal of Vacuum Science and Technology B* **25** (6), 2094, (2007), **również opublikowany w Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, December 24, 16, 26 (2007)**
4. “Volume extreme ultraviolet holographic imaging with numerical optical sectioning”. P. W. Wachulak, M.C. Marconi, R. A. Bartels, C. S. Menoni, J.J. Rocca. *Optics*

- Express **15**, 10622-10628, (2007).
5. "Patterning of nano-scale arrays by table top extreme ultraviolet laser interferometric lithography". P.W. Wachulak, M.G. Capeluto, M.C. Marconi, C.S. Menoni, J.J. Rocca. Optics Express, **15**, 6, 3465, (2007), paper referenced on main Optics Express website: <http://www.opticsinfobase.org/oe/issue.cfm?volume=15&issue=6>
 6. "Table Top Nanopatterning with Extreme Ultraviolet laser Illumination". M.G. Capeluto, P. Wachulak, M.C. Marconi, D. Patel, C.S. Menoni, J.J. Rocca, C. Iemmi, E.H. Anderson, W. Chao, D.T. Attwood. Microelectronics Engineering, **84**, 721–724, (2007)
 7. "Sub 400 nm spatial resolution extreme ultraviolet holography with a table top laser". P. W. Wachulak, R. A. Bartels, M. C. Marconi, C. S. Menoni, J.J. Rocca, Y. Lu, B. Parkinson. Optics Express **14**, 9636 (2006).
 8. "Interferometric lithography with an amplitude division interferometer and a desktop extreme ultraviolet laser". P. Wachulak, M. Grisham, D. Martz, S. Heinbuch, W. Rockward, D. Hill, J. Rocca, C.S. Menoni, E. Anderson, M.C. Marconi. JOSA B **25**, B104, (2008), **również opublikowany w The Virtual Journal for Biomedical Optics, 3, 8, (2008)**
 9. "Analysis of extreme ultraviolet microscopy images of patterned nanostructures based on a correlation method". P.W. Wachulak, C.A. Brewer, F. Brizuela, W. Chao, E. Anderson, R. A. Bartels, C.S. Menoni, J.J. Rocca, M.C. Marconi. Journal of the Optical Society of America B, **25**, B20, (2008), **również opublikowany w The Virtual Journal for Biomedical Optics, 3, 8, (2008)**
 10. "Soft x-ray laser holography with wavelength resolution", P. W. Wachulak, M.C. Marconi, R. A. Bartels, C. S. Menoni, J.J. Rocca, J. Opt. Soc. Am. B, **25**, 11, 1811 (2008)
 11. "Nanopatterning in a compact setup using table top extreme ultraviolet lasers", P. W. Wachulak, M.G. Capeluto, C. S. Menoni, J. J. Rocca, M. C. Marconi, Opto-electronics review **16**(4), 444–450, (2008)
 12. "New opportunities in interferometric lithography using extreme ultraviolet tabletop lasers", Przemysław W. Wachulak, Lukasz Urbanski, Maria G. Capeluto, David Hill, Willie S. Rockward, Claudio Iemmi, Erik H. Anderson, Carmen S. Menoni, Jorge J. Rocca, and Mario C. Marconi, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS **8**, 2, 021206 (2009)
 13. "Holographic imaging with a nanometer resolution using compact table-top EUV laser", P. W. Wachulak, M. C. Marconi, R. A. Bartels, C. S. Menoni, J. J. Rocca, Opto-electronics review **18**, 1, 28-38 (2010)
 14. "Extreme ultraviolet lithography with table top lasers", M.C. Marconi, P.W. Wachulak, Progress in Quantum Electronics **34**, 173–190 (2010), **artykuł zapraszany**

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

2010: Colorado State University.

- Czasowo-rozdzielcza holografia fourierowska w zakresie skrajnego nadfioletu,

2009- : Wojskowa Akademia Techniczna.

- Praca nad optymalizacją źródeł laserowo-plazmowych EUV i SXR opartych na tarczy gazowej: argonowego emitującego na dł. fali 13.8nm oraz azotowego emitującego na dł. fali 2.88nm w przedziale „okna wodnego”.

- Badanie rozdzielczości ekranów scyntylacyjnych: P43 i Ce:YAG
- Obrazowanie z nanometrową połówkową rozdzielczością przestrzenną 50nm przy użyciu płytek strefowych Fresnela i źródeł EUV, na dł. 13.8nm bazujących na tarczy gazowej.
- Badanie wpływu grubości próbek i pasma emisji źródła na rozdzielczość przestrzenną w mikroskopii EUV z użyciem płytek strefowych Fresnela.
- Obrazowanie gęstości tarcz gazowych o różnych geometriach (wydłużone, modulowane) przy użyciu metody rentgenografii impulsowej
- Mikroobróbka polimerów przy użyciu promieniowania EUV

Publikacje związane z powyższą tematyką:

1. “Nanometer-Scale Incoherent Imaging Using Laser-Plasma EUV Source”, P.W. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, J. Kostecki, Acta Physica Polonica A **121**, 2, 450-453 (2012)
2. “EUV-Induced Nanostructuring of Solids”, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, A. Szczurek, M. Szczurek and P. Wachulak, Acta Physica Polonica A **121**, 2, 445-449 (2012)
3. “Soft X-ray characterization of an elongated gas-puff target dedicated for laser-matter interaction experiments and high harmonic generation”, P.W. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B **276**, 1, 38-43, (2012) DOI information: 10.1016/j.nimb.2012.01.029
4. “Aspects of nanometer scale imaging with extreme ultraviolet (EUV) laboratory sources”, P. W. Wachulak, M. C. Marconi, A. Isoyan, L. Urbanski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. A. Bartels, Opto–Electron. Rev., **20**, 1, DOI: 10.2478/s11772-012-0008-z, (2012), **artykuł zapraszany**
5. “Demonstration of Nanomachining with Focused Extreme Ultraviolet Laser Beams”, Bravo, H. Szapiro, B. Wachulak, P. Marconi, M. Chao, W. Anderson, E. Menoni, C. Rocca, J., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, PP, 99, DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2158392, (2011)
6. “Efficient micromachining of poly(vinylidene fluoride) using a laser-plasma EUV source”, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, P. W. Wachulak, Applied Physics A: Materials Science and Processing, Online First, DOI: 10.1007/s00339-011-6662-z, (2011)
7. „Laser-plasma EUV source dedicated for surface processing of polymers”, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, P.W. Wachulak, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **647**, 125–131 (2011)
8. “A 50nm spatial resolution EUV imaging–resolution dependence on object thickness and illumination bandwidth”, Przemysław W. Wachulak, Andrzej Bartnik, Henryk Fiedorowicz, and Jerzy Kostecki, Optics Express **19**, 10, 9541–9550 (2011)
9. “Laser-produced plasma EUV source based on tin-rich, thin-layer targets”, R. Rakowski, J. Mikołajczyk, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, F. de Gaufridy de Dortan, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek and P. Wachulak, Applied Physics B **102**, 559-567, (2011)
10. “Characterization and optimization of the laser-produced plasma EUV source at 13.5nm based on a double-stream Xe/He gas puff target”, R.Rakowski, A.Bartnik,

- H.Fiedorowicz, F.deGaufridydeDortan, R.Jarocki, J.Kostecki, J.Mikołajczyk, L.Ryc, M.Szczurek, P.Wachulak, Applied Physics B, **101**, 773 (2010)
11. “Imaging and Patterning on Nanometer Scale Using Coherent EUV Light”, P.W. Wachulak, M.C. Marconi, C.S. Menoni, J.J. Rocca, H. Fiedorowicz and A. Bartnik, Acta Physica Polonica A, **117**, 2, (2010),
 12. “A compact, quasi-monochromatic laser-plasma EUV source based on a double-stream gas-puff target at 13.8 nm wavelength”, P. W. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, T. Feigl, R. Jarocki, J. Kostecki, R. Rakowski, P. Rudawski, M. Sawicka, M. Szczurek, A. Szczurek, Z. Zawadzki, Applied Physics B **100**, 3, 461-469, (2010)
 13. “Sub-70nm resolution table top microscopy at 13.8nm using a compact laser–plasma EUV source”, P. W. Wachulak, A. Bartnik and H. Fiedorowicz, Optics Letters **35**, 14, 2337-2339 (2010)
 14. ““Water window” compact, table-top laser plasma soft X-ray sources based on a gas puff target”, P.W. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, P. Rudawski, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **268**, 10, 1692-1700 (2010)

2008: Colorado State University.

- Mikroskopia dyfrakcyjna z rozdzielczością 70 nanometrów z użyciem kompaktowych źródeł krótkofalowych.
- Nanolitografia holograficzna i obrazowanie z użyciem efektu Talbota z rozdzielczością 100 nanometrów.
- Mikroskopia w zakresie skrajnego nadfioletu EUV z nanometrową połówkową rozdzielczością przestrzenną 54nm i nanosekundową rozdzielczością czasową 1ns z użyciem kompaktowego lasera EUV.
- Mikroskopia w zakresie skrajnego nadfioletu EUV – inspekcja masek EUV z nanometrową połówkową rozdzielczością przestrzenną 55nm w trybie odbiciowym z użyciem kompaktowego lasera EUV.

Publikacje związane z powyższą tematyką:

15. “High numerical aperture tabletop soft x-ray diffraction microscopy with 70 nm resolution”. R.L. Sandberg, C. Song, P.W. Wachulak, D.A. Raymondson, A. Paul, B. Amirbekian, E. Lee, A. Sakdinawat, C.L. Vorakiat, M.C. Marconi, C.S. Menoni, M.M. Murnane, J.J. Rocca, H.C. Kapteyn, J. Miao. Proceedings of the National Academy of Science, **105**, (1), 24-27, (2008)
16. “Single-shot extreme ultraviolet laser imaging of nanostructures with wavelength resolution”. C. A. Brewer, F. Brizuela, P. Wachulak, D. H. Martz, W. Chao, E.H. Anderson, D.T. Attwood, A. V. Vinogradov, I. A. Artyukov, A.G. Ponomareko, V.V. Kondratenko, M.C. Marconi, J.J. Rocca, C.S. Menoni. Optics Letters, **33**, 518, (2008), również opublikowany w **Virtual Journal for Biomedical Optics**, **3**, **4**, (2008) i w **Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology**, **17**, **15**, (2008)
17. “Microscopy of extreme ultraviolet lithography masks with 13.2 nm tabletop laser illumination”, F. Brizuela, Y. Wang, C. A. Brewer, F. Pedaci, W. Chao, E. H. Anderson, Y. Liu, K. A. Goldberg, P. Naulleau, P. Wachulak, M. C. Marconi, D. T. Attwood, J. J. Rocca, and C. S. Menoni, Opt. Lett. **34**, 271-273 (2009)
18. “Talbot lithography: Self-imaging of complex structures”, A. Isoyan, F. Jiang, Y. C. Cheng, F. Cerrina, P. Wachulak, L. Urbanski, J. Rocca, C. Menoni, and M. Marconi, Journal of Vacuum Science & Technology B, **27**, 6 , 2931-2937 (2009)

Cykl publikacji naukowych pod zbiorowym tytułem „Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu i miękkiego promieniowania rentgenowskiego widma elektromagnetycznego”

Wprowadzenie

Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu i miękkiego promieniowania rentgenowskiego, z wykorzystaniem kompaktowych, laboratoryjnych źródeł, stanowi cykl publikacji, zawierający 12 artykułów opublikowanych w latach 2008-2012. Prace te oparte są na badaniach przeprowadzonych przez habilitanta na Uniwersytecie Stanowym Kolorado, w Stanach Zjednoczonych oraz w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Poniżej przedstawiona jest lista publikacji. Dwie ostatnie pozycje stanowią artykuły zapraszane.

Lista prac włączonych do cyklu publikacji

- 1R.R.L. Sandberg, C. Song, **P.W. Wachulak**, D.A. Raymondson, A. Paul, B. Amirbekian, E. Lee, A. Sakdinawat, C.L. Vorakiat, M.C. Marconi, C.S. Menoni, M.M. Murnane, J.J. Rocca, H.C. Kapteyn, J. Miao, “High numerical aperture tabletop soft x-ray diffraction microscopy with 70 nm resolution”, *Proceedings of the National Academy of Science*, **105**, (1), 24-27, (2008), IF=9.77,
- 2R.A. Isoyan, F. Jiang, Y. C. Cheng, F. Cerrina, **P. Wachulak**, L. Urbanski, J. Rocca, C. Menoni, and M. Marconi, “Talbot lithography: Self-imaging of complex structures”, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **27**, 6, 2931-2937 (2009), IF=1.46
- 3R.C. A. Brewer, F. Brizuela, **P. Wachulak**, D. H. Martz, W. Chao, E.H. Anderson, D.T. Attwood, A. V. Vinogradov, I. A. Artyukov, A.G. Ponomareko, V.V. Kondratenko, M.C. Marconi, J.J. Rocca, C.S. Menoni, “Single-shot extreme ultraviolet laser imaging of nanostructures with wavelength resolution”, *Optics Letters*, **33**, 518, (2008), IF=3.32, this article was also published in *Virtual Journal for Biomedical Optics*, **3**, 4, (2008) and in *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*, **17**, 15, (2008)
- 4R.F. Brizuela, Y. Wang, C. A. Brewer, F. Pedaci, W. Chao, E. H. Anderson, Y. Liu, K. A. Goldberg, P. Naulleau, **P. Wachulak**, M. C. Marconi, D. T. Attwood, J. J. Rocca, and C. S. Menoni, “Microscopy of extreme ultraviolet lithography masks with 13.2 nm tabletop laser illumination”, *Opt. Lett.* **34**, 271-273 (2009), IF=3.32,
- 5R.**P. W. Wachulak**, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, T. Feigl, R. Jarocki, J. Kostecki, R. Rakowski, P. Rudawski, M. Sawicka, M. Szczurek, A. Szczurek, Z. Zawadzki, “A compact, quasi-monochromatic laser-plasma EUV source based on a double-stream gas-puff target at 13.8 nm wavelength”, *Applied Physics B* **100**, 3, 461-469, (2010), IF=2.24,
- 6R.**P.W. Wachulak**, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, P. Rudawski, R. Jarocki, J. Kostecki, M.

Szczurek, ““Water window” compact, table-top laser plasma soft X-ray sources based on a gas puff target”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 268, 10, 1692-1700 (2010), IF=1.04,

7R. **P. W. Wachulak**, A. Bartnik and H. Fiedorowicz, “Sub-70nm resolution table top microscopy at 13.8nm using a compact laser-plasma EUV source”, Optics Letters 35, 14, 2337-2339 (2010), IF=3.32,

8R. **P. W. Wachulak**, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, J. Kostecki, “Nanometer-scale incoherent imaging using laser-plasma EUV source”, Acta Physica Polonica A 121, 2, 450-453 (2012), IF=0.66,

9R. **P. W. Wachulak**, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, and J. Kostecki, “A 50nm spatial resolution EUV imaging-resolution dependence on object thickness and illumination bandwidth”, Optics Express 19, 10, 9541-9550 (2011), IF=3.75,

10R. **P.W. Wachulak**, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, “Soft X-ray characterization of an elongated gas-puff target dedicated for laser-matter interaction experiments and high harmonic generation”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B 276, 1, 38-43, (2012) DOI information: 10.1016/j.nimb.2012.01.029, IF=1.04,

Artykuły zapraszane:

11R. **P. W. Wachulak**, R. L. Sandberg, A. Isoyan, L. Urbanski, A. Bartnik, R. A. Bartels, C. S. Menoni, H. Fiedorowicz, J. J. Rocca and M. C. Marconi, "Nanometer scale imaging with table top extreme ultraviolet sources", Proc. SPIE 7746, 774609, doi:10.1117/12.880340, (2010),

12R. **P. W. Wachulak**, M. C. Marconi, A. Isoyan, L. Urbanski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. A. Bartels, “Aspects of nanometer scale imaging with extreme ultraviolet (EUV) laboratory sources”, Opto-Electron. Rev., 20, 1, DOI: 10.2478/s11772-012-0008-z, (2012), IF=1.17,

Sumaryczny IF=31.09

Opis wkładu habilitanta do rozwoju dziedziny

Wkład habilitanta do rozwoju technik obrazowania, z wykorzystaniem kompaktowych źródeł promieniowania z zakresu skrajnego nadfioletu i miękkiego promieniowania rentgenowskiego, został przedstawiony dokładniej w poniższych publikacjach. Celem cyklu jest zaprezentowanie i wykorzystanie nowych metod obrazowania w EUV/SXR, zaimplementowanych w kompaktowych układach wykorzystujących źródła promieniowania krótkofalowego.

Mikroskopowe metody optyczne pozwalają na obserwację obiektów o rozmiarach rzędu setek nanometrów z uwagi na dyfrakcyjne ograniczenie wynikające z długości fali promieniowania użytego w procesie obrazowania. Użycie promieniowania o długości fali od 10 do 100 razy krótszej pozwala w bezpośredni sposób poprawić rozdzielczość przestrzenną, uzyskaną w procesie obrazowania, co najmniej kilkukrotnie. Większość z przedstawionych

metod obrazowania w zakresie EUV/SXR pozwala na uzyskiwanie rozdzielczości przestrzennych lepszych niż 100nm, szybkich czasów ekspozycji i optycznego kontrastu w zakresie krótkofalowym, który pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o obiekcie. Główną zaletą przedstawionych metod, w porównaniu do szeroko stosowanej mikroskopii optycznej, jest więc poprawienie rozdzielczości przestrzennej.

Mikroskopia wykorzystująca wiązkę elektronów charakteryzuje się najlepszą rozdzielczością przestrzenną, która wynika z bardzo małej długości fali elektronów, użytych do obrazowania, rzędu 7pm dla elektronów przyspieszanych napięciem 30kV. Taka długość fali pozwala na obrazowanie w nowoczesnych mikroskopach elektronowych z rozdzielczością przestrzenną lepszą niż 1nm. Wykorzystanie elektronów, jako nośników informacji ma więc swoje oczywiste zalety, jednak posiada również wady, wynikające chociażby z innego rodzaju oddziaływania fotonów i elektronów z materią. Mikroskopia elektronowa pozwala zatem na uzyskanie komplementarnych informacji na temat samej próbki, ale prowadzi również często do zbyt silnego oddziaływania elektronów z próbką. Przedstawione metody, wykorzystujące promieniowanie EUV, pozwalają na obserwację bardzo delikatnych próbek, które

w przypadku użycia mikroskopii elektronowej mogą zostać zniszczone lub zaburzone poprzez wysokoenergetyczną wiązkę elektronów. Mikroskopia fotonowa w zakresie EUV/SXR pozwala również na obserwację próbek pokrytych fotorezystem czułym na ekspozycję wiązką elektronów, które nie mogą być obserwowane za pomocą mikroskopii elektronowej bez wpływu na właściwości fotorezystu. Zaletą jest również brak konieczności specjalnego przygotowywania próbek w przypadku mikroskopii EUV/SXR, koniecznego w przypadku innych technik obrazowania jak np. mikroskopia elektronowa, np. w celu odprowadzenia ładunków powierzchniowych.

Mikroskopia sił atomowych jest kolejną metodą obrazowania wykorzystującą sondy o bardzo małych rozmiarach przestrzennych, do skanowania powierzchni próbki z bardzo dużą dokładnością. Rozdzielczość tej metody jest również bardzo dobra; dla najlepszych sond wykorzystujących nanorurki węglowe, rozdzielczość wynosi kilka nm. Wadą tej metody jest jednak duża czułość na zanieczyszczenia sondy, objawiająca się znacznym pogorszeniem rozdzielczości przestrzennej i jakości obrazów. Metoda ta nie pozwala na obrazowanie w trybie transmisyjnym i pozwala jedynie na badanie samej powierzchni próbki.

Zazwyczaj do obrazowania w zakresie EUV i SXR wykorzystuje się źródła synchrotronowe, które oprócz swych ewidentnych zalet są jednak drogie w utrzymaniu, nie jest możliwe ich skomercjalizowanie i są trudno dostępne dla potencjalnego użytkownika. Motywem przewodnim cyklu jest demonstracja możliwości obrazowania za pomocą różnych technik, wykorzystujących kompaktowe źródła w postaci laserów EUV oraz źródła laserowo-plazmowe, które są zdecydowanie tańsze i dostępne dla szerszej rzeszy użytkowników, w obrazowaniu z wykorzystaniem różnych technik.

Metody obrazowania, przedstawione przez habilitanta, można ogólnie podzielić na wykorzystujące promieniowanie spójne i niespójne. Metody wykorzystujące promieniowanie spójne to: rekonstrukcja hologramów wygenerowanych komputerowo wytworzonych poprzez litografię wiązką elektronów i zrekonstruowanych w zakresie EUV, obrazowanie za pomocą efektu Talbota, obrazowanie dyfrakcyjne oraz mikroskopia wykorzystująca płytki strefowe Fresnela (aczkolwiek użycie w tym przypadku źródła spójnego prowadzi niekiedy do generowania artefaktów w obrazach obiektów). Do przeprowadzenia eksperymentów użyto lasera EUV typu capillary discharge, opracowanego i zbudowanego przez prof. Jorge Rocca z Uniwersytetu Stanowego w Kolorado. Metody wykorzystujące niespójne źródła promieniowania z zakresu EUV i SXR to przede wszystkim mikroskopia EUV z wykorzystaniem obiektywów w postaci wspomnianych płytek strefowych oraz cieniografia impulsowa. W tych eksperymentach wykorzystano laserowo-plazmowe źródło

promieniowania niespójnego z zakresu skrajnego nadfioletu, bazujące na podwójnej tarczy gazowej, opracowane i zbudowane w grupie prof. Henryka Fiedorowicza w Wojskowej Akademii Technicznej.

Przedstawione metody obrazowania w zakresie EUV/SXR są metodami komplementarnymi do istniejących, wspomnianych i najczęściej wykorzystywanych metod obrazowania. Dodatkowo każda z przedstawionych metod obrazowania w zakresie EUV/SXR posiada również swoje cechy charakterystyczne. Żadna nie jest idealna, ale może być wykorzystana w szczególnego rodzaju okolicznościach i do określonego celu. Metoda obrazowania dyfrakcyjnego [1R], z uwagi na możliwość stosowania jej w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego (skalowalność do mniejszych długości fali), może być wykorzystana do dyfrakcyjnego obrazowania niekryształicznych nanometrowych struktur. Metoda obrazowania holograficznego [11R] i obrazowania Talbota [2R] ma potencjalne zastosowanie w przemyśle półprzewodnikowym. Są to metody bezkontaktowe i niewymagające dodatkowych czynności związanych z maskami litograficznymi, takich jak inspekcja, czyszczenie. Dodatkowo, obie metody są nieczułe na drobne uszkodzenia samego hologramu lub też maski Talbota; do rekonstrukcji wymagana jest jedynie część hologramu, zaś samoobrazowanie Talbota dowolnych periodycznych struktur powoduje, iż drobny defekt w masce Talbota zostaje uśredniony w całym polu obrazowania. Mikroskopia w zakresie EUV z wykorzystaniem płytek strefowych Fresnela, przedstawiona w szeregu prac [3R i 7R-9R], znajdzie być może zastosowanie w biologii, materiałoznawstwie i nanotechnologii, do obrazowania obiektów z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Obrazowanie na długości fali 13.2nm, w pobliżu litograficznej długości fali 13.5nm, przedstawione w pracy [4R], ma potencjalne zastosowanie w przemyśle półprzewodnikowym do obrazowania defektów w maskach litograficznych. Praca nad źródłami z zakresu EUV [5R] już znalazła zastosowanie w konstrukcji kompaktowego układu do mikroskopii EUV, bazującego na podwójnej tarczy gazowej typu gas-puff, przedstawionego w pracach [7R-9R, 11R,12R]. Praca nad źródłami miękkiego promieniowania rentgenowskiego, przedstawiona w [6R], znajdzie zastosowanie w przyszłych badaniach habilitanta nad układem do mikroskopii SXR w zakresie tzw. „okna wodnego”. Obrazowanie tarcz gazowych, przedstawione w pracy [10R], rozpoczyna badania nad różnymi rodzajami tarcz. W przyszłości będą opracowane tarcze modulowane jedno- i dwustrumieniowe, a także tarcze w postaci klasterów, wytworzone przez schłodzenie gazu. Obrazowanie tego typu jest aktualnie wykorzystywane w naszej grupie do charakteryzacji i optymalizacji powyższych tarcz.

Należy dodać, iż sama idea obrazowania w zakresie EUV, w którym najcieńsza warstwa materiału, o grubości rzędu 100nm, potrafi zabsorbować całe promieniowanie, jest zadaniem trudnym, nowatorskim, budzącym zainteresowanie szerokich kręgów naukowych w kraju i za granicą.

Poniżej przedstawiono krótki przewodnik po publikacjach, stanowiących jednotematyczny cykl, będący osiągnięciem habilitanta i podstawą do habilitacji.

1R. Kompaktowy układ do mikroskopii dyfrakcyjnej o dużej aperturze numerycznej i rozdzielczości 70 nm.

Krystalografia rentgenowska jest obecnie jedną z głównych metod służących do określania trójwymiarowych struktur materiałów i makromolekuł. Wiele nanostruktur, materiałów i próbek biologicznych, nie przejawia jednak struktury krystalicznej, zatem metoda krystalografii rentgenowskiej nie jest w ich przypadku odpowiednia. Obrazowanie tych struktur wymaga zatem innego podejścia. Obiecującą techniką wydaje się być mikroskopia dyfrakcyjna (bezsoczewkowa), która jest obecnie przedmiotem badań w wielu ośrodkach na świecie. Polega ona na oświetlaniu badanej próbki wiązką promieniowania o wysokiej spójności przestrzennej i czasowej oraz na zarejestrowaniu nadpróbkowanego obrazu dyfrakcyjnego na detektorze w postaci kamery CCD, czulej na zakres skrajnego nadfioletu (EUV). Poprzez zastosowanie iteracyjnego, numerycznego algorytmu, który zastępuje optykę użytą w typowych eksperymentach obrazowania, następuje rekonstrukcja obiektu, od którego pochodzi zarejestrowany obraz dyfrakcyjny.

Eksperymenty związane z mikroskopią dyfrakcyjną stawiają wysokie wymagania na źródła promieniowania z zakresu skrajnego nadfioletu i promieniowania rentgenowskiego, w szczególności na spójność przestrzenną i czasową źródła. Zazwyczaj tego typu eksperymenty przeprowadza się wykorzystując wiązkę promieniowania spójnego pochodzącą z synchrotronów [1] lub laserów na swobodnych elektronach [2]. Powoduje to jednak dużą komplikację układu pomiarowego. Również niewspółmierny koszt utrzymania tego typu instalacji sprawia, iż wykorzystanie metody mikroskopii dyfrakcyjnej do tej pory było bardzo ograniczone.

W przedstawionej pracy [1R], a także w [3], gdzie zaprezentowano wyniki obrazowania dyfrakcyjnego z wykorzystaniem lasera EUV jako źródła, nowością jest użycie do mikroskopii dyfrakcyjnej promieniowania pochodzącego ze źródeł kompaktowych typu table-top: źródła bazującego na wyższych harmonicznym (HHG) promieniowania pompującego z lasera Ti:Sa (w zakresie długości ok. 29nm) oraz z lasera na zakres EUV, typu capillary discharge, generującego promieniowanie na dobrze zdefiniowanej długości fali wynoszącej 46.9nm. Nowością jest również zaimplementowanie algorytmu do korekcji krzywizny obrazu dyfrakcyjnego, co ma szczególne znaczenie przy aperturach numerycznych NA rejestrowanych obrazów, sięgających $NA=0.8$. Algorytm ten pozwala na rzutowanie płaskiego obrazu dyfrakcyjnego, rejestrowanego na kamerze CCD, na powierzchnię sfery o promieniu odpowiadającym odległości pomiędzy obiektem i kamerą. W rekonstrukcji fazy utraconej w procesie zapisu obrazu dyfrakcyjnego, użyto algorytmu typu Guided Hybrid Input Output Algorithm. Algorytm ten, w połączeniu z algorytmem genetycznym doboru, w procesie wielopokoleniowej rekonstrukcji, pozwolił na odzyskanie obrazu fazowego i całkowitej, wysokorozdzielczej rekonstrukcji rozkładu przestrzennego gęstości elektronowej, odpowiadającej użytemu obiektowi. Kolejną, ważną nowością, było także zwiększenie zakresu dynamicznego obrazu dyfrakcyjnego poprzez użycie przesłon o odpowiednich średnicach, maskujących centralną, najbardziej intensywną część obrazu dyfrakcyjnego. Następnie, poprzez numeryczne złożenie trzech obrazów dyfrakcyjnych i zapewnieniu warunków brzegowych zwiększono zakres dynamiczny obrazu dyfrakcyjnego z 5 do 10-12 rzędów wielkości.

[1] J. W. Miao, P. Charalambous, J. Kirz, D. Sayre, Nature 400, 342–344 (1999).

[2] H. N. Chapman, et al., Nat Phys 2, 839–843 (2006).

[3] R.L. Sandberg, **P.W. Wachulak**, D.A. Raymondson, A. Paul, A.E. Sakdinawat, B. Amirbekian, E. Lee, Y. Liu, C. La-O-Vorakiat, C. Song, M.C. Marconi, C.S. Menoni, M.M. Murnane, J.J. Rocca, H.C. Kapteyn, and J. Miao, Springer Proceedings in Physics 130, X-ray lasers 2008, Eds. Ciaran L.S. Lewis and Dave Riley, 433-437, (2008)

Wynikiem eksperymentu były rekonstrukcje obiektów z ich obrazów dyfrakcyjnych. Przy użyciu źródła HHG uzyskano rozdzielczość przestrzenną rekonstrukcji na poziomie 94nm, zaś dzięki laserowi capillary discharge rozdzielczość przestrzenna była jeszcze lepsza, ok. 71nm.

Habilitant był odpowiedzialny za przygotowanie, obsługę i zapewnienie odpowiednich warunków pracy lasera oraz zapewnienie odpowiednich parametrów wiązki, w szczególności pełnej spójności przestrzennej wiązki (poprzez wykonanie obliczeń i filtrów przestrzennych dla promieniowania z lasera typu capillary discharge). Zbadał również rozkład przestrzenny intensywności promieniowania w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiązki przy użyciu detektora w postaci cienkiej warstwy poli(metakrylanu metylu) (PMMA), naniesionego metodą spin-coating'u na powierzchnię krzemu. Detektor naświetlono wiązką EUV i wywołano. Dodatkowo, przygotował i wyjustował układ pomiarowy do mikroskopii dyfrakcyjnej, wykorzystując układ użyty w poprzednich badaniach z promieniowaniem pochodzącym ze źródła HHG. Habilitant wykonał również adaptacje konieczne przy zmianie źródła promieniowania oraz odpowiednie przesłony. Następnie, wspólnie z innymi Autorami, przeprowadził eksperyment polegający na sekwencyjnym zarejestrowaniu wielu obrazów dyfrakcyjnych z różnymi przesłonami. Z uwagi na różne średnice stosowanych przesłon, odpowiednie obrazy zarejestrowano dla różnej ilości impulsów z lasera EUV. Habilitant zarejestrował obrazy dla kilkunastu różnych obiektów, a następnie brał udział w próbnym rekonstrukcjach obiektów.

Ważnym wnioskiem z przedstawionej pracy jest możliwość obrazowania dyfrakcyjnego przy użyciu kompaktowych źródeł promieniowania krótkofalowego, w szczególności lasera EUV, z nanometrową rozdzielczością przestrzenną. Unikalne zalety, wynikające z charakterystyki promieniowania laserowego, uwidaczniają się w rozdzielczości przestrzennej rzędu 1.5λ uzyskanej w układzie pomiarowym, w całości mieszczącym się na pojedynczym stole optycznym. Układ tego typu z powodzeniem może zostać w przyszłości skomercjalizowany, a także nadaje się jako układ eksperymentalny, mogący zostać z powodzeniem zaimplementowany w laboratorium uniwersyteckim.

2R. Litografia z wykorzystaniem efektu Talbota; samoobrazowanie skomplikowanych struktur.

Przemysł półprzewodnikowy, poprzez miniaturyzację i zwiększenie gęstości upakowania, pozwala na zmniejszenie kosztów produkcji urządzeń półprzewodnikowych oraz zwiększenie ich szybkości, pojemności i funkcjonalności. Wraz z rozwojem miniaturyzacji, litografia optyczna (w zakresie widzialnym widma elektromagnetycznego oraz w zakresie ultrafioletu UV) spotka się z praktycznymi ograniczeniami, związanymi z długością fali promieniowania, w rezultacie czego nie będzie mogła nadażyć za prawem Moore'a i będzie musiała ustąpić metodzie, która wykorzystuje promieniowanie o krótszej długości fali z zakresu EUV.

Kompaktowych źródła spójnego promieniowania z zakresu skrajnego nadfioletu EUV, wykorzystywane w metodach interferometrycznych oraz przy obrazowaniu koherentnym, pozwalają na wytwarzanie nanostruktur na relatywnie dużych powierzchniach [4]. Połączenie technik litograficznych, użytych do wytwarzania masek, ze źródłami spójnego promieniowania EUV do oświetlania masek, pozwoli w przyszłości na obrazowanie bez użycia skomplikowanych systemów optycznych.

Nowością w przedstawionej pracy [2R] jest użycie źródła promieniowania spójnego EUV, w postaci lasera typu capillary discharge, opracowanego przez grupę prof. Jorge Rocca z Uniwersytetu Stanowego w Kolorado, generującego na długości fali 46.9nm, do oświetlania wcześniej wykonanych masek i zobrazowaniu ich na powierzchni detektora poprzez efekt samoobrazowania – efekt Talbota. W pracy zademonstrowano, iż połączenie spójnego źródła EUV z maską, wytworzoną poprzez litografię wiązką elektronów, pozwala na obrazowanie i na rozszerzenie metody litograficznej w bardzo prosty sposób; sama maska zawiera w sobie informację, którą chcemy zobrazować na detektorze, jak również zawiera w sobie sam układ do obrazowania.

Metoda ta pozwala na zobrazowanie dowolnych, aczkolwiek powtarzających się szczegółów, z rozdzielczością przestrzenną lepszą niż 100nm, na powierzchniach rzędu kilku mm². Bazuje ona na efekcie Talbota, w którym oświetlenie, wiązką promieniowania spójnego przestrzennie i czasowo, powtarzalnej struktury w postaci np. jednowymiarowej siatki, pozwala na otrzymanie obrazów tej struktury, które powtarzają się na określonych odległościach będących wielokrotnością jednostki podstawowej, zwanej odległością Talbota. Na tych odległościach przesunięcia fazowe pochodzące od dyfrakcji wiązki na pojedynczych, okresowych strukturach, niwelują się, w rezultacie czego wiązki te poprzez lokalną interferencję odtwarzają obraz obiektu, od którego pochodzą, bez udziału dodatkowej optyki na zakres EUV i SXR (która jest trudna do wykonania i bardzo droga).

W ramach pracy przedstawiono teoretyczne podstawy efektu Talbota oraz jego rozszerzenia do tzw. GTI (ang. Generalized Talbot Imaging), dzięki któremu można obrazować dowolne powtarzające się komórki elementarne wykorzystując efekt samoobrazowania. Przedstawiono wymagania na źródło EUV oraz określono rozdzielczość przestrzenną. Wykonano również duże maski Talbota do części eksperymentalnej, wykorzystującej laser He-Ne, w celu sprawdzenia poprawności podstaw teoretycznych eksperymentu, oraz docelowe maski dla lasera EUV do końcowej, najważniejszej demonstracji rozdzielczości i jakości obrazowania. Maski wykonane zostały w cienkich membranach z azotku krzemu, o grubości 25nm. Wykorzystano do tego celu litografię wiązką elektronów. Rozmiar maski ustalono na ok. 0.6x0.6mm², pierwszą odległość Talbota na 1mm. Pojedyncza komórka elementarna o rozmiarach 4845x4845nm², posiadała najmniejsze detale

[4] P. W. Wachulak et al., J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 8, 021206 (2009)

o rozmiarach ok. 140nm. Komórka ta została powielona w masce 124 razy w dwóch ortogonalnych kierunkach, zwiększając aperturę numeryczną maski do 0.28, co na wspomnianej długości fali pozwoliło osiągnąć rozdzielczość teoretyczną równą 84nm.

W części eksperymentalnej przeprowadzono obrazowanie, wykorzystując maski o większych rozmiarach, laser He-Ne, a także kamerę CCD jako detektor. Następnie użyto masek wytworzonych w membranach z azotku krzemu i oświetlono je wiązką promieniowania spójnego przestrzennie i czasowo, zaś samoobrazowanie zarejestrowano na detektorze w postaci fotorezystu PMMA o grubości 50nm, który posiada dużo lepszą rozdzielczość przestrzenną niż kamera CCD (ograniczona rozmiarem piksela). Aby wykorzystać całą aperturę maski, musiała być ona oświetlona całkowicie wiązką o pełnej spójności przestrzennej, zatem ustawiono ją w odległości 2.2m od lasera EUV. Poprzez zwiększenie odległości propagacji poprawiono spójność przestrzenną wiązki i zapewniono ww. warunek. Wykorzystując trzy maski, o różnych komórkach elementarnych, zobrazowano je na powierzchni fotorezystu dobierając dokładnie odległość pomiędzy maską a detektorem, aż do sześciu odległości Talbota. Najmniejsze struktury, o rozmiarach 140nm, były znakomicie widoczne, co sugeruje rozdzielczość nieznacznie odbiegającą od teoretycznej. Zaobserwowano prawie identyczne obrazy masek na dalszych odległościach Talbota.

Habilitant zaprojektował, przygotował, zestawiał i uruchomił układ eksperymentalny do samoobrazowania w zakresie EUV, bazując na istniejącym laserze EUV typu capillary discharge. Maski zostały wykonane przez innych Autorów, na Uniwersytecie Wisconsin-Madison, z uwagi na brak dostępu do narzędzi litograficznych wykorzystujących wiązkę elektronów. Habilitant dodatkowo wykonał samodzielnie wspomniane ekspozycje w zakresie EUV, zobrazował za pomocą mikroskopu sił atomowych otrzymane na powierzchni fotorezystu struktury i opracował wyniki pomiarów.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu, demonstrującego technikę samoobrazowania Talbota w zakresie EUV, jest możliwość jej zastosowania w litografii. Główną zaletą tej metody, z punktu widzenia przemysłu litograficznego, jest fakt, iż pojedynczy defekt w strukturze maski, który w klasycznym układzie steppera mógłby uniemożliwić dalszy proces litograficzny struktury, w masce Talbota zostaje uśredniony w całym polu obrazowania. Z uwagi na fakt, iż sygnał pochodzący od całej maski jest znacznie większy niż szum (pochodzący od defektu), obraz maski, powstający na odległości Talbota, jest wolny od defektu. Efekt Talbota otwiera nowe możliwości aplikacyjne poprzez obrazowanie z wysoką gęstością upakowania i rozdzielczością nanometrową takich struktur jak pamięci FLASH, czy też materiały magnetyczne, w których regularne, dobrze zdefiniowane i powtarzalne struktury są powielane na dużo większych powierzchniach.

3R. Obrazowanie nanostruktur z nanometrową rozdzielczością przestrzenną i nanosekundową rozdzielczością czasową w zakresie skrajnego nadfioletu.

Konwencjonalna mikroskopia w zakresie optycznym jest najwygodniejszym sposobem obrazowania obiektów o niewielkich rozmiarach, jednak rozdzielczość przestrzenna, na jaką pozwala mikroskopia optyczna, rzędu 200nm, jest często niewystarczająca. Bezpośrednim sposobem przezwyciężenia tego ograniczenia jest zastosowanie do oświetlenia próbki promieniowania o większej energii fotonów – krótszej długości fali, z zakresu skrajnego nadfioletu (EUV) lub miękkiego promieniowania rentgenowskiego (SXR).

Źródła promieniowania z tego zakresu, zazwyczaj synchrotrony, pozwalają aktualnie na zobrazowanie nanostruktur z rozdzielczością rzędu kilkunastu nanometrów. Nie zmienia to jednak faktu, iż instalacje tego typu są duże, bardzo kosztowne i mają ograniczony dostęp dla użytkowników. Dlatego też potrzeba opracowania kompaktowych układów do obrazowania z nanometrową rozdzielczością przestrzenną zmotywowała i ciągle motywuje różne grupy na całym świecie do opracowywania układów eksperymentalnych tego typu. Do tej pory opracowano układy eksperymentalne mikroskopów z wykorzystaniem kompaktowych źródeł promieniowania krótkofalowego, takich jak wyższe harmoniczne lasera tytanowo-szafirowego Ti:Sa [5] oraz lasery EUV [6] i rentgenowskie [7], jednak w 2008 roku, w momencie publikacji tej pracy, ich rozdzielczość wynosiła kilka-kilkanaście długości fali użytego w eksperymencie promieniowania.

W przedstawionej pracy [3R], a także w [8] (której współautorem jest habilitant), zaprezentowano po raz pierwszy układ mikroskopu EUV, który pozwala na renderowanie obrazów obiektów z rozdzielczością przestrzenną porównywalną z długością fali promieniowania laserowego oświetlającego próbkę, wynoszącą $\lambda=46.9\text{nm}$ (energia fotonu $E=26.4\text{ eV}$). Dodatkowo, nowością w tej pracy jest również czasowa rozdzielczość rzędu 1ns, co oznacza, iż obraz z wysoką rozdzielczością przestrzenną otrzymano w pojedynczym impulsie EUV, o tym właśnie czasie trwania. Otwiera to ogromne możliwości w badaniach związanych z dynamiką nanostruktur w nanosekundowym zakresie czasowym. Okazało się to możliwe dzięki wykorzystaniu lasera typu capillary discharge, generującego impulsy promieniowania EUV o wysokiej energii, a także optyki o dużej aperturze numerycznej. Ważna jest także możliwość regulacji spójności przestrzennej źródła, która, jeśli jest zbyt wysoka, powoduje powstawanie artefaktów w renderowanym obrazie, zmniejszając ich jakość. Cały układ mikroskopu mieści się na pojedynczym stole optycznym o rozmiarach $0.4\times 2.5\text{m}^2$. Połączenie powyższych atrybutów pozwoliło na zademonstrowanie prototypu kompaktowego urządzenia do obrazowania z wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową. Może ono być użyte w szerokim zakresie aplikacji.

[5] M. Wieland, C. Spielmann, U. Kleineberg, T. Westerwalbesloh, U. Heinzmann, and T. Wilhein, *Ultramicroscopy* 102, 93 (2005).

[6] G. Vaschenko, C. Brewer, E. Brizuela, Y. Wang, M. A. Larotonda, B. M. Luther, M. C. Marconi, J. J. Rocca, and C. S. Menoni, *Opt. Lett.* 31, 1214 (2006).

[7] M. Kishimoto, M. Tanaka, R. Tai, K. Sukegawa, M. Kado, N. Hasegawa, H. Tang, T. Kawachi, P. Lu, K. Nagashima, H. Daido, Y. Kato, K. Nagai, and H. Takenaka, *J. Phys. IV* 104, 141 (2003).

[8] C. S. Menoni, F. Brizuela, C. Brewer, D. Martz, **P. Wachulak**, S. Fernandez Jimenez, M. C. Marconi, J. J. Rocca, W. Chao, E. H. Anderson, D. T. Attwood, A. V. Vinogradov, I. A. Artioukov, Y. P. Pershyn and V. V. Kondratenko, *Springer Proceedings in Physics* 130, X-ray lasers 2008, Eds. Ciaran L.S. Lewis and Dave Riley, 341-347, (2008)

Układ mikroskopu posiada dwa zwierciadła pokryte warstwami Sc/Si w układzie Schwarzschilda, tworząc układ kondensora o transmisji całkowitej ok. 13%. Zadaniem kondensora jest skupienie promieniowania z lasera EUV na obrazowanej próbce. Rolę obiektywu mikroskopu pełni wolnostojąca płytka strefowa (soczewka Fresnela na zakres EUV), która renderuje powiększony obraz obiektu na kamerę CCD, czującą na promieniowanie z zakresu EUV. Energia pojedynczych impulsów EUV z lasera sięga ok. 10μJ, co odpowiada ok. 2×10^{12} fotonów. Dla wysoko-dyspersyjnego obiektywu wymagana jest również wysoka monochromatyczność promieniowania, szerokość względna linii to $\Delta\lambda/\lambda = 5 \times 10^{-5}$.

W pracy przebadano wpływ apertury numerycznej obiektywów na rozdzielczość uzyskanych obrazów, poprzez zmierzenie krzywych MTF (modulation transfer function) dla każdej soczewki Fresnela. Aproksymacja krzywych do poziomu modulacji ok. 26%, zdefiniowanego przez kryterium Rayleigha, pozwoliła określić limit rozdzielczości przestrzennej. Wynikiem eksperymentu było również uzyskanie obrazów próbek testowych (siatek), z połówkową rozdzielczością przestrzenną, oszacowana metodą knife-edge na ok. 54nm. Dodatkowo zobrazowano rzeczywistą próbkę w postaci nanorurek węglowych, o średnicy rzędu 50nm. Zaobserwowano charakterystyczne rozwidlenia, widziane również za pomocą mikroskopii elektronowej SEM.

Habilitant brał udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu eksperymentu. Dodatkowo przygotował próbkę w postaci nanorurek węglowych, poprzez ich depozycję z roztworu wodnego na powierzchni cienkiej, o grubości 100nm, membrany krzemowej. Zmierzył transmisję membrany. Wynosiła ona ~30% dla długości fali lasera EUV, $\lambda = 46.9\text{nm}$. Brał także udział w opracowywaniu wyników pomiarów rozdzielczości przestrzennej mikroskopu.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu jest możliwość obrazowania nanostruktur z nanometrową rozdzielczością przestrzenną i nanosekundową rozdzielczością czasową, przy pomocy kompaktowego układu wykorzystującego źródło w postaci lasera EUV. Wysoka rozdzielczość przestrzenna porównywalna z długością fali (ok. 1.2λ), a także rozdzielczość czasowa ok. 1ns, pozwala na studiowanie szybkozmiennych zjawisk z nanometrową rozdzielczością przestrzenną na przykład w nanotechnologii, czy materiałoznawstwie. Dużą zaletą jest także możliwość posiadania w/w układu we własnym laboratorium.

4R. Mikroskopia masek litograficznych na zakres skrajnego nadfioletu przy użyciu kompaktowego lasera emitującego na długości fali 13.2nm.

Litografia w zakresie skrajnego nadfioletu jest jedną z technik, która może zostać użyta w przemyśle półprzewodnikowym w produkcji następnych generacji mikroprocesorów. Przy ich produkcji, w układach zwanych stepperami, wykorzystuje się maski, poprzez które naświetlone zostają próbki z naniesionym fotorezystem. Układy mikroprocesorowe powstają poprzez sekwencyjne naświetlanie i wywoływanie fotorezystów, a także inne operacje takie jak trawienie, napylenie cienkich warstw metalicznych, z których powstają kontakty. Ogromny nacisk kładzie się zatem na inspekcję masek i wykrywanie defektów na ich powierzchni. Ze względu na to, tematyka inspekcji masek jest niezwykle interesująca dla wielu grup badaczy na całym świecie. Dodatkowo, ze strony przemysłu półprzewodnikowego, istnieje inicjatywa do opracowania układów obrazujących, które będą w stanie zlokalizować i zcharakteryzować defekty amplitudowe i fazowe na powierzchni masek.

Do inspekcji masek stosowano do tej pory różne techniki, między innymi skanery głębokiego ultrafioletu, które są w stanie zlokalizować defekty, jednak nie są w stanie określić ich morfologii na litograficznej dł. fali 13.5nm [9]. Do charakterystyki defektów nadają się mikroskopy pracujące na litograficznej długości fali, w paśmie transmisyjnym pokryć wielowarstwowych Mo/Si, na których wytwarzane są maski. Dodatkowo, dzięki wysokiej rozdzielczości, mikroskopy EUV są w stanie naśladować własności obrazujące stepperów, przez co pozwalają na bezpośrednie uzyskanie informacji na temat morfologii masek, pomijając wpływ samego fotorezystu. Do tej pory zademonstrowano mikroskopy tego typu, które wykorzystują promieniowanie ze źródeł synchrotronowych [10]. Z punktu widzenia użyteczności, układy takie powinny być kompaktowe, aby mogły być używane lokalnie w laboratoriach, przy produkcji układów. Do tego celu wymagają one źródeł promieniowania emitujących w pobliżu 13.5nm, o niewielkich rozmiarach i odpowiednich parametrach energetycznych.

W omawianej pracy [4R], a także częściowo w [11,12], przedstawiono po raz pierwszy mikroskop EUV skonfigurowany do pracy w trybie odbiciowym na długości fali lasera EUV równej 13.2nm. Układ tego mikroskopu pozwolił na uzyskanie obrazu w przeciągu ok. 20s, z rozdzielczością połówkową wynoszącą 55nm. Do oświetlenia próbki użyto promieniowania pochodzącego z lasera EUV, bazującego na wydłużonej kolumnie plazmowej. Promieniowanie powstaje poprzez wzmacnianie emisji spontanicznej w kanale plazmowym o rozmiarach 30 μ m x 4mm, w którym następuje inwersja obsadzeń w przejściach niklo-podobnych jonów kadmu. Względna szerokość spektralna promieniowania z lasera EUV wynosiła $\Delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$, zaś spójność przestrzenna, definiowana jako promień spójności, wynosiła ok. 1/20 średnicy wiązki. Średnia moc impulsu EUV wynosiła ok. 1 μ W.

[9] K. A. Goldberg, S. B. Rekawa, C. D. Kemp, A. Barty, E. H. Anderson, P. A. Kearney, and H.-S. Han, Proc. SPIE 6921, 6143 (2008).

[10] H. Kinoshita, K. Hamamoto, N. Sakaya, M. Hosoya, and T. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 46,6113 (2007).

[11] F. Brizuela, Y. Wang; C. A. Brewer, F. Pedaci, W. Chao; E. H. Anderson, Y. Liu; K. A. Goldberg, P. Naulleau, **P. Wachulak**, M. C. Marconi, D. T. Attwood, J. J. Rocca, C. S. Menoni, IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009, LEOS '09, pp. 51-52, DOI: 10.1109/LEOS.2009.5343475 (2009)

[12] F. Brizuela, Y. Wang, C. A. Brewer, F. Pedaci, W. Chao, E. H. Anderson, Y. Liu, K. A. Goldberg, P. Naulleau, **P. W. Wachulak**, M. C. Marconi, D. T. Attwood, J. J. Rocca, C. S. Menoni, Proc. SPIE, Vol. 7271, 72713F (2009)

Wiązka z lasera EUV padała na zwierciadło sterujące z warstwami Mo/Si, następnie pod kątem 42° na kondensator w postaci płytki strefowej, która skupia promieniowanie na próbce. Światło odbite i rozproszone od próbki zostaje użyte do formowania powiększonego obrazu powierzchni za pomocą pozaosiowego obiektywu (w postaci sekcji soczewki Fresnela). Obraz powstaje na kamerze CCD, czulej na ten zakres długości fali. Kondensator oświetla próbkę pod kątem 6° , co naśladuje geometrię steppera. Z uwagi na określoną geometrię, wymaganą przez tryb odbiciowy, obok płytki strefowej obiektywu umieszczono, w procesie wytwarzania obiektywu, okno w membranie z azotku krzemu o grubości 100nm, przez które promieniowanie skupione kondensorem oświetla próbkę. Pozaosiowa soczewka obiektywu pozwoliła zatem na obrazowanie powierzchni wielowarstwowej Mo/Si i defektów na jej powierzchni pod kątem zbliżonym do 90° , zminimalizowanie aberracji i zapewnienie niespójnego oświetlenia próbki poprzez zrównanie apertur numerycznych obiektywu i kondensora. Próbka w eksperymencie została wykonana poprzez litografię, w procesie której wytworzono na powierzchni warstw Mo/Si siatki o różnych okresach.

W pracy zobrazowano siatki o różnych okresach. Na podstawie głębokości modulacji przekrojów obrazów siatek skonstruowano krzywą MTF, z aproksymacji której wywnioskowano o rozdzielczości układu mikroskopu, lepszej niż 80nm. Z kryterium ostrzowego knife-edge, doprecyzowano pomiary rozdzielczości połówkowej na ok. 55 ± 3 nm. Rozdzielczość tą potwierdzono niezależnie, wykorzystując analizę korelacyjną, otrzymując 53 ± 10 nm.

Habilitant brał udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu przedstawionego eksperymentu. W praktyce okazało się, iż warstwa azotku krzemu o grubości 100nm, absorbowała zbyt dużo promieniowania EUV (w oknie w pobliżu obiektywu pozaosiowego), w związku z czym habilitant wykonał trawienie membrany okna do grubości ok. 40nm za pomocą kwasu fluorowodorowego. Dodatkowo niezależnie zweryfikował rozdzielczość przestrzenną, zmierzoną poprzednio metodą ostrzową, za pomocą algorytmu korelacyjnego [13], opracowanego na potrzeby pomiarów rozdzielczości zrekonstruowanych hologramów (w ramach swojego doktoratu).

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu jest możliwość obrazowania masek litograficznych w zakresie EUV, z nanometrową połówkową rozdzielczością przestrzenną wynoszącą ok. 55nm, za pomocą kompaktowego układu mikroskopu. Mikroskop pracował w pobliżu litograficznej długości fali (13.5nm), na długości fali ok. 13.2nm, w geometrii rzeczywistego układu steppera, wykorzystywanego w przemyśle półprzewodnikowym (tzw. „actinic inspection”).

[13] **P.W. Wachulak**, C.A. Brewer, F. Brizuela, W. Chao, E. Anderson, R. A. Bartels, C.S. Menoni, J.J. Rocca, M.C. Marconi, *Journal of the Optical Society of America B*, 25, B20, (2008), także opublikowano w *The Virtual Journal for Biomedical Optics*, 3, 8, (2008)

5R. Kompaktowe, quasi-monochromatyczne laserowo-plamowe źródło promieniowania EUV, bazujące na dwustrumieniowej tarczy gazowej, emitujące promieniowanie o dł. fali 13.8nm.

Przemysł półprzewodnikowy stawia obecnie wysokie wymagania krótkofalowym źródłom promieniowania quasi-monochromatycznego. Kompaktowe źródła EUV pozwalają na przeprowadzenie badań, które dotychczas były możliwe przy wykorzystaniu tzw. „fabryk fotonów” takich jak synchrotrony i lasery na swobodnych elektronach. Dodatkowo, rozwój tych źródeł ma ogromny wpływ na szybkość rozwoju technologii EUV. Użyteczność źródeł została zademonstrowana w bardzo szerokim zakresie eksperymentów, począwszy od litografii [14], poprzez obrazowanie [15], a skończywszy na badaniach materiałowych, np. deformacji powierzchni [16].

W przedstawionej pracy [5R] scharakteryzowano kompaktowe źródło EUV, oparte na dwustrumieniowej tarczy gazowej, opracowanej przez zespół prof. Fiedorowicza, w Wojskowej Akademii Technicznej, generujące quasi-monochromatyczne promieniowanie z plazmy argonowej, na długości fali 13.8nm. Poprzez użycie zaworu elektromagnetycznego, który steruje wypływem dwóch gazów (roboczego i osłonowego) przez kolinearne i osiowosymetryczne dysze, o średnicach 0.4mm i 0.7-1.5mm, udało się uzyskać impulsową tarczę gazową o wydłużonym profilu gęstości (w porównaniu do jednostrumieniowej tarczy gazowej). Profil taki uzyskano dzięki zsynchronizowaniu wypływu gazu osłonowego (gaz o niskiej liczbie atomowej, zazwyczaj He) z gazem roboczym (zazwyczaj jest to gaz szlachetny). Pobudzenie tej tarczy za pomocą skupionej wiązki lasera Nd:YAG (energia w impulsie ok. 0.8J, czas trwania impulsu 3ns) powoduje wytworzenie plazmy, która emituje promieniowanie w szerokim zakresie widmowym od miękkiego promieniowania rentgenowskiego do podczerwieni, bardzo efektywnie zaś w zakresie EUV. W przypadku użycia argonu jako gazu roboczego emisja występuje w zakresie długości fal od 6-20nm. Aby spektralnie zawęzić emisję i uzyskać quasi-monochromatyczne promieniowanie użyto wielowarstwowe zwierciadło elipsoidalne, z warstwami Mo/Si, pracujące pod kątem padania 45° (kolektor-selektor spektralny). Poprzez nałożenie 40 par Mo/Si, o okresie 10.05nm, na odpowiednio wypolerowany podkład, uzyskano teoretyczny współczynnik odbicia ok. 37% dla niespolaryzowanego promieniowania EUV w zakresie od 13-14nm.

W pracy zmierzono widmo emitowane z plazmy argonowej, składające się z dyskretnych przejść w jonach argonu. Za pomocą skalibrowanego spektrometru GIS, opartego na odbiciowej siatce i kamerze CCD czulej na promieniowanie z zakresu EUV, zmierzono, że w zakresie transmisji kolektora-selektora spektralnego dominują dwie linie na 13.79nm oraz na 13.84nm w Ar VIII. Zmierzenie względnej odwrotnej szerokości połówkowej emisji na poziomie $\lambda/\Delta\lambda=140$ pozwoliło ustalić quasi-monochromatyczny charakter emisji źródła EUV. Dodatkowo, za pomocą kamery otworkowej, wyposażonej w aperturę o średnicy 32 μ m, zobrazowano plazmę emitującą promieniowanie EUV i zmierzono jej wymiary (1.1x0.4mm²). Za pomocą detektora półprzewodnikowego AXUV, z nałożonymi filtrami Zr i C o określonej grubości, zmierzono energię impulsów EUV w płaszczyźnie ogniska kolektora na poziomie 1.3 μ J/impuls. Dodatkowo, całkując odpowiedź detektora na wymuszenie fotonami EUV, przeprowadzono optymalizację czasów otwarcia

[14] P.W. Wachulak, M.C. Marconi, R.A. Bartels, C.S. Menoni, J.J. Rocca, J. Opt. Soc. Am. B 25, 1811 (2008)

[15] P. A. C. Takman, H. Stollberg, G. A. Johansson, A. Holmberg, M. Lindblom, and H. M. Hertz, J. Microsc. 226(2), 175–181 (2007).

[16] R.I. Tobey, M.E. Siemens, O. Cohen, M.M. Murnane, H.C. Kapteyn, K.A. Nelson, Opt. Lett. 32, 3 (2007)

zaworów elektromagnetycznych i ciśnień gazów, pod kątem uzyskania maksymalnej emisji na linii 13.84nm. Oszacowano również gęstość fotonów w ognisku kolektora i bez kolektora, co pozwoliło określić teoretyczny (2.4×10^4) i zmierzyć faktyczny (1.9×10^4) uzysk gęstości fotonów, wynikający z zastosowania optyki skupiającej w postaci zwierciadła wielowarstwowego.

Habilitant zaprojektował, przygotował układ eksperymentalny, bazując na istniejącym źródle laserowo-plazmowym, opartym na dwustrumieniowej tarczy gazowej. Dodatkowo wykonał samodzielnie wszystkie wspomniane pomiary oraz opracował wyniki pomiarów i przeprowadził analizę błędów dla niektórych parametrów. W przypadku niektórych narzędzi pomiarowych, takich jak np. spektrometr GIS, konieczna okazała się kalibracja przyrządu, którą przeprowadził również habilitant.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu jest stwierdzenie przydatności kompaktowego źródła EUV do prowadzenia badań oraz określenie perspektyw jego dalszego zastosowania w obrazowaniu z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Przedstawione źródło emituje quasi-monochromatyczne promieniowanie EUV na dł. fali 13.8nm. Źródło to pracuje blisko litograficznej dł. fali 13.5nm, a zatem może być wykorzystywane w szerokiej gamie eksperymentów ukierunkowanych na obecny przemysł półprzewodnikowy. Po przeprowadzeniu optymalizacji źródła stwierdzono, że gęstość energii w impulsie EUV jest wystarczająca do przekroczenia progu ekspozycji fotorezystów, np. PMMA. W swojej dalszej pracy, habilitant wykorzystał przedstawione źródło przy budowie kompaktowego układu do mikroskopii EUV z wykorzystaniem płytek strefowych Fresnela, co było możliwe z uwagi na charakter emisji źródła, a także na prawie całkowity brak spójności przestrzennej tego źródła.

6R. Kompaktowe, laserowo-plazmowe źródła z zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego, oparte na tarczy gazowej.

Źródła promieniowania rentgenowskiego, na zakres tzw. „okna wodnego”, na długości fali pomiędzy 2.3 a 4.4nm, wzbudzają zainteresowanie z uwagi na fakt bardzo wysokiego kontrastu optycznego przy obrazowaniu materiałów biologicznych. Wysoki kontrast w tym właśnie zakresie wynika z różnic w absorpcji pomiędzy różnymi pierwiastkami zawartymi w materiale biologicznym, co powoduje, iż zakres ten nadaje się wyjątkowo dobrze do obrazowania materiałów tego typu.

Obrazowanie w zakresie „okna wodnego” zademonstrowano do tej pory głównie w trybie transmisyjnym, z wykorzystaniem optyki dyfrakcyjnej takiej jak płytki strefowe [17], metodą skaningową [18] lub metodą kontaktową [19]. Są to oczywiście jedynie przykłady. Jednak w większości wspomnianych eksperymentów, jako źródła promieniowania użyto źródeł synchrotronowych, z uwagi na ich parametry i charakterystykę.

Jedną z głównych motywacji w opracowywaniu coraz to nowszych kompaktowych źródeł miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR, jest możliwość budowy układów eksperymentalnych o niewielkich rozmiarach, które w niedalekiej przyszłości mają szansę bycia skomercjalizowanymi narzędziami badawczymi. Stąd stale rosnące zainteresowanie takimi źródłami. Zazwyczaj źródła tego typu bazują na pobudzaniu tarcz stałych za pomocą skupionego promieniowania laserowego. Niesie to za sobą zasadniczy problem związany z produkcją dużej ilości zanieczyszczeń, tzw. debris, związanych z procesem ablacji, które silnie wpływają na skrócenie czasu życia drogich elementów optyki rentgenowskiej.

Nowością w pracy [6R] było przedstawienie i charakterystyka źródła laserowo-plazmowego, opartego na dwustrumieniowej tarczy gazowej, które zostało opracowane w grupie prof. Henryka Fiedorowicza, w Wojskowej Akademii Technicznej. Tarcza charakteryzuje się znikomą ilością zanieczyszczeń produkowanych w trakcie pracy źródła. Źródło, opisane w pracy, konstrukcyjnie zasadniczo nie odbiega od ogólnego schematu. Wiązka lasera Nd:YAG, skupiona za pomocą soczewki o ogniskowej $f=25\text{mm}$, oświetla wytworzoną tarczę gazową, powodując jej jonizację i emisję promieniowania w szerokim zakresie widmowym, włączając w to zakres SXR. Tarcza powstaje poprzez precyzyjne i zsynchronizowane otwarcie dwóch zaworów elektromagnetycznych i wstrzyknięcie niewielkiej ilości gazów (roboczego i osłonowego) w próżni. W pracy, która powstała z myślą o przyszłych eksperymentach z obrazowaniem w tym zakresie spektralnym, scharakteryzowano i porównano parametry źródła, w którym jako gaz roboczy użyto albo argonu – otrzymując emisję quasi-ciągłą w zakresie „okna wodnego”, albo azotu – emitującego promieniowanie quasi-monochromatyczne.

W ramach pracy zoptymalizowano energię impulsów SXR, pod kątem maksymalnej emisji w zakresie „okna wodnego”. Wykonano to poprzez odpowiednie ustawienie wylotu dwustrumieniowej dyszy w odniesieniu do ogniska lasera pompującego, ustalenie czasów otwarcia i zamknięcia zaworów elektromagnetycznych, a także dobranie ciśnień obu gazów. Przy pomocy kamery otworkowej (apertura o średnicy $32\mu\text{m}$ i kamera CCD czuła na zakres SXR), zarejestrowano rozkłady przestrzenne plazmy argonowej i azotowej, emitującej w interesującym nas zakresie spektralnym, a także zmierzono rozmiary obu plazm, które

[17] G. Schneider, B. Riemann, P. Guttman, D. Rudolph, G. Schmahl, Synchr. Rad. News 8 (1995) 19.

[18] J. Kirz, C. Jacobsen, S. Lindaas, S. Williams, X. Zhang, E. Anderson, M. Howells, Synchrotron Radiation in the Biosciences, Oxford University Press, 1994. p. 563.

[19] G. Poletti, F. Orsini, D. Batani, Solid State Phenomena 107 (2005) 7–10.

wynosiły $0.14 \times 0.22 \text{ mm}^2$ (argon) i $0.14 \times 0.32 \text{ mm}^2$ (azot). Do pomiarów spektralnych wykorzystano transmisyjny spektrometr siatkowy TGS, zbudowany w oparciu o transmisyjną siatkę dyfrakcyjną o okresie 200nm, a także dwie szczeliny o rozmiarach odpowiednio $15 \mu\text{m}$ i $33 \mu\text{m}$ (aby uzyskać zadowalającą rozdzielczość spektralną wynoszącą $\lambda/\Delta\lambda \sim 56$). Zaobserwowano, iż plazma argonowa emituje w szerokim zakresie począwszy od ok. 2.5nm, przez zakres „okna wodnego”, aż do EUV, gdzie dłuższe fale należy eliminować dodatkowymi filtrami cienkowieściowymi. Plazma azotowa w zakresie okna wodnego ma całkowicie odmienne, quasi-mochochromatyczne widmo, przejawiające się jednym dominującym pikem na długości fali 2.88nm. Wywnioskowano więc, iż w przypadku użycia optyki odbiciowej, która charakteryzuje się brakiem dyspersji chromatycznej, można użyć z powodzeniem argonu jako gazu roboczego, natomiast w przypadku obiektu w postaci płytki strefowej o wysokiej dyspersji chromatycznej, należy użyć azotu, który posiada widmo quasi-monochromatyczne. Dodatkowo oszacowano jasność źródła dla obu gazów, energie w impulsie w pełny kąt bryłowy, gęstości energii i sprawności konwersji. Generalnie można przyjąć, iż parametry energetyczne dla emisji z argonu są ok. 6-7 razy większe niż dla emisji z azotu. Należy dodać, iż niektóre parametry były oszacowane, z uwagi na konieczność uśredniania sprawności kwantowej detektora AXUV.

Habilitant zaprojektował, przygotował, zmontował i uruchomił układ eksperymentalny, bazując na istniejącym źródle laserowo-plazmowym, opartym na dwustrumieniowej tarczy gazowej. Dodatkowo wykonał samodzielnie wszystkie wspomniane pomiary oraz opracował wyniki pomiarów, a także przeprowadził analizę błędów dla niektórych parametrów. W przypadku niektórych narzędzi pomiarowych, takich jak np. spektrometr TGS, konieczna okazała się kalibracja przyrządu, którą przeprowadził również habilitant.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu i przedstawionej pracy jest stwierdzenie przydatności kompaktowego źródła SXR, po przeprowadzeniu jego optymalizacji, do obrazowania w zakresie „okna wodnego”. Źródło to emituje, w zależności od rodzaju tarczy gazowej, quasi-monochromatyczne promieniowanie SXR na dł. fali 2.88nm z plazmy azotowej, lub quasi-ciągłe promieniowanie w zakresie „okna wodnego” ($\lambda=2.5-5\text{nm}$) z plazmy argonowej. Przedstawione źródło pracuje w zakresie „okna wodnego”, a zatem może być wykorzystywane przede wszystkim do obrazowania materiałów biologicznych w tym zakresie, ale również do np. metrologii (pomiary współczynnika odbicia dla zwierciadeł na ten zakres, transmisji filtrów cienkowieściowych, itp.). W dalszej perspektywie habilitant zamierza wykorzystać zdobyte informacje o tym źródle do budowy kompaktowego układu do mikroskopii SXR z obiektywem Woltery.

7R. Mikroskopia na dł. fali 13.8nm z rozdzielczością przestrzenną poniżej 70nm i użyciem laserowo-plazmowego źródła EUV.

Obrazowanie w pobliżu litograficznej długości fali 13.5nm jest zagadnieniem kluczowym w inspekcji masek EUV we współczesnym przemyśle półprzewodnikowym. Pozwala na zdobycie informacji o potencjalnych zaburzeniach w transferze wzoru maski do fotorezystu, spowodowanych defektami w samej masce, a także wybranie najodpowiedniejszej strategii jej naprawy. Najwyższej jakości mikroskopy, pozwalające na inspekcję z najwyższą rozdzielczością i w najkrótszym czasie, są ciągle budowane w przy instalacjach synchrotronowych [20]; źródło to wraz z laserami na swobodnych elektronach, emituje wiązkę promieniowania o parametrach znacząco przekraczających możliwości źródeł kompaktowych, jednak komercjalizacja tego typu urządzeń w przyszłości wymaga pośredniego kroku, jakim jest wykorzystywanie źródeł kompaktowych. Dotychczas obrazowanie w pobliżu litograficznej długości fali zostało zaprezentowane z wykorzystaniem laserów EUV [4R] lub wyższych harmonicznych lasera Ti:Sa [5].

W przedstawionej pracy [7R], po raz pierwszy zademonstrowano układ do mikroskopii EUV na długości fali 13.8nm, pracujący w trybie transmisyjnym, wykorzystujący kompaktowe źródło promieniowania w zakresie EUV, które zostało dokładnie przedstawione w pracy [5R]. W artykule przeglądowym [21] również można znaleźć nieco informacji na temat układu do mikroskopii EUV. Źródło EUV emituje promieniowanie quasi-monochromatyczne na długości fali 13.8nm. Promieniowanie to jest skupiane i zawężone spektralnie za pomocą kondensora w postaci zwierciadła wielowarstwowego, elipsoidalnego, o średnicy 80mm. Zwierciadło to zostało zaprojektowane w taki sposób, aby zminimalizować wpływ aberracji sferycznych przy kącie padania wiązki 45°. Dodatkowo pokrycie warstwami Mo/Si zapewnia współczynnik odbicia promieniowania niespolaryzowanego z zakresu 13.5+/-0.5nm na poziomie ~37%. Promieniowanie emitowane z plazmy, skupione za pomocą kondensora, oświetla obiekt, położony w odległości ok. 25cm od zwierciadła. Aby wyeliminować dodatkowo promieniowanie z zakresu widzialnego, zastosowano filtr cyrkonowy o grubości 140nm. Oszacowano, iż liczba fotonów w ognisku kondensora wynosi $(8.8\pm 0.5)\times 10^{10}$ w pojedynczym impulsie EUV. Zmierzone uprzednio widmo promieniowania emitowanego ze źródła, oświetlające badany obiekt, składa się z dwóch dominujących linii emisyjnych na długości fali 13.973 i 13.844nm. W przedziale długości fali 13-14nm, na tych dwóch liniach emisyjnych zgromadzonej jest ponad 50% energii. Dzięki obiektywowi dyfrakcyjnemu w postaci płytki strefowej Fresnela powstaje powiększony obraz badanego obiektu. Płytkę strefową nie posiada centralnej apertury tzw. beam-stop, więc zainstalowano zewnętrzną aperturę, tzw. beam-block, o średnicy 12mm, w odległości kilku cm od kondensora. Powiększenie optyczne układu może być regulowane przez zmianę odległości pomiędzy kamerą i obiektywem. W pracy wynosiło ono ok. 470x (powiększenie obiekt – chip kamery). Obraz ten został następnie zarejestrowany za pomocą detektora, w postaci kamery EUV, typu iKon-M (Andor), czulej na zakres skrajnego nadfioletu. Kamera posiada 1M pikselową matrycę, co zapewnia odpowiednie próbkowanie obrazu dla rozdzielczości przestrzennej lepszej niż 100nm. W praktyce, powiększenie końcowe zależy więc od wielkości obrazu na ekranie. Apertury numeryczne kondensora i obiektywu zostały dopasowane do siebie, co zapewniło dopasowanie energetyczne oraz brak artefaktów w obrazie, za które odpowiedzialna jest zazwyczaj spójność przestrzenna wiązki EUV. Dokładną zmianę odległości pomiędzy obiektywem i próbką zapewniono za pomocą

[20] K. A. Goldberg, I. Mochi, P. Naulleau, T. Liang, P.-Y. Yan, and S. Huh, *J. Vac. Sci. Technol. B* 27, 2916 (2009).

[21] **P.W. Wachulak**, M.C. Marconi, C.S. Menoni, J.J. Rocca, H. Fiedorowicz and A. Bartnik, "Imaging and Patterning on Nanometer Scale Using Coherent EUV Light", *Acta Physica Polonica A*, 117, 2, (2010),

stolika piezoelektrycznego, typu NF15A, firmy Thorlabs. W celu oszacowania rozdzielczości przestrzennej układu, posłużono się obiektem testowym, w postaci siateczki o okresie 12.5 μm , i kwadratowych otworach o boku 7.5 μm , wykorzystywanej często do kalibracji mikroskopów TEM. Określono połówkową rozdzielczość przestrzenną, wynoszącą ok. 70nm, obrazując krawędź siateczki metodą ostrzową knife-edge. Aby otrzymać pojedynczy, dobrej jakości obraz z mikroskopu, o odpowiednio wysokim stosunku sygnału do szumu, wymagana ekspozycja wynosiła ok. 200 impulsów EUV (przy repetycji źródła 2Hz). Kamera CCD, rejestrująca obraz, została wychłodzona do temperatury -20°C.

Habilitant zaprojektował, przygotował, zestawiał i uruchomił układ eksperymentalny do mikroskopii EUV, bazując na istniejącym źródle laserowo-plazmowym, opartym na dwustrumieniowej tarczy gazowej. Dodatkowo wykonał wspomniane badania oraz opracował wyniki pomiarów.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu i przedstawionej pracy jest możliwość użycia laserowo-plazmowego źródła EUV do budowy kompaktowego układu do mikroskopii EUV, z rozdzielczością przestrzenną lepszą niż 100nm. Źródło to emituje promieniowanie na długości fali 13.8nm w pobliżu litograficznej długości fali 13.5nm. Układ mikroskopu pozwala na uzyskanie powiększonego obrazu obiektu z połówkową rozdzielczością przestrzenną lepszą niż 70nm, w czasie ok. 100s. W przyszłości tego typu układ może mieć różnorodne zastosowania, włączając w to aplikacje w przemyśle półprzewodnikowym. Dodatkowo należy dodać, iż przedstawiony w pracy układ do mikroskopii EUV jest kompaktowy, gdyż całość, wraz ze źródłem EUV (bez zasilacza) mieści się na stole optycznym o wymiarach 2x0.6m². Poza tym, jest to pierwsza w kraju konstrukcja tego typu kompaktowego układu do obrazowania, z rozdzielczością przestrzenną lepszą niż 70nm. Pod względem wielkości jest to jedna z nielicznych konstrukcji na świecie.

8R. Obrazowanie z nanometrową rozdzielczością przestrzenną przy użyciu laserowo-plazmowego źródła skrajnego nadfioletu EUV.

Narzędzia służące do obrazowania, o zdolności rozdzielczej pozwalającej na zobrazowanie szczegółów w skali nanometrowej, mają istotne znaczenie dla rozwoju nanotechnologii. Jednym ze sposobów na osiągnięcie rozdzielczości lepszej niż 100nm jest mikroskopia w zakresie skrajnego nadfioletu EUV oraz miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR, z wykorzystaniem optyki dyfrakcyjnej w postaci płytek strefowych Fresnela. Zmniejszenie długości fali promieniowania poprawia rozdzielczość przestrzenną w układach obrazujących. Obrazowanie tego typu z rozdzielczością przestrzenną ok. 100nm, na litograficznej długości fali 13.5nm [22], można prowadzić wykorzystując kompaktowe źródło EUV typu Z-pinch (ksenonowe), z obiektywem typu Schwarzschilda zespolonym z płytką strefową Fresnela.

W przedstawionej pracy [8R] starano się poprawić osiągniętą wcześniej, w pracy [7R], połówkową rozdzielczość przestrzenną, wynoszącą ok. 70nm. Zauważono, iż użyta poprzednio jako obiekt testowy, siateczka do pomiaru rozdzielczości przestrzennej metodą ostrzową knife-edge, w rzeczywistości służąca do kalibracji transmisyjnych mikroskopów elektronowych TEM, o znaczenie większej głębi ostrości, może powodować, w przypadku mikroskopii EUV, pogorszenie zmierzonej połówkowej rozdzielczości przestrzennej. Wynika to z faktu, iż grubość siateczki, wynosząca ok. 4 μ m, jest ponad rząd wielkości większa niż głębia ostrości obiektywu (DOF) mikroskopu EUV, zdefiniowana jako $DOF = \pm\lambda/(2NA^2)$ (λ - długość fali, NA – apertura numeryczna) wynoszącego ok. +/-360nm. Dlatego też, oprócz zweryfikowania pomiarów z siateczką, dokonano próby obrazowania obiektu o dużo mniejszej grubości. Wykorzystano do tego celu folię węglową, o grubości 10nm (Quantifoil holey 300M). W obiekcie tym, na siatce o okresie 2.5 μ m, wytworzono w procesie produkcji otwory o średnicy 1.5 μ m. Dodatkowo, dla poprawy kontrastu optycznego, na obiekt napyłono próżniowo cienką warstwę złota, o grubości ok. 60nm. Całkowita grubość obiektu, wynosiła zatem 70nm i była znacząco mniejsza od DOF.

Do obrazowania użyto mikroskopu w podobnej konfiguracji jak w pracy [7R], z drobnymi modyfikacjami. Wymieniono filtr cyrkonowy na wolnostojący filtr o grubości 100nm, bez siatki podtrzymującej. Przeprowadzono optymalizację położenia przesłony beam-stop, w celu poprawy ilości fotonów w ognisku kondensora. Oba obiekty (siateczka i folia z otworkami) zostały następnie zobrazowane poprzez rejestrację serii obrazów, dla różnych odległości pomiędzy obiektywem i próbką testową, w pobliżu odległości przedmiotowej zadowalającej warunków obrazowania dla tego układu. Dla najostrzejszych obrazów (w obu przypadkach) zmierzono rozdzielczości za pomocą dobrze zdefiniowanego kryterium rozdzielczości przestrzennej, jakim jest kryterium ostrzowe knife-edge KE. W tych warunkach jest to również kryterium, które jest najprostsze w implementacji. Obrazy obiektów zarejestrowano przy użyciu kamery CCD, typu iKon-M, firmy Andor, schłodzonej do temperatury -20°C. Aby uzyskać odpowiedni stosunek sygnału do szumu konieczne było użycie 50 impulsów promieniowania EUV dla siatki i 100 impulsów dla folii. Przy oświetleniu niespójnym obiektu, zmierzona odległość, na której znormalizowana intensywność profilu krawędzi zmienia się od 10 do 90%, odpowiada kryterium rozdzielczości Rayleigha i dwukrotnej wartości połówkowej rozdzielczości przestrzennej, często mierzonej także za pomocą testów siatkowych. W pojedynczym pomiarze rozdzielczości metodą KE uśredniono przekroje biorąc pod uwagę 5 sąsiednich linii w obrazie. Pomiarzy rozdzielczości krawędziowej zostały dodatkowo uśrednione w celu

[22] L. Juschkin, R. Freiburger, K. Bergman, J. Phys., Conf. Ser. 186, 012030 (2009).

zmniejszenia oszacowania błędów statystycznych biorąc pod uwagę 6 niezależnych pomiarów. Ustalono, iż rozdzielczość połówkowa dla obiektu w postaci siateczki wynosi ok. 73nm, zaś dla obiektu w postaci folii ok. 50nm. Wyniki te pozwoliły stwierdzić, iż na rozdzielczość przestrzenną mikroskopu wpływa grubość obiektu użytego w pomiarach. W przypadku pominięcia wpływu grubości obiektu, zmierzona rozdzielczość może okazać się gorsza, niż jest w rzeczywistości. Pomiary przedstawione w tej pracy są również załącznikiem do pomiarów przedstawionych w kolejnej pracy [9R].

Habilitant w ramach przedstawionej pracy zaprojektował, przygotował, zestawił i uruchomił układ eksperymentalny do mikroskopii EUV bazując na istniejącym źródle laserowo-plazmowym opartym na dwustrumieniowej tarczy gazowej, przebadał pod kątem pomiarów rozdzielczości obie próbki, zmierzył rozdzielczości przestrzenne i opracował wyniki pomiarów.

Wnioskiem wynikającym z przeprowadzonego eksperymentu i przedstawionej pracy jest stwierdzenie, iż na rozdzielczość przestrzenną w mikroskopii EUV wpływają różne parametry pasożytnicze. Jednym z nich jest grubość próbki, której nie można w wielu przypadkach zaniedbać. Zmierzony i przedstawiony w pracy wpływ grubości obiektu na rozdzielczość przestrzenną w mikroskopii EUV, z wykorzystaniem laserowo-plazmowego źródła promieniowania, nie był, według wiedzy habilitanta, wcześniej badany.

Mikroskopia EUV charakteryzuje się użyciem promieniowania bardziej energetycznego, każdy foton niesie w tym przypadku ponad 20x więcej energii niż w przypadku mikroskopii optycznej. Wpływa to na skrócenie głębi ostrości do kilkuset nm. Wymagane jest zatem dokładne pozycjonowanie próbki względem obiektywu, co utrudnia proces obrazowania, ale pozwala na otrzymanie większej selektywności przy obrazowaniu wybranej płaszczyzny w transparentnej próbce trójwymiarowej.

9R. Obrazowanie w zakresie EUV z rozdzielczością przestrzenną 50nm – wpływ grubości próbki i pasma emisji źródła na rozdzielczość przestrzenną.

Przyszły rozwój nano-technologii wymaga narzędzi pozwalających na obrazowanie obiektów z rozdzielczością przestrzenną w skali nanometrowej. Obecnie używane są różnorodne techniki pozwalające na wysokorozdzielcze obrazowanie; jedną z nich jest mikroskopia w zakresie skrajnego nadfioletu EUV lub miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR, w oparciu o płytki strefowe Fresnela. Do celów obrazowania używa się często źródeł synchrotronowych, jednak z uwagi na oczywiste utrudnienia w ich dostępności, coraz częściej sięga się po źródła kompaktowe, takie jak lasery EUV [6] i rentgenowskie [7] oraz źródła promieniowania niespójnego [23].

W przedstawionej pracy [9R], kolejnej w cyklu prac o mikroskopii EUV z wykorzystaniem laserowo-plazmowego źródła EUV, bazującego na dwustrumieniowej tarczy gazowej, zaprezentowano mikroskopię EUV z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą 50nm, zoptymalizowaną w stosunku do pracy [7R]. W pracy skupiono się na badaniu wpływu parametrów pasożytniczych na rozdzielczość przestrzenną układu obrazowania. Zbadano wpływ ww. parametrów, czyli grubości próbki oraz szerokości pasma emisji źródła, na rozdzielczość przestrzenną.

W przypadku badania wpływu szerokości pasma emisji na rozdzielczość istotne jest, iż źródło laserowo-plazmowe, bazujące na tarczy gazowej, posiada ważną zaletę w stosunku do innych źródeł. Pozwala ono na zmianę szerokości pasma emisji, dokładniej widma emisji, poprzez zmianę rodzaju gazu roboczego. Poprzednio zmierzone widmo emisji z tarczy argonowej, przedstawione dokładniej w pracy [5R] wykazało, iż promieniowanie to posiada cechy promieniowania quasi-monochromatycznego, z względną odwrotną szerokością połówkową emisji na poziomie $\lambda/\Delta\lambda=140$. Przy użyciu xenonu, jako gazu roboczego, zmierzone widmo wykazuje cechy widma quasi-ciągłego, ponieważ bardziej skomplikowane widmo emisji xenonu z większą liczbą linii spektralnych, położonych blisko siebie, sprawia wrażenie emisji ciągłej. W tym przypadku elementem ograniczającym spektralnie widmo xenonu jest sam kondensator, w postaci optyki zwierciadlanej z naniesionymi warstwami Mo/Si i z pasmem transmisji ok. 1nm. Zmierzona dla Xe względna odwrotna szerokość połówkowa emisji wynosząca $\lambda/\Delta\lambda=14$, jest więc o rząd wielkości mniejsza niż dla argonu. Wspomniane dwa rodzaje widm w zakresie skrajnego nadfioletu pozwalają na badanie wpływu szerokości pasma na rozdzielczość przestrzenną. Jeśli zaś chodzi o wpływ grubości próbek na rozdzielczość, posłużono się wcześniej wspomnianą siateczką TEM, której grubość wynosząca ok. 4 μ m, przekracza znacząco głębokość ostrości obiektywu, $DOF\sim\pm/360$ nm, (tzw. obiekt gruby) oraz perforowaną folię węglową z naniesioną warstwą złota dla poprawy kontrastu optycznego (10nm C + 60nm Au), której sumaryczna grubość wynosi ok. 70nm \ll DOF (tzw. obiekt cienki).

W ramach pracy uzyskano obrazy dwóch wspomnianych obiektów, oświetlonych promieniowaniem o różnej szerokości spektralnej, z plazmy argonowej i xenonowej. W siateczce i folii węglowej występują otwory, których krawędzie zostały zobrazowane za pomocą eksperymentalnego układu mikroskopu, opisanego wcześniej w pracy [7R]. W każdym z czterech przypadków zapewniono jednorodne oświetlenie w całym polu widzenia próbek testowych. Dodatkowo dla każdej kombinacji obiekt-pasmo zarejestrowano

[23] I. A. Artiukov, A. V. Vinogradov, V. E. Asadchikov, Y. S. Kas'yanov, R. V. Serov, A. I. Fedorenko, V. V. Kondratenko, and S. A. Yulin, Opt. Lett. 20(24), 2451 (1995).

serię obrazów dla różnych odległości pomiędzy próbką i obiektywem, w pobliżu płaszczyzny obrazowej, ze skokiem 330nm ($<DOF$) w zakresie $\pm 20\mu\text{m}$. Dzięki temu do dalszych pomiarów wybrano obraz o najlepszej rozdzielczości przestrzennej. Rozdzielczość przestrzenną w każdym przypadku zmierzono za pomocą dobrze znanej i zdefiniowanej metody knife-edge, badając odległość, na jakiej znormalizowana intensywność obrazu krawędzi zmienia się od 10-90%. Okazało się, iż najlepszą połówkową rozdzielczość, ok. 50nm, uzyskano dla kombinacji, w której obrazowano cienką próbkę, oświetloną promieniowaniem z plazmy argonowej (widmo quasi-monochromatyczne). Ten przypadek omówiony został w pracy [8R]. Zwiększona grubość siateczki spowodowała pogorszenie rozdzielczości do 73nm, porównywalnie do warunków z pracy [7R]. Największy wpływ na pogorszenie rozdzielczości przestrzennej miała natomiast szerokość widma promieniowania oświetlającego obiekt testowy. W przypadku oświetlenia quasi-ciągłym promieniowaniem z plazmy xenonowej, w której względna odwrotna szerokość połówkowa emisji jest 10x mniejsza niż dla plazmy argonowej, połówkowa rozdzielczość przestrzenna dla cienkiego obiektu (folii) wyniosła 140nm, zaś dla obiektu grubego (siateczka TEM) – 152nm. Zatem kluczem do uzyskania obrazów z wysoką rozdzielczością przestrzenną, przy użyciu obiektywu w postaci płytki strefowej Fresnela, jest monochromatyczność promieniowania oświetlającego próbkę. Jest to zgodne z teorią, gdyż dyfrakcyjna optyka fresnelowska jest znana z silnej dyspersji. Wszystkie pomiary rozdzielczości w przedstawionej pracy są wynikami badań statystycznych, a zatem ograniczone są określonym błędem pomiarowym. W pracy wyznaczono również ilościowy wpływ każdego z parametrów pasożytniczych poprzez splot odwrotny, przy założeniu Gaussowskiej funkcji rozmycia punktu.

Habilitant w prezentowanej pracy przygotował i wykonał użyte próbki, scharakteryzował dodatkowo źródło bazujące na tarczy xenonowej, przede wszystkim widmo emisji, przeprowadził badania eksperymentalne dla różnych obiektów oświetlonych promieniowaniem o różnej szerokości emisji, zmierzył rozdzielczości przestrzenne i dokonał analizy i opracowania wyników pomiarów.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu jest stwierdzenie, iż zarówno grubość obiektu, jak i szerokość widma emisji, wpływają na połówkową rozdzielczość przestrzenną w mikroskopii w zakresie EUV (z użyciem optyki dyfrakcyjnej w postaci płytki strefowej Fresnela). Dla przebadanych próbek wpływ grubości próbki nie jest tak silny jak wpływ pasma emisji, aczkolwiek również pogarsza rozdzielczość o prawie 50%, natomiast z pomiarów wynika, iż 10x szersze pasmo emisji pogarsza rozdzielczość nawet trzykrotnie.

10R. Charakterystyka tarcz gazowych o wydłużonej geometrii, w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego, przeznaczonych do eksperymentów oddziaływania promieniowania laserowego z materią i generacji wyższych harmoniczych.

Systemy laserowe wielkiej mocy, generujące ultrakrótkie impulsy, o czasie trwania poniżej 100fs są stosowane do wytwarzania spójnego promieniowania w zakresie skrajnego nadfioletu EUV i miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR [24] oraz do wytwarzania strumieni cząstek naładowanych [25]. W badaniach tych stosuje się impulsowe tarcze gazowe, które wytwarza się poprzez wstrzyknięcie niewielkiej ilości gazu w obszar ogniska laserowego, za pomocą zaworu elektromagnetycznego wyposażonego w dyszę odpowiedniego kształtu. Parametry tarczy gazowej (przestrzenne i czasowe rozkłady gęstości) zależą od ciśnienia gazu w zaworze, konstrukcji zaworu oraz dyszy. W badaniach w zakresie generacji spójnego promieniowania krótkofalowego, w szczególności w laserach rentgenowskich i źródłach wysokich harmoniczych, tarcze gazowe mają postać strugi gazu, która jest wytwarzana za pomocą zaworu elektromagnetycznego wyposażonego w dyszę w postaci szczeliny.

Rentgenografia impulsowa jest metodą obrazowania, pozwalającą na pomiar parametrów tarcz gazowych takich jak rozkład transmisji, gęstości oraz ciśnienia tarczy gazowej. Metoda badania tarcz gazowych została opracowana w Instytucie Optoelektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej [26]. Pozwala ona na otrzymanie dwu-wymiarowych rozkładów oraz szybką optymalizację ww. parametrów. Polega ona na prześwietleniu tarczy gazowej promieniowaniem z zakresu EUV lub SXR i zarejestrowanie obrazu tarczy na detektorze. W idealnych warunkach, do określenia ww. parametrów, promieniowanie powinno być monochromatyczne. Wskutek selektywnej transmisji promieniowania przez uformowany za pomocą dyszy rozkład gęstości gazu uzyskujemy na detektorze dwuwymiarowy rozkład transmisji tarczy. Pozostałe parametry mogą być oszacowane zakładając parametry takie jak długość fali promieniowania EUV/SXR i grubość tarczy.

W przedstawionej pracy [10R], jako źródło promieniowania wykorzystano źródło laserowo-plazmowe, oparte na podwójnej tarczy gazowej, opracowane w Instytucie Optoelektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej. Tarcza gazowa powstaje poprzez wstrzyknięcie niewielkiej ilości gazu przez dwie koncentryczne dysze. Ilością gazu i czasem wstrzyknięcia steruje elektromagnetyczny zawór zasilany za pomocą kontrolera zsynchronizowanego ze źródłem laserowym wytwarzającym plazmę. Źródłem tym jest laser Nd:YAG (Eksma WL303HT). Wewnętrzna dysza zaworu, w postaci otworka o średnicy 0.4mm wstrzykuje i kształtuje wypływ gazu roboczego (od rodzaju tego gazu zależy widmo promieniowania EUV/SXR), zaś zewnętrzna dysza w postaci pierścienia, o średnicach 0.7mm i 1.5mm, wstrzykuje i kształtuje wypływ gazu osłonowego, w tym przypadku helu, który kształtuje przestrzenny profil gęstości gazu roboczego oraz dodatkowo, z uwagi na małą liczbę atomową Z, słabo absorbuje promieniowanie EUV/SXR. Odpowiednie kształtowanie profilu gęstości minimalizuje rozbieżność wypływu gazu roboczego, dzięki czemu gradient gęstości gazu roboczego, w kierunku normalnym do płaszczyzny dyszy, jest dużo mniejszy niż w przypadku użycia pojedynczego gazu. Promieniowanie z lasera Nd:YAG, o energii

[24] P. Jaegle, Coherent Sources of XUV Radiation (Springer, 2006)

[25] V. Malka, J. Faure, Y. A. Gauduel, E. Lefebvre, A. Rousse, K. T. Phuoc, Nature Physics 4 (2008) 447

[26] R. Rakowski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, J. Mikolajczyk, A. Szczurek, M. Szczurek, I.B. Foldes, Zs. Toth, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 551 (2005) 139–144

impulsu $\sim 740\text{mJ}$ i czasie trwania impulsu 4ns , jest skupiane za pomocą soczewki, o ogniskowej $f=25\text{mm}$, w pobliżu wylotu obu dysz, wytwarzając plazmę w kształcie elipsoidy obrotowej. Plazma emituje promieniowanie w szerokim zakresie spektralnym, począwszy od podczerwieni, a kończąc na miękkim promieniowaniu rentgenowskim. Jako gaz roboczy w źródle SXR użyto kryptonu pod ciśnieniem 10bar , zaś jako gaz osłonowy wykorzystano hel, pod ciśnieniem 8bar . Laser pompujący został skupiony na kryptonowej tarczy gazowej. Wytworzona została plazma o temperaturze wystarczającej do otrzymania neono-podobnych jonów kryptonu, emitująca promieniowania o długości fali ok. 0.7nm [27]. Dodatkowo, aby zawęzić widmo emisji plazmy kryptonowej, użyto cienkowarstwowych filtrów: krzemowego o grubości $20\mu\text{m}$ oraz berylowego o grubości $10\mu\text{m}$. Filtry te blokują niskoenergetyczną część promieniowania emitowanego z plazmy. Widmo emisji zmierzono za pomocą spektroskopu transmisyjnego o okresie siatki 200nm , umieszczonej 875mm od plazmy, wraz ze szczeliną o szerokości $33\mu\text{m}$ umieszczoną w odległości ok. 4mm od siatki. Jako detektor użyto kamerę CCD, model M25, firmy Reflex.

W eksperymentalnej części pracy wykonano badania, w których promieniowanie SXR prześwietla tarczę gazową o wydłużonym profilu gęstości. Tarcza wytwarzana jest poprzez wstrzyknięcie do próżni niewielkiej ilości gazu, w tym przypadku argonu lub xenonu, przez szczelinę o rozmiarach $0.5 \times 15\text{mm}^2$. Uformowana w ten sposób tarcza częściowo absorbuje promieniowanie SXR, które następnie zostaje zarejestrowane jako cieniogram przez detektor w postaci ww. kamery CCD, tworząc obraz transmisyjny tarczy gazowej. Pomiary transmisyjne wykonano umieszczając szczelinę dyszy równoległe do kierunku padania promieniowania SXR. Po wprowadzeniu korekcji związanej z tłem i normalizacji cieniogramu, uzyskujemy dwuwymiarowy rozkład transmisji tarczy, który następnie został przetransformowany na rozkład gęstości i ciśnienia tarczy. Zbadano wpływ różnych czasów otwarcia dyszy i różnych gazów i ich ciśnień na parametry zobrazowanych tarcz gazowych. Zmierzono również jednowymiarowe rozkłady tarcz gazowych na określonych odległościach od wylotu dyszy (w przedziale $0\text{-}2.5\text{mm}$). Otrzymane w ten sposób tarcze gazowe miały wydłużony profil o gęstości w przedziale od 0 do 2mg/cm^3 .

Habilitant zaprojektował, przygotował, zestawiał i uruchomił układ eksperymentalny bazując na układzie laserowo-plazmowego źródła promieniowania EUV i SXR, opartego na dwustrumieniowej tarczy gazowej. Dodatkowo wykonał wspomniane badania związane z obrazowaniem tarcz gazowych, zebrał wyniki pomiarów i dokonał ich opracowania.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu i przedstawionej pracy jest możliwość wytworzenia tarcz gazowych o wydłużonym profilu gęstości i powtarzalnych parametrach, a także możliwość oszacowania i optymalizacji tych parametrów wykorzystując metodę rentgenografii impulsowej do obrazowania rozkładów gęstości tarcz. Wydłużona geometria tarcz gazowych ma potencjalne zastosowania w układach do generacji wyższych harmonicznym lasera Ti:Sa w źródłach EUV i SXR. Pozwala ona na zwiększenie sprawności konwersji energii lasera na energię promieniowania krótkofalowego, poprzez zmianę ciśnienia tarczy gazowej i dzięki temu dopasowanie prędkości fazowych na dłuższej drodze propagacji/interakcji pomiędzy wiązką lasera pompującego i wiązką EUV/SXR generowaną w tarczy gazowej.

[27] V.A.Boyko, V.G. Palchikov, I. J. Skobelyev, A. J. Faenov, „Rentgenovskaya spektroskopiya mnogozaryadnykh ionov”, Energoatomizad, 1988, ISBN 5-283-03904-8 (j. rosyjski), tyt. oryginalny: „Рентгеновская спектроскопия многозарядных ионов”.

11R. Obrazowanie w skali nanometrowej z użyciem kompaktowych źródeł z zakresu skrajnego nadfioletu.

Poprzez zmniejszenie długości fali promieniowania elektromagnetycznego do zakresu skrajnego nadfioletu EUV uzyskujemy znaczącą poprawę rozdzielczości przestrzennej w układach obrazujących, przez co możliwe staje się obserwowanie struktur i zjawisk w skali nanometrowej, poniżej 100nm.

Praca [11R] rozpoczyna cykl prac przeglądowych dotyczących różnych technik obrazowania z nanometrową rozdzielczością przestrzenną. Praca powstała jako artykuł konferencyjny w ramach referatu zapraszanego na 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. Skupia się ona na różnych technikach obrazowania w zakresie skrajnego nadfioletu, które są obecnie stosowane w laboratoriach na całym świecie, a które pozwalają na obrazowanie z rozdzielczością lepszą niż 100nm.

Opisane zostały w niej przede wszystkim eksperymenty dotyczące obrazowania w zakresie skrajnego nadfioletu z użyciem promieniowania spójnego takie jak holografia dwu- [28,29] i trójwymiarowa [30], rekonstrukcja hologramów wygenerowanych komputerowo wytworzonych poprzez litografię wiązką elektronów i zrekonstruowanych w zakresie EUV [31], obrazowanie za pomocą efektu Talbota [2R] i obrazowanie dyfrakcyjne [1R]. Do przeprowadzenia wspomnianych eksperymentów użyto lasera EUV typu capillary discharge, opracowanego i zbudowanego przez prof. Jorge Rocca z Uniwersytetu Stanowego w Kolorado. W ostatnim rozdziale pracy opisane zostały początkowe eksperymenty dotyczące obrazowania z użyciem obiektywu Fresnela i laserowo-plazmowych źródeł promieniowania niespójnego z zakresu skrajnego nadfioletu, bazujących na dwustrumieniowej dyszy gazowej, opisanej w pracy [7R]. W przypadku tego eksperymentu praca została przeprowadzona z wykorzystaniem źródła opracowanego i zbudowanego w grupie prof. Henryka Fiedorowicza, w Wojskowej Akademii Technicznej. Eksperymenty dotyczące holografii EUV [28-30], były tematem pracy doktorskiej habilitanta, zaś pozostałe eksperymenty, począwszy od rekonstrukcji hologramów wygenerowanych komputerowo są materiałem wykraczającym poza pracę doktorską.

Przedstawione w pracy eksperymenty zostały omówione w tym przewodniku. Jedyne eksperyment, który nie był wspomniany do tej pory, dotyczący obrazowania w zakresie skrajnego nadfioletu, a mianowicie rekonstrukcji optycznej hologramów zaprojektowanych numerycznie i wygenerowanych komputerowo. Jest to technika, która może być wykorzystana w przemyśle półprzewodnikowym, gdzie wykonuje się obrazowanie maski na powierzchni półprzewodnika pokrytego fotorezystem. Technika ta pozwala na rekonstrukcję hologramu na powierzchni fotorezystu w pewnej odległości, zwanej ogniskową hologramu. Jest to metoda bezstykowa, skalowalna do mniejszych długości fali promieniowania i nie wymaga żadnej dodatkowej optyki, co jest ważne z punktu widzenia dużych trudności

[28] **P. Wachulak**, R. Bartels, M.C. Marconi, C.S. Menoni, J.J. Rocca, Y. Lu, B. Parkinson, "Sub 400 nm spatial resolution extreme ultraviolet holography with a table top laser". *Optics Express*. 14(21): p. 9636-9642. (2006).

[29] **P. W. Wachulak**, M.C. Marconi, R. A. Bartels, C. S. Menoni, J.J. Rocca, "Soft x-ray laser holography with wavelength resolution", *J. Opt. Soc. Am. B*, 25, 11, 1811 (2008)

[30] **P. Wachulak**, M.C. Marconi, R. Bartels, C.S. Menoni, J.J. Rocca, "Volume extreme ultraviolet holographic imaging with numerical optical sectioning". *Optics Express*. 15: p. 10622-10628. (2007).

[31] A. Isoyan, F. Jian, Y. Cheng, **P. Wachulak**, L. Urbanski, J. Rocca, C. Menoni, M. C. Marconi, and F. Cerrina, "Coherent Imaging Nano-Patterning with Extreme Ultraviolet Laser Illumination," in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper JFA7, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=CLEO-2009-JFA7>

w wytwarzaniu optyki na zakres EUV. Dodatkowo metoda ta pozwala na rekonstrukcję i wytworzenie w fotorezycie dowolnych struktur, które nie muszą fizycznie istnieć, mogą zostać zaprojektowane numerycznie w postaci hologramów, które następnie zostaną zrekonstruowane. Technika ta nakłada duże wymagania na samo źródło promieniowania, które musi charakteryzować się wysoką spójnością czasową oraz pełną spójnością przestrzenną na obszarze o wielkości co najmniej równym wielkości samego hologramu. W przypadku źródeł o niewielkim stopniu spójności, jej poprawa wymaga często zawężenia charakterystyki spektralnej lub filtrowania przestrzennego, co znakomicie zmniejsza ilość fotonów dostępnych w rekonstrukcji hologramu. Dlatego też lasery EUV świetnie nadają się do tego typu eksperymentów, gdyż monochromatyczność ich wiązki jest wysoka. Dla lasera użytego w eksperymencie odwrotna względna szerokość pasma wynosiła $\lambda/\Delta\lambda=10^4$, zaś promień spójności wynosił ok. 0.5mm. W celu dalszego podwyższenia spójności przestrzennej należało zwiększyć drogę propagacji wiązki lasera EUV do 2.2m, co zapewniło promień spójności na poziomie 0.74mm. Z uwagi na ograniczenia litografii wiązką elektronów, hologramy wytworzone w fotorezycie HSQ (hydrogen silsesquioxane) o grubości 65nm, naniesionym metodą spin-coatingu na cienką membranę z azotku krzemu (o grubości 25nm), które normalnie posiadają duży zakres dynamiczny (wiele odcieni szarości), musiały zostać przetransformowane do hologramów binarnych, posiadających piksele o dwóch poziomach (0-pełna absorpcja i 1- pełna transmisja). Każdy piksel ma rozmiar $140 \times 140 \text{ nm}^2$. Konwersja odbywa się numerycznie; po zaprojektowaniu hologramu, który posiada pełny zakres dynamiczny następuje implementacja algorytmów półtonowania (ang. halftoning). Następnie tak zaprojektowany hologram wytwarzany jest metodą litografii wiązką elektronów i wywoływany, co powoduje wypłukanie nienaświetlonych części hologramu. Naświetlone obszary stanowią wtedy absorber dla promieniowania EUV. Hologramy o dwóch różnych wzorach zostały wykonane i zrekonstruowane optycznie. W przedstawionym demonstracyjnym eksperymencie, rozmiar każdego hologramu nie był zbyt duży, ok. $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$, z uwagi na ograniczenia narzędzi litograficznych (wykorzystujących wiązkę elektronów) i wymogi związane ze spójnością przestrzenną źródła. Każdy hologram został oświetlony wiązką EUV i na odległości równej zaprojektowanej ogniskowej hologramu uzyskano rekonstrukcję na detektorze w postaci próbki pokrytej fotorezystem PMMA. Apertura numeryczna hologramu, $NA=0.102$, pozwoliła na rekonstrukcję z rozdzielczością ok. 230nm, na długości fali lasera EUV równej 46.9nm.

Habilitant zaprojektował, przygotował, zestawiał i uruchomił układ eksperymentalny do obrazowania holograficznego w zakresie EUV, bazując na istniejącym laserze EUV typu capillary discharge. Hologramy zostały wykonane przez innych Autorów, na Uniwersytecie Wisconsin-Madison, z uwagi na brak dostępu do narzędzi litograficznych wykorzystujących wiązkę elektronów. Dodatkowo habilitant wykonał wspomniane rekonstrukcje w zakresie promieniowania EUV, obróbkę chemiczną fotorezystu, zeskanował otrzymane w powierzchni fotorezystu obrazy za pomocą mikroskopu sił atomowych i opracował wyniki pomiarów.

Wnioskiem z przeprowadzonego eksperymentu jest stwierdzenie możliwości obrazowania holograficznego w zakresie skrajnego nadfioletu przy użyciu nowej metody, w której hologram zostaje zaprojektowany numerycznie, zaś jego rekonstrukcja odbywa się optycznie. Sam obiekt, który w klasycznej holografii musiał być obiektem fizycznie istniejącym, jest tutaj jedynie informacją, aż do końcowego etapu rekonstrukcji. Metoda ta ma wiele zalet wspomnianych wcześniej. Dodatkowo, jak wiadomo z podstaw holografii, do rekonstrukcji wymagana jest jedynie część hologramu, która w teorii i tak zawiera pełną informację na temat obiektu. Metoda ta jest zatem odporna do pewnego stopnia na uszkodzenia i zanieczyszczenia samego hologramu.

12R. Aspekty obrazowania w skali nanometrowej z użyciem laboratoryjnych źródeł z zakresu skrajnego nadfioletu (EUV).

Obrazowanie fotonowe oparte na promieniowaniu z krótkofalowego zakresu widma elektromagnetycznego staje się potężnym narzędziem w nanotechnologii, materiałoznawstwie, fizyce i innych gałęziach nauki i technologii. Jest ono również wartościową alternatywą do już istniejących technik obrazowania, takich jak mikroskopia w zakresie optycznym, mikroskopia elektronowa, czy też mikroskopia sił atomowych. Obrazowanie w zakresie skrajnego nadfioletu EUV i miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR, z uwagi na mniejszą długość fali promieniowania, pozwala na uzyskiwanie rozdzielczości przestrzennych poniżej 100nm. Promieniowanie SXR w tym przypadku poprawia rozdzielczość przestrzenną w porównaniu z promieniowaniem EUV, jednak zazwyczaj wytwarzane jest w tzw. „fabrykach fotonów”, takich jak instalacje synchrotronowe lub lasery na swobodnych elektronach, podczas gdy promieniowanie EUV wytwarza się często w bardziej kompaktowych źródłach. Dodatkowo, różnice w absorpcji w różnych materiałach, prowadzące do różnicy w kontraście optycznym w zakresie EUV, są również bardzo ważne. Z uwagi na to, dużym zainteresowaniem cieszą się obecnie systemy obrazujące wykorzystujące różnorodne techniki. Opis niektórych aspektów obrazowania w zakresie EUV przedstawiony jest w niniejszej pracy.

Praca [12R] jest drugą pracą przeglądową, którą habilitant pragnie włączyć w cykl prac opisujących różne techniki obrazowania w zakresie EUV i SXR. Praca ta powstała na zaproszenie prof. Antoniego Rogalskiego, edytora czasopisma recenzowanego Opto-Electronics Review. W pracy przedstawiono różne aspekty obrazowania w zakresie promieniowania EUV, z naciskiem na metody, które wykorzystują źródła kompaktowe. W pracy przedstawiono eksperymenty dotyczące obrazowania wysokorozdzielczego, wykonane osobiście przez habilitanta, takie jak holografia dwu- i trójwymiarowa, rekonstrukcja optyczna hologramów wygenerowanych komputerowo, obrazowanie przy użyciu efektu Talbota. Eksperymenty te wymagały użycia źródła promieniowania laserowego z zakresu EUV. Dodatkowo przedstawiono mikroskopię EUV, bazującą na obiektywie w postaci płytki strefowej Fresnela, wykorzystującą laserowo-plazmowe źródło, oparte na dwustrumieniowej tarczy gazowej. Przedstawiona praca, z uwagi na powstanie w późniejszym czasie, opisuje dokładniej ostatnie eksperymenty związane z mikroskopią EUV z użyciem płytek strefowych Fresnela. Przedstawiono w niej oprócz pierwszych rezultatów obrazowania z rozdzielczością połówkową ok. 70nm, opisanych dokładniej w pracy [7R], dla obiektu w postaci siateczki miedzianej o otworach $7.5 \times 7.5 \mu\text{m}^2$ i grubości $4 \mu\text{m}$, również rezultaty eksperymentów dla obiektu w postaci foli węglowej o znacznie mniejszej grubości ok. 70nm. W tym przypadku połówkowa rozdzielczość przestrzenna, zmierzona metodą knife-edge, wyniosła ok. 50nm.

Habilitant przygotował, zestawił i uruchomił osobiście wszystkie układy obrazujące, użyte w przedstawionych eksperymentach. Dodatkowo przeprowadził wspomniane eksperymenty i opracował wyniki pomiarów.

Wszystkie przedstawione techniki mają tą zaletę, iż pozwalają na uzyskanie obrazów z wysoką rozdzielczością przestrzenną w zakresie nanometrowym. Dodatkowo wszystkie układy pomiarowe do obrazowania są niezwykle zwarte; zazwyczaj mieszczą się na pojedynczym stole optycznym, przez co pozwalają na obrazowanie z nanometrową rozdzielczością przestrzenną w zaciszu laboratorium uniwersyteckiego, czy też badawczego w dziale rozwoju firmy nastawionej na komercjalizację przedstawionych technik i układów pomiarowych. Pozwalają zatem na podobne możliwości obrazowania jak przy użyciu dużo większych i kosztownych instalacji synchrotronowych.

Przedstawione metody są również skalowalne do krótszych długości fali promieniowania, a zatem przyszły rozwój źródeł, generujących efektywnie promieniowanie z zakresu jeszcze krótszych fal, pozwoli na obrazowanie z rozdzielczością w pobliżu 10nm. Dodatkowo, dalsza poprawa efektywności i sprawności generacji promieniowania krótkofalowego, zainicjuje możliwość obrazowania z rozdzielczością czasową od nanosekund, dla źródeł laserowo-plazmowych, do femtosekund, dla źródeł wyższych harmonicznych lasera Ti:Sa. Metody przedstawione w pracy bazują na fotonach, jako nośnikach informacji; często obrazowanie przy użyciu mikroskopii elektronowej, pomimo wspaniałej rozdzielczości przestrzennej, nierzadko lepszej niż 1nm, nie daje wystarczającego kontrastu, szczególnie dla próbek dielektrycznych. Natomiast kontrast optyczny w zakresie EUV i SXR dla większości materiałów jest bardzo wysoki. Niektóre z metod obrazowania pozwalają także na obrazowanie przy obecności dodatkowych, zewnętrznych pól magnetycznych i elektrycznych, które są trudne do zaimplementowania w przypadku posiadających ładunek elektryczny nośników informacji, takich jak elektrony.