

Janusz MIKOŁAJCZYK, Zbigniew BIELECKI
 INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI WAT, UL. KALISKIEGO 2, 00-908 WARSZAWA

Stanowisko do badań czułości widmowej detektorów promieniowania o długości fali 13,5 nm

Dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK

asystent w Zakładzie Systemów Optoelektronicznych Instytutu Optoelektroniki WAT. Specjalizuje się w detekcji sygnałów optycznych, zwłaszcza w zakresie miękkiego promieniowania X oraz nadfioletu. Dodatkowo w jego obszarze zainteresowań naukowych są zautomatyzowane systemy pomiarowe.



e-mail: jmikolajczyk@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Zbigniew BIELECKI

profesor nadzwyczajny WAT. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi detekcji sygnałów optycznych i projektowania niskoszumowych układów przetwarzania sygnałów. Jest autorem i współautorem ponad 200 publikacji z zakresu techniki podczerwieni i detekcji sygnałów optycznych. Członek SEP i SPIE oraz Prezydium Polskiego Komitetu Optoelektroniki



e-mail: zbielecki@wat.edu.pl

Streszczenie

W pracy omówiono stanowisko do badań czułości widmowej detektorów promieniowania z zakresu skrajnego nadfioletu. Po raz pierwszy w badaniach tych zastosowano laserowo-plazmowe źródło promieniowania z tarczą gazową. Istotnym elementem tego stanowiska jest dzielnik optyczny z układem zwierciadeł wielowarstwowych. Umożliwia on przeprowadzenie porównawczych pomiarów energii promieniowania za pomocą badanego detektora i wzorcowego miernika. Ogranicza to w znacznym stopniu wpływ niestabilności źródła promieniowania oraz zmianę warunków pomiarowych na dokładność procedury. W pracy przedstawiono wyniki badań poszczególnych elementów zaprojektowanego stanowiska. Dotyczą one wyznaczenia stabilności i wydajności źródła, charakterystyk parametrów zastosowanych układów optycznych oraz właściwości opracowanego dzielnika wiązki. Jednocześnie wyznaczono niepewność pomiarów czułości badanych detektorów za pomocą przyrządu E-Mon i wzorcowego detektora typu AXUV100 firmy National Radiation Detectors Inc.

Słowa kluczowe: detekcja promieniowania optycznego, wzorcowanie detektorów

Laboratory setup for measurement of detector responsivity at the wavelength of 13.5 nm

Abstract

The paper presents a laboratory setup used for a calibration of EUV radiation detectors. For the first time, the laser-plasma source with gas puff target has been applied in such type of measuring procedure. The setup also used an optical beam splitter consisted of two Mo/Si multilayer mirrors. The splitter makes it possible to take comparative measurements by a tested detector and a model energy meter. The instabilities of the source intensity and measurement conditions were minimized in this way. The results of elements investigations of the position were presented. Measurements of the stability and energy efficiency of the radiation source were taken. The features of the beam splitters were determined. The uncertainty of the measuring procedure of detector responsivity at the position was characterized by calibrated E-Mon meter and photodiode model AXUV.

A substantial improvement in the calibration systems is demonstrated.
Keywords: detection of optical signal, detectors calibration

Wprowadzenie

Technologia wykorzystująca promieniowanie o długości fali 13.5 nm stanowi kolejny etap rozwoju litografii [1]. Umożliwia

ona wytwarzanie struktur półprzewodnikowych o minimalnych wymiarach poniżej 35 nm [2].

Istotnym zagadnieniem w procesach litograficznych są bezwzględne pomiary energii promieniowania oraz diagnostyka stosowanych elementów. Stosowane mierniki energii powinny charakteryzować się dużą dokładnością pomiarów w przyjętym zakresie długości fal. Niepewność pomiaru tymi przyrządami jest wyznaczana na specjalnie skonstruowanych stanowiskach pomiarowych [3, 4]. W głównej mierze jej wartość zależy od dokładności określenia parametrów zastosowanych w nich fotodetektorów oraz układów optycznych.

Badania wykonane w Physikalisch-Technischen Bundesanstalt - Berlin (PTB Berlin) wykazały, że czułość fotodiod krzemowych stosowanych w tym zakresie długości fal zmniejsza się o ok. 30 % po 6 latach użytkowania tych detektorów [5]. Zjawisko to może spowodować błąd w określeniu energii promieniowania wykorzystywanego procesie litograficznym i zarazem doprowadzić do zniszczenia rezystu a nawet maski. Dlatego istotne są pomiary parametrów mierników (detektorów) nie tylko na etapie ich produkcji, ale również okresowo, w trakcie ich eksploatacji.

Na świecie istnieje niewielka grupa ośrodków zajmujących się powyższą problematyką. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć PTB Berlin, National Institute of Standards and Technology – Gaithersburg (NIST – USA), Budker Institute of Nuclear Physics (Rosja – Nowosybirsk), Electrotechnical Laboratory (ETL), TERAS – Tsukuba (Japonia) [6-8]

Dokładność wyznaczenia czułości badanych detektorów na tych stanowiskach zależy przede wszystkim od parametrów zastosowanych źródeł oraz wzorcowych mierników energii.

Tab. 1. Parametry wybranych stanowisk stosowanych do badań czułości widmowej detektorów

Tab. 1. Calibration features of some existing research centers

Nazwa ośrodka	Rodzaj źródła	Szerokość pasma	Niepewność pomiaru
FOM Holandia	tarcza gazowa Xe	4,00%	5,0%
PTB Berlin	synchrotron	0,037%	0,3%
LBLN USA	synchrotron	0,014%	0,2%
NIST USA	synchrotron	0,06%	0,04%

Wraz z opracowaniem w Instytucie Optoelektroniki WAT laserowo-plazmowego źródła z tarczą gazową rozpoczęły się prace związane z możliwościami jego zastosowania w różnych dziedzinach nauki i techniki. Prezentowana praca przedstawia wyniki wstępnych badań związanych z oceną możliwości zastosowania tego źródła do wyznaczania czułości widmowej detektorów promieniowania EUV.

1. Opis stanowiska do badań czułości detektorów

Typowe stanowisko do badań detektorów składa się ze źródła promieniowania, monochromatora oraz przyrządu wzorcowego. Procedura pomiarowa polega na wyznaczeniu ich czułości widmowej, która wyraża się wzorem

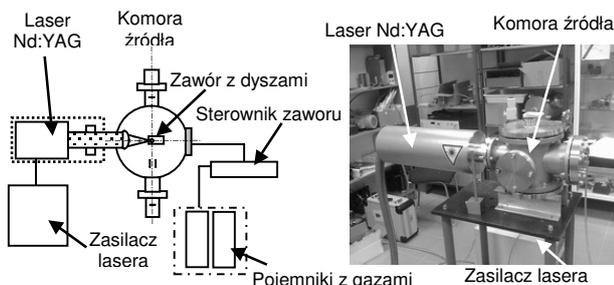
$$R_U = \frac{\Delta U [V]}{P_\lambda [W]}, \quad (1)$$

gdzie ΔU zmierzony sygnał napięciowy (prądowy) na wyjściu detektora wywołany padającym promieniowaniem ze źródła o mocy P_λ . Określa się ją podczas pomiarów za pomocą przyrządu wzorcowego.

1.1. Źródło laserowo-plazmowe z tarczą gazową

Głównym elementem wpływającym na budowę stanowiska przeznaczonego do badań detektorów jest źródło promieniowania. Od jego parametrów i właściwości zależy dobór kolejnych jego elementów składowych.

W źródle laserowo-plazmowym z tarczą gazową emisja promieniowania odbywa się w wyniku naświetlenia tarczy wysokoenergetycznym promieniowaniem laserowym, które wytwarza plazmę [9]. Schemat i fotografię źródła promieniowania przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat i fotografia źródła laserowo-plazmowego z podwójną tarczą gazową

Fig. 1. Scheme and photo of the laser-plasma source with a gas-puff target

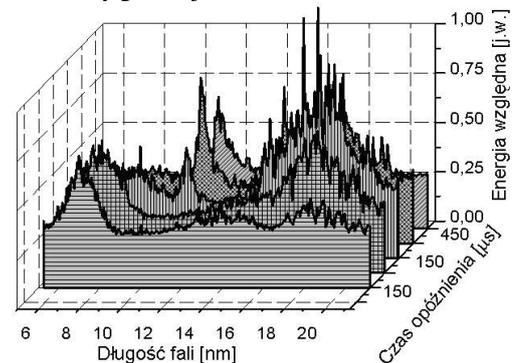
Do wytwarzania plazmy stosuje się promieniowanie laserowe o długości fali 1064 nm, czasie trwania impulsu 4 ns i energii 500 mJ.

Tarczę gazową tworzą strumienie gazów wypływających z zaworu składającego się z dwóch dysz.

Zakres widmowy emitowanego promieniowania może być kształtowany poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego tarczy gazowej [10]. Właściwość ta ma istotne znaczenie, gdyż umożliwia dalsze rozszerzenie możliwości prowadzonych badań np. do pomiarów czułości detektorów promieniowania zakresu tzw. okna wodnego. Promieniowanie to stosowane jest obecnie w mikroskopii tkanek żywych.

W źródle tym zastosowano helowo-ksenonową tarczę gazową ze względu na charakterystykę widma promieniowania emitowanego w zakresie skrajnego nadfioletu. Wartość energii promieniowania oraz jej stabilność zależą od warunków

wytwarzania plazmy. Warunki te mogą dotyczyć m.in. zmian czasów otwarcia dysz z gazami względem impulsu laserowego (rys. 2), ciśnienia tych gazów w pojemnikach, energii zastosowanej wiązki laserowej, położenia ogniska wiązki na powierzchni tarczy gazowej.

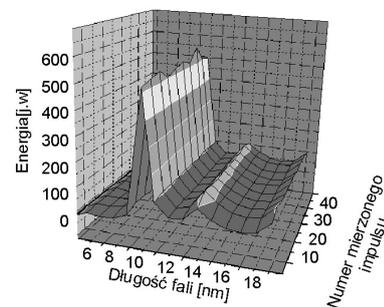


Rys. 2. Rozkład widma promieniowania źródła z tarczą gazową dla różnych czasów opóźnienia otwarcia dysz z Xe względem impulsu laserowego

Fig. 2. Changes of the radiation spectrum as a function of delay time of gas nozzles opening

Badania źródła

Badania możliwości zastosowania źródła do pomiaru czułości widmowej detektorów przeprowadzono za pomocą komercyjnego miernika E-Mon [11]. Otrzymane wyniki wykazały, że dobór warunków wytwarzania plazmy w tym źródle, stanowić musi kompromis pomiędzy osiągnięciem maksymalnej energii promieniowania a jej stabilnością. Dla przyjętych optymalnych warunków pracy źródła wartość energii wyniosła 5,5 mJ/sr/2π. Rozkład widma promieniowania dla ww. warunków dla serii 40 impulsów przedstawiono na rys. 3.

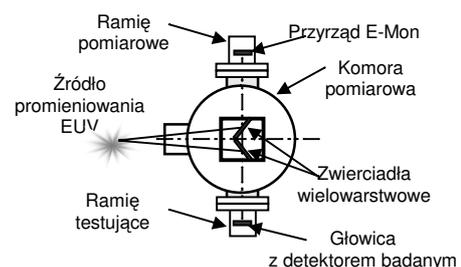


Rys. 3. Rozkład widmowy promieniowania źródła dla optymalnych warunków pracy

Fig. 3. Radiation spectrum at the optimal conditions of the source operation

1.2. Monochromator

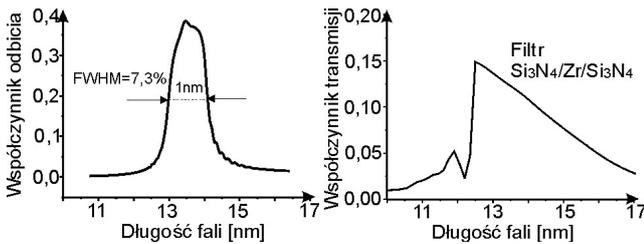
Badania parametrów źródła wykazały, że należy opracować procedurę pomiarową, która minimalizowałaby wpływ niestabilności emitowanej energii na dokładność pomiaru czułości testowanych detektorów. W tym celu przeanalizowano możliwość zastosowania monochromatora z dzielnikiem wiązki – rys. 4 [12].



Rys. 4. Schemat komory z dzielnikiem wiązki

Fig. 4. Scheme of the chamber with a beam splitter

Wiązka promieniowania jest kierowana jednocześnie na powierzchnię detektora badanego oraz miernika wzorcowego. Do budowy monochromatora zastosowano dwa zwierciadła wielowarstwowe oraz filtr absorpcyjny. Zwierciadła wielowarstwowe zostały wykonane w Instytucie Fraunhoffera (Jena, Niemcy). Ich współczynnik odbicia został zoptymalizowany dla kąta padania 45° oraz długość fali 13,5 nm. Aby zminimalizować wpływ promieniowania długofalowego w monochromatorze umieszczono dodatkowy filtr absorpcyjny składający się z warstw $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Zr}/\text{Si}_3\text{N}_4$. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki widmowe współczynnika odbicia zwierciadła oraz współczynnika tłumienia filtra [13].



Rys. 5. Charakterystyka widmowa współczynnika odbicia zwierciadła wielowarstwowego oraz transmisji filtra
Fig. 5. Spectral characteristics of mirror reflectivity and filter transmission

Przyrządem wzorcowym jest miernik E-Mon. Dokładność pomiaru tym przyrządem została wyznaczona na specjalistycznym stanowisku, w którym zastosowano ksenonową komorę wyładowczą. Podana w certyfikacie wzorcowania tego miernika niepewność pomiaru energii wynosi 1,8 %, natomiast jego czułość 0,1624 A/W. W przyrządzie tym zastosowano fotodiody krzemową typu AXUV 100.

Procedura pomiaru energii przyrządem E-Mon polega na zarejestrowaniu sygnału wyjściowego, a następnie wyznaczeniu wartości wytworzonego ładunku. Znając czułość oblicza się energię promieniowania na powierzchnię detektora.

Badania monochromatora

Badania eksperymentalne monochromatora miały na celu wyznaczenie współczynników odbicia zastosowanych zwierciadeł wielowarstwowych, współczynnika tłumienia filtra absorpcyjnego oraz właściwości dzielnika wiązki optycznej. Właściwości te dotyczą określenia stosunku energii oraz jednorodności przestrzennej promieniowania w obu ramionach pomiarowych. Badania zwierciadeł oraz filtra absorpcyjnego przeprowadzono na stanowisku, w którym zastosowano miernik E-Mon oraz źródło laserowo-plazmowe z tarczą stałą. Mimo że źródło to emituje większą ilość zanieczyszczeń aniżeli źródło z tarczą gazową, charakteryzuje się ono większym natężeniem promieniowania oraz stabilnością. Zmierzone wartości współczynników odbicia wyniosły $(33,8 \pm 0,7) \%$ oraz $(34,2 \pm 0,7) \%$ natomiast współczynnik absorpcji 13,5 %.

Badanie dzielnika wiązki przeprowadzono z wykorzystaniem źródła laserowo-plazmowego z tarczą stałą. Umożliwiło ono określenie parametrów dzielnika odniesionych bezpośrednio do właściwości tego źródła.

Stosunek energii został wyznaczony poprzez porównanie wyników pomiarów energii otrzymanych za pomocą przyrządu E-Mon kolejno dla dwóch ramion dzielnika. Jego wartość wyznaczono na podstawie wyników 30 pomiarów, uzyskanych za pomocą oscyloskopu firmy Tektronix model TDS 3012. W procedurze zastosowano dodatkową fotodiody, która kontrolowała względną zmianę energii promieniowania źródła. Niepewność pomiaru stosunku energii wynikała z niestabilności energii wypromieniowanej przez źródło oraz z niepewności pomiaru sygnału wyjściowego za pomocą przyrządu E-Mon.

Zmierzona wartość stosunku energii w ramionach dzielnika wyniosła $0,85 \pm 0,02$.

Teoretycznie stosunek ten powinien wynosić 1. Powstała różnica wynika z niedokładności mocowania uchwytów oraz zwierciadeł w dzielniku wiązki. Nie wpływa to jednak na dokładność opracowanej metody.

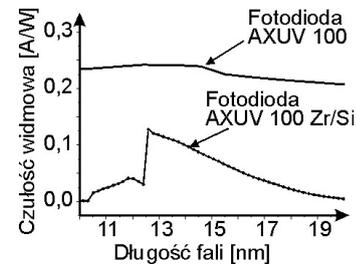
Badania rozkładu przestrzennego natężenia promieniowania w ramionach dzielnika wiązki miały na celu określenie położenia i maksymalnego naświetlenia obszaru detektorów. Pomiar przeprowadzono przy użyciu kamery CCD model X-VISION M-25 firmy Reflex Co. Zmierzona powierzchnia obszaru oświetlanego przez promieniowanie źródła objęła powierzchnię matrycy CCD o wymiarach 5 x 5 mm. Stanowisko to, może być zatem użyte do badań detektorów o wymiarach nie przekraczających powyższej wartości. Detektory o większej powierzchni mogą być testowane, ale należy uwzględnić w obliczeniach jedynie ich rzeczywistą powierzchnię oświetloną.

Badania wykazały również, że obraz z kamery charakteryzuje się pewną niejednorodnością naświetlenia. Natężenie mierzonego promieniowania w skrajnych punktach matrycy zmienia się maksymalnie o około 13 %.

Niejednorodność ta jest prawdopodobnie spowodowana zmieniającym się współczynnikiem odbicia zwierciadła w wyniku zmiany kąta padania promieniowania, gdyż środek obrotu zwierciadła znajduje się poza osią wiązki promieniowania. Może to wprowadzić pewien błąd przy wyznaczeniu czułości detektorów (zwłaszcza o mniejszej powierzchni). Błąd ten można zmniejszyć przez zastosowanie przysłony z otworem, która ściśle określa obszar naświetlający. Stanowi to pewne ograniczenie, jeżeli chodzi o możliwe minimalne rozmiary testowanych detektorów.

2. Wyniki badań eksperymentalnych

Do badań weryfikujących poprawność działania stanowiska zastosowano detektory AXUV 100 oraz AXUV 100 Zr/Si. Charakterystyki widmowej tych detektorów podane przez producenta przedstawiono na rys. 6.



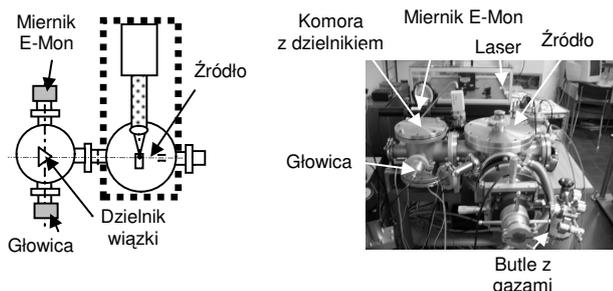
Rys. 6. Charakterystyki czułości widmowej badanych fotodiód typu AXUV 100 [14]
Fig. 6. Spectral responsivities of photodiodes series AXUV 100

Na wstępie przeprowadzono pomiary czułości widmowej fotodiód na stanowisku, które zostało użyte w trakcie pomiarów parametrów elementów optycznych.

Na podstawie zmierzonych ładunków wytworzonych w tych detektorach, znajomości czułości widmowej miernika wzorcowego E-Mon oraz przy uwzględnieniu niestabilności energii źródła wyznaczono czułości badanych detektorów. Wyniosły one kolejno dla fotodiody AXUV 100 Zr/Si – $0,118 \pm 0,006$ A/W oraz dla AXUV 100 – $0,241 \pm 0,012$. Wartości te pokrywają się z danymi podawanymi przez producentów.

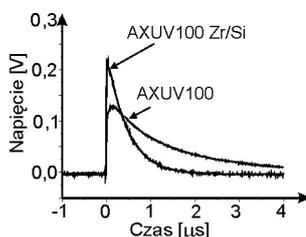
Badania fotodiód z wykorzystaniem źródła z tarczą gazową przeprowadzono na opracowanym stanowisku, którego schemat i fotografię przedstawiono na rys. 7.

W trakcie badań w ramieniu pomiarowym umieszczano kolejno testowane fotodiody wraz z filtrem absorpcyjnym. Detektory mocowano w specjalnej głowicy detekcyjnej a sygnał wyjściowy obserwowano na ekranie oscyloskopu.



Rys. 7. Schemat i fotografia stanowiska do badań czułości widmowej detektorów
Fig. 7. Scheme and photo of the laboratory setup for detector investigations

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe oscylogramy sygnałów wyjściowych otrzymane z testowanych fotodiod.



Rys. 8. Sygnały wyjściowe otrzymane z testowanych detektorów
Fig. 8. Output voltage signals from the investigated detectors

Na podstawie tych oscylogramów wyznaczono ładunki wytworzone w obu fotodiodach. Umożliwiły one wyznaczenie czułości widmowej poszczególnych detektorów

Analiza procedury pomiarowej uwzględniająca dokładności zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz wyniki badań weryfikujących dała możliwość określenia niepewności pomiarów czułości badanych detektorów. Wartość tego parametru wyniosła 7,3 %. Końcowe wyniki pomiarów i obliczeń zestawiono w tab. 2.

Tab. 2. Wyniki pomiarów czułości testowanych detektorów typu AXUV
Tab. 2. Measurement results of investigated detectors

Ładunek [j.w]		Ładunek miernika E-Mon w trakcie pomiaru fotodiody [j.w]:		Czułość widmowa [A/W]	
AXUV100	AXUV100 Zr/Si	AXUV100	AXUV100 Zr/Si	AXUV100	AXUV100 Zr/Si
201	98,7	9,68	9,94	0,230±0,017	0,110±0,008

Wartości czułości widmowej fotodiod typu AXUV 100 oraz AXUV 100 Zr/Si są zbliżone do danych otrzymanych z wcześniejszych pomiarów z zastosowaniem źródła z tarczą stałą.

3. Podsumowanie

Opracowana procedura pomiarowa umożliwia zastosowanie źródła laserowo-plazmowego z tarczą gazową do badań czułości widmowej detektorów. Dzięki temu, opracowane stanowisko stanowi konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do obecnie istniejących konstrukcji np. wykorzystujących promieniowanie synchrotronowe.

Badania eksperymentalne wykazały, że uzyskano kompromis między parametrami metrologicznymi a kosztami jego wykonania i eksploatacji.

W tabeli 3 przedstawiono parametry metrologiczne opracowanej procedury.

Tab. 3. Parametry stanowiska przeznaczonego do testowania detektorów promieniowania EUV

Tab. 3. Features of the developed position

Parametr	Wartość
Zakres widmowy	(13,5 ± 0,5) nm
Powierzchnia obszaru naświetlania	(5 x 5) mm
Niepewność pomiaru	7,3 %
Całkowita energia promieniowania docierająca do powierzchni detektorów	7,2 μJ / (5 x 5) mm
Czas trwania procedury testowania	około 30 minut

Stanowisko to może zostać zastosowane również do badań czułości detektorów w innych zakresach długości fal. Zakresy te są kształtowane za pomocą układów optycznych i składu chemicznego tarczy gazowej. Obecnie prowadzone są analizy nad możliwościami testowania detektorów promieniowania z zakresu okna wodnego na potrzeby mikroskopii.

Autorzy artykułu składają podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Henrykowi Fiedorowiczowi za umożliwienie przeprowadzenia badań. Powyższa praca jest wynikiem realizacji projektu badawczego Nr 0004/T00/2005/29

4. Literatura

- [1] R. A. Lawes: Future trends in high-resolution lithography. Applied Surface Science t. 154–155, 2000, str. 519–526.
- [2] K. Deguchi, T. Haga: Proximity X-ray and extreme ultraviolet lithography. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IV Physics t. 1, 2000, str. 829–842.
- [3] R. Stuik, F. Scholze, J. Tummeler, F. Bijkerk: Absolute calibration of a multilayer-based XUV diagnostic. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A t. 492, 2002, str. 305–316.
- [4] T. Missalla, M. C. Schürmann, R. Lebert, C. Wies, L. Juschkina, R. Klein, F. Scholze, G. Ulm, A. Egbert, B. Tkachenko, B. Chichkov: Metrology tools for EUV-source characterization and optimization. Emerging Lithographic Technologies VIII Proc. SPIE t. 5374, 2004, str. 979–990.
- [5] <http://www.semtech.org/resources/litho/meetings/euv/20030223a/P06-Scholze-High%20accuracy%20detector%20calibration%20at%20PTB.pdf>
- [6] F. Scholze, J. Tummeler, G. Ulm: High-accuracy radiometry in the EUV range at the PTB soft x-ray beamline. Metrologia 40, 2003, str. 224–228.
- [7] M. Wedowski, U. Schlegel, J.A. Underwood, E.M. Gullikson, S. Bajt, J.A. Folta, P.A. Kearney, C. Montcalm, R. Soufli, E.A. Spiller: High-Precision Reflectometry of Multilayer Coatings for Extreme Ultraviolet Lithography. <http://www-als.lbl.gov/als/compendium/AbstractManager/uploads/99039.pdf>.
- [8] Ch.Tarrio, S. Grantham, M. B.Squires, R.E. Vest, T.B. Lucatoro: Towards High Accuracy Reflectometry for Extreme-Ultraviolet Lithography. J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 108, 2003, str. 267–273.
- [9] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, H. Daido, N. Sakaya, et. al.: Investigation of soft X-ray emission from a gas puff target irradiated with a Nd:YAG laser. Optics Communications t. 163, 1999, str. 103–114.
- [10] S. Kranzusch, K. Mann: Spectral characterization of EUV radiation emitted from a laser irradiated gas-puff target. Optics Communications t. 200, 2001, str. 223–230.
- [11] <http://www.semtech.org/docubase/document/4498atr.pdf>
- [12] J. Mikołajczyk, J. Wojtas, Z. Bielecki: Badania detektorów promieniowania optycznego z zakresu skrajnego nadfioletu. IV Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłowo, 2005, str. 435–441
- [13] http://www.cxro.lbl.gov/optical_constants/index.html
- [14] <http://www.ird-inc.com>

Artykuł recenzowany