



Elementy optyczne pracujące w widmowym zakresie obejmującym ultrafiolet próżniowy i miękkie promieniowanie rentgenowskie

MARTYNA WARDZIŃSKA, PRZEMYSŁAW WACHULAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
martyna.wardzinska@wat.edu.pl, przemyslaw.wachulak@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule zawarto podstawy fizyczne i przegląd elementów optycznych do pracy w zakresie obejmującym ultrafiolet próżniowy (EUV) oraz miękkie promieniowanie rentgenowskie (SXR). Pierwszy rozdział obejmuje wprowadzenie do analizowanej tematyki i podstawy fizyczne. W drugim rozdziale przedstawione zostały podstawy działania optyki związanej z zakresem EUV/SXR wraz z wyróżnieniem jej wad oraz zalet. W trzecim rozdziale szczegółowo omówiono elementy optyczne, takie jak: filtry optyczne, zwierciadła (m.in. wielowarstwowe), siatki dyfrakcyjne, płytki strefowe Fresnela oraz rozwiązania hybrydowe. Rozdział czwarty przedstawia szeroki obszar zastosowań optyki EUV/SXR. W ostatnim rozdziale znajduje się podsumowanie przedstawionych wcześniej informacji.

Słowa kluczowe: automatyka, elektronika i elektrotechnika, optyka rentgenowska, filtry optyczne, zwierciadła wielowarstwowe, siatki dyfrakcyjne, płytki strefowe Fresnela, ultrafiolet próżniowy, miękkie promieniowanie rentgenowskie

DOI: 10.5604/01.3001.0016.2808

1. Wprowadzenie

Użycie pierwszych elementów optycznych — soczewek wykonanych z wypolerowanego kwarcu — datowane jest na 2000 rok przed naszą erą [1]. Od tego czasu powstało wiele rozwiązań, które obecnie wciąż są rozwijane. Optyka znajduje zastosowanie w wielu obszarach — teleskopy zbudowane ze zwierciadeł umożliwiają coraz dokładniejszą obserwację przestrzeni kosmicznej [2], soczewki wykorzystuje się w mikroskopii [3], lidary są powszechnie używane w zastosowaniach militarnych

do rozpoznania oraz pomiaru dystansu do obiektu [4], a optyka znajdująca się w aparatach fotograficznych wraz z nowoczesnymi detektorami pozwala otrzymać obrazy o coraz lepszej rozdzielczości [5].

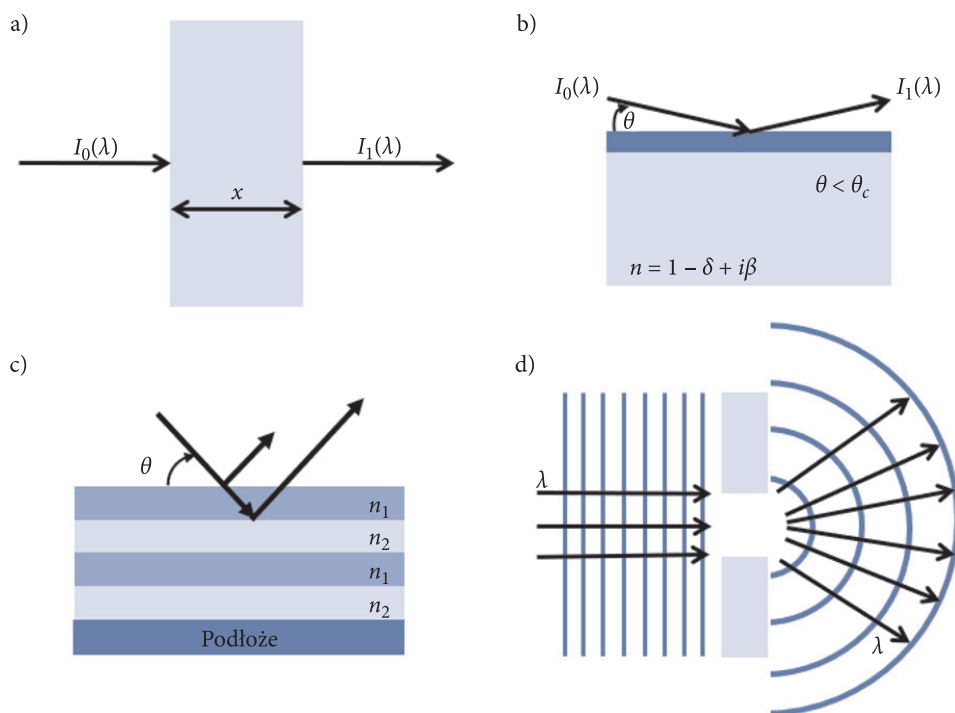
Elementy optyczne mogą współpracować z promieniowaniem z szerokiego zakresu długości fal. Procesy zachodzące wskutek interakcji promieniowania z materią są dla większości zakresów widmowych podobne — odbicie, załamanie, transmisja, rozproszenie czy absorpcja. Jednak w przypadku optyki dotyczącej zakresu obejmującego ultrafiolet próżniowy (ang. *extreme ultraviolet*, EUV, długość fali 10-121 nm) oraz miękkie promieniowanie rentgenowskie (ang. *soft X-rays*, SXR, długość fali 0,1-10 nm) [6] należy pamiętać o jej odmiennych właściwościach w oddziaływaniu z falą elektromagnetyczną, przede wszystkim o fakcie, że absorpcja zachodzi w znacznie większym stopniu [7]. Podstawy fizyczne działania optyki związanej z zakresem EUV/SXR zostały szerzej omówione w rozdziale 2.

Elementy optyczne można podzielić na kategorie na podstawie zjawisk fizycznych, na których oparte jest ich działanie. Można wyróżnić elementy wykorzystujące zjawiska transmisji, odbicia, dyfrakcji oraz refrakcji. W zakresie EUV/SXR z uwagi na specyfikę oddziaływania fotonów z materią występują elementy optyczne bazujące na pierwszych trzech zjawiskach. Do elementów transmisyjnych i odbiciowych można zaliczyć filtry optyczne oraz zwierciadła, a do elementów dyfrakcyjnych płytki strefowe Fresnela, dyfrakcyjne elementy nanostrukturalne i siatki dyfrakcyjne. Istnieją również rozwiązania hybrydowe, które jednocześnie można zaliczyć do kilku kategorii. Każdy z wymienionych elementów został szczegółowo opisany w rozdziale 3.

Optyka dotycząca zakresu EUV/SXR znajduje zastosowanie w wielu nowoczesnych technologiach, które przyczyniają się do rozwoju nauki oraz ułatwiają ludziom funkcjonowanie. Obecnie powszechnie inwestuje się w rozwój technik kosmicznych czy medycyny, w których elementy optyczne często odgrywają kluczową rolę. Celem artykułu jest zebranie najważniejszych informacji o elementach optycznych do pracy w omawianych zakresach oraz przedstawienie możliwości ich zastosowania, które pokazano w rozdziale 4.

2. Podstawy fizyczne działania optyki na zakres EUV/SXR

Zasady działania elementów optycznych na widmowy zakres obejmujący ultrafiolet próżniowy i miękkie promieniowanie rentgenowskie opierają się na kilku podstawowych zjawiskach fizycznych zachodzących między promieniowaniem a materią. Należą do nich: transmisja, absorpcja, odbicie, dyfrakcja oraz interferencja. W przeciwieństwie do pozostałych zakresów spektralnych w EUV/SXR dominuje absorpcja, a refrakcja nie ma zastosowań praktycznych, z uwagi na bardzo małe drogi propagacji tego promieniowania w materiale, z którego zbudowany jest element optyczny [8].



Rys. 1. Bieg promieni świetlnych przy: a) zjawisku transmisji, b) całkowitym zewnętrznym odbiciu, c) interferencji oraz d) dyfrakcji

Transmisja zachodzi, gdy promieniowanie przechodzi przez dowolny ośrodek. Część promieniowania może zostać wówczas pochłonięta w wyniku absorpcji. Zjawisko to można wyjaśnić z pomocą prawa Lamberta-Beera przedstawionego na rysunku 1a i opisywanego przy pomocy wzoru 1, w którym I_0 oznacza intensywność promieniowania przed przejściem przez materiał, I_1 intensywność promieniowania po przejściu przez materiał, x grubość materiału, λ długość fali, ρ gęstość elektronową, a μ współczynnik absorpcji.

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\rho\mu x}. \quad (1)$$

Odbicie występuje, gdy promieniowanie dochodzące do granicy ośrodków zmienia swój kierunek propagacji pod tym samym kątem, pod którym padało na granicę ośrodków, pozostając w pierwszym z nich. Zjawisko to zostało przedstawione na rysunku 1b. W przypadku promieniowania rentgenowskiego określa się kąt θ_c jako kąt krytyczny opisany równaniem 2, w którym symbolem δ oznaczony jest współczynnik wpływający na zmiany fazy oddziałującego promieniowania. Jeśli kąt padania (θ), mierzony do powierzchni odbijającej, jest większy od kąta krytycznego,

współczynnik odbicia drastycznie maleje [9]. W przypadku gdy współczynnik załamania jest mniejszy niż jedność, a kąt padania promieniowania mniejszy od kąta krytycznego [10], może nastąpić całkowite zewnętrzne odbicie. Jest to zjawisko, przy którym zdecydowana większość promieniowania zostaje odbita od powierzchni materiału. Ten niewielki kąt, pod którym promieniowanie pada na powierzchnię, jest nazywany kątem odbicia poślizgowego (ang. *grazing incidence angle*).

$$\theta_c \approx \sqrt{2\delta} \quad (2)$$

Interferencja (rysunek 1c) to zjawisko nakładania się fal o jednakowych długościach, które zachodzi między innymi pomiędzy warstwami elementów wielowarstwowych. Dochodzi między nimi do interferencji zgodnie ze wzorem Bragga (równanie 3), w którym θ oznacza kąt padania promieniowania mierzony do powierzchni, d grubość pojedynczej warstwy, a n rząd ugięcia. Dąży się do osiągnięcia interferencji konstruktywnej, aby zwiększyć reflektancję elementu, lub destruktywnej, by reflektancję zmniejszyć.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3)$$

Dyfrakcja, która została przedstawiona na rysunku 1d, wywodzi się z zasady Huygensa, która mówi, że każdy punkt frontu falowego może zostać uznany za centrum wtórnego zaburzenia, które daje początek elementarnym falom sferycznym, takim, że po jakimś czasie obwiednia wokół tych fal będzie określać kształt frontu falowego [11, 12]. Augustin J. Fresnel uzupełnił tę definicję o postulat, że elementarne fale konstruktywnie interferują ze sobą, tworząc nowy front falowy. Rozkład amplitudowo-fazowy (J_{12}) frontu falowego za aperturą opisuje teoria van Citterta–Zernike’a [13] i można go określić równaniem 4, w którym $I(S)$ oznacza intensywność na jednostkę powierzchni S źródła σ , k to liczba falowa, R_1 i R_2 to odległości między typowym punktem źródła a dwoma wybranymi punktami na płaszczyźnie obrazowej:

$$J_{12} = \int_{\sigma} I(S) \frac{e^{ik(R_1-R_2)}}{R_1 R_2} dS. \quad (4)$$

Jedną z właściwości optyki działającej w zakresie EUV/SXR jest zmniejszenie wartości współczynnika załamania n materiału wraz ze zmniejszaniem długości fali padającego promieniowania [14]. W tym zakresie wartość ta zaczyna być zbliżona do 1, co bezpośrednio wynika ze wzoru (5) [15], w którym β oznacza współczynnik absorpcji. Jego typowa wartość wynosi około 10^{-3} – 10^{-1} . Przykładowe wartości współczynników załamania dla kilku materiałów przy energii 60 eV (EUV, długość fali $\lambda \sim 20$ nm) zostały zestawione w tabeli 1 [16].

$$n = 1 - \delta - i\beta \quad (5)$$

TABELA 1

Wartości współczynników załamania w zakresie EUV/SXR dla trzech przykładowych materiałów przy energii 60 eV (długość fali $\lambda = 20,66$ nm) [16]

Materiał	Współczynnik δ	Współczynnik β	Współczynnik załamania n
Krzem	$2,6973 \cdot 10^{-2}$	$4,7023 \cdot 10^{-3}$	$0,9730 - i4,7023 \cdot 10^{-3}$
Molibden	$2,1581 \cdot 10^{-1}$	$1,2804 \cdot 10^{-1}$	$0,7842 - i1,2804 \cdot 10^{-1}$
Aluminium	$7,5422 \cdot 10^{-3}$	$2,3105 \cdot 10^{-3}$	$0,9925 - i2,3105 \cdot 10^{-3}$

Dzięki powyższym warunkom poziom absorpcji jest minimalizowany nawet dla materiałów o dużej wartości współczynnika β , natomiast zjawisko to jest powszechnie stosowane przy konstrukcji optyki zwierciadlanej [17]. Optyka EUV/SXR stosująca zjawisko odbicia poślizgowego charakteryzuje się wysokim poziomem aberracji. Są jednak sposoby na ich minimalizację — duże kąty odbicia poślizgowego redukują astygmatyzm, a małe apertury zmniejszają aberrację komatyczną oraz sferyczną (o ile stosowany był element optyczny o sferycznym kształcie) [18].

W zakresie widzialnym kąt Brewstera (θ_B), który określa kąt, pod jakim pada niepolaryzowane promieniowanie, a wyniku odbicia staje się ono całkowicie spolaryzowane liniowo, zapisywany jest za pomocą wzoru 6. We wzorze tym n_1 oznacza współczynnik załamania materiału, z którego kierowane jest promieniowanie na materiał o większym współczynniku załamania n_2 .

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (6)$$

W zakresie obejmującym ultrafiolet próżniowy i miękkie promieniowanie rentgenowskie z powodu niewielkich współczynników załamania kąt Brewstera zapisywany jest przy użyciu wzoru 7. W zakresie EUV kąt ten zbliżony jest do 45° [19] z uwagi na $\delta \rightarrow 0$.

$$\theta_B = \arctan(1 - \delta) \quad (7)$$

Ze względu na zwiększoną absorpcję oraz zmniejszony współczynnik załamania w zakresie EUV/SXR nie jest możliwe ogniskowanie promieniowania optycznymi elementami refrakcyjnymi [20]. Z tego powodu do formowania wiązki stosowane są elementy dyfrakcyjne, np. płytki strefowe Fresnela czy też siatki dyfrakcyjne.

W związku z wymienionymi trudnościami optyka działająca w zakresie EUV/SXR powinna być projektowana i wykonywana z uwzględnieniem wielu parametrów, które mogą wpłynąć na jej jakość i parametry. Wśród nich można wyróżnić np. chropowatość, która określa jakość wykonania i obróbki powierzchni elementu. Kolejnym parametrem jest błąd krzywizny powierzchni, występujący, gdy krzywizna elementu odbiega od idealnego wyznaczonego symulacyjnie kształtu.

Następnym parametrem jest niewspółosiowość, która wynika z niepoprawnego usytuowania elementu względem osi optycznej. Nieuwzględnienie powyższych parametrów może spowodować pogorszenie jakości obrazowania oraz wprowadzić liczne aberracje do układu optycznego [21].

Pomimo wielu trudności z projektowaniem oraz wykonywaniem elementów optycznych dotyczących omawianego zakresu spektralnego można wyróżnić wiele ich zalet. Pozwalają one na uzyskanie wysokiego kontrastu optycznego w zakresie okna wodnego (długość fali od 2,3 do 4,4 nm [22]). Jest to zakres, w którym węgiel silnie absorbuje, a woda intensywnie transmituje promieniowanie, co znajduje zastosowanie w biologii [23]. Użycie w układzie optyki rentgenowskiej pozwala na obrazowanie z wysoką rozdzielczością przestrzenną r (zgodnie z kryterium Rayleigha [24]), co bezpośrednio wynika ze wzoru 8, w którym λ oznacza długość fali, a NA aperturę numeryczną wyrażaną jako iloczyn współczynnika załamania oraz sinusa kąta padania θ , mierzzonego do normalnej.

$$r = \frac{0.61\lambda}{NA} = \frac{0.61\lambda}{n\sin\theta}. \quad (8)$$

Reasumując, optyka dotycząca zakresu EUV/SXR różni się od konwencjonalnych rozwiązań stosowanych na zakres widzialny. Wymaga uwzględnienia wielu parametrów przy jej projektowaniu oraz wykonywaniu. Wśród elementów optycznych można wyróżnić filtry optyczne, zwierciadła wielowarstwowe, siatki dyfrakcyjne oraz płytki strefowe Fresnela, które zostały szerzej opisane w rozdziale 3.

3. Optyka EUV/SXR

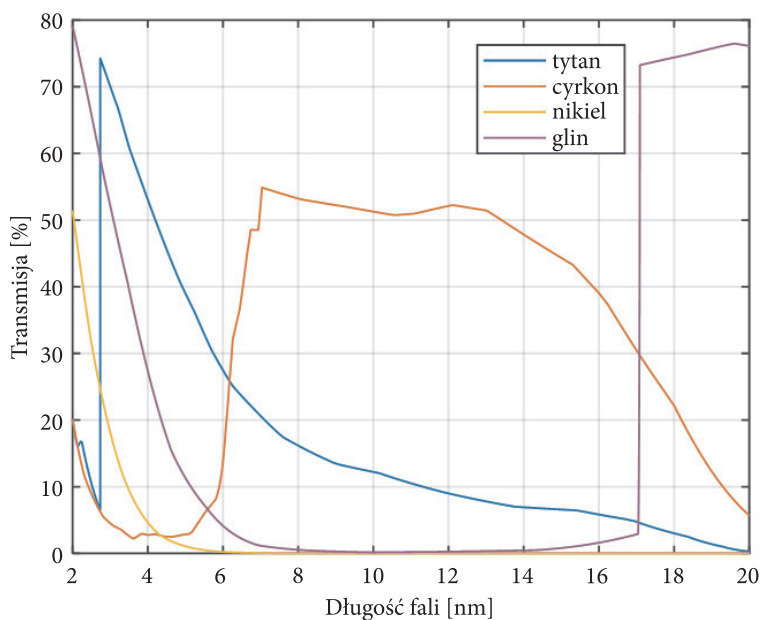
Elementy optyczne można podzielić, biorąc jako kryterium zjawiska fizyczne, na których opiera się ich działanie. W zakresie obejmującym EUV i SXR można wyróżnić elementy transmisyjne, odbiciowe, dyfrakcyjne oraz rozwiązania hybrydowe.

Elementy transmisyjne to takie, które przepuszczają jakąś część promieniowania. Do tej kategorii należą filtry optyczne. Elementy odbiciowe wykorzystują zjawisko odbicia do dalszego kształtowania wiązki. Do tej kategorii również należą zwierciadła, w tym zwierciadła wielowarstwowe oparte na zjawisku konstruktywnej interferencji promieniowania częściowo odbitego od poszczególnych warstw. Do elementów dyfrakcyjnych należą płytki strefowe Fresnela oraz siatki dyfrakcyjne. Rozwiązania hybrydowe łączą w sobie kilka z opisanych wcześniej właściwości.

Elementy optyczne związane z zakresem EUV/SXR można również podzielić pod kątem ich zastosowania. Mogą być wykorzystane do kolimacji, ogniskowania (skupiania), monochromatyzacji, filtracji promieniowania. Szczegółowe zastosowania optyki EUV/SXR zostały omówione w rozdziale 4.

3.1. Filtry optyczne

Filtr optyczny jest instrumentem umieszczanym na linii układu optycznego w celu filtracji wybranych długości fali padającego promieniowania. Jego działanie opiera się na zjawisku transmisji i absorpcji. Te filtry wykonywane są w technologii cienkowarstwowej, która polega na wykorzystaniu pojedynczej cienkiej (kilkadziesiąt do kilkuset nanometrów) warstwy materiału lub też naprzemiennym naporowaniu na siebie dwóch lub więcej cienkich warstw wybranych materiałów, w celu „dopasowania” charakterystyki transmisyjnej do danego eksperymentu i konkretnych potrzeb. Filtry optyczne występują czasem w postaci folii [25] lub też warstwy czy warstw naporowanych próżniowo na membrany, np. z krzemu lub azotku krzemu [26].

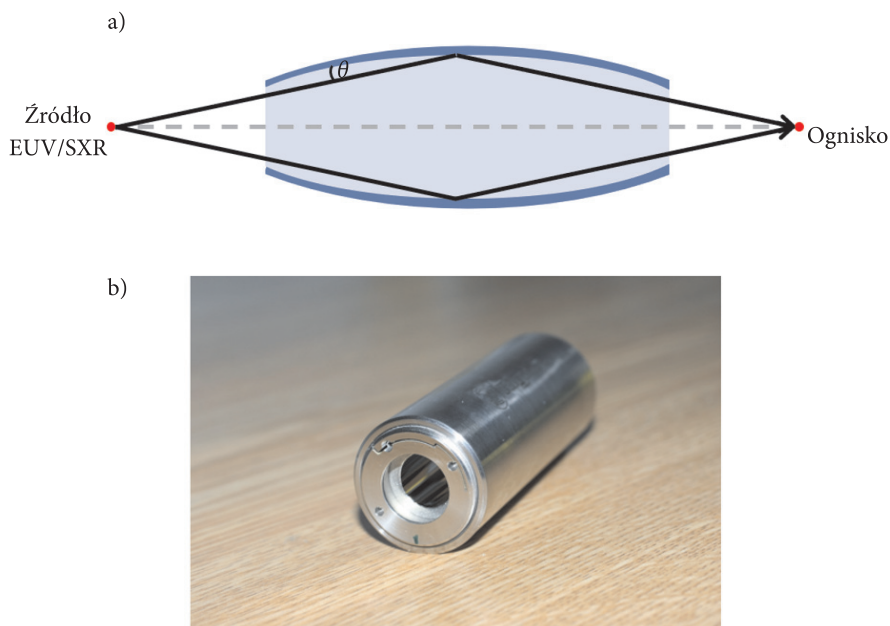


Rys. 2. Zależność transmisji wybranych materiałów o grubości 200 nm od długości fali

Podczas procesu projektowania filtra na zakres EUV/SXR należy dobrać materiały i ich grubości w zależności od pożądanej charakterystyki spektralnej. Przykład spektralnej transmisji kilku typowych materiałów o grubości 200 nm w zakresie długości fali od 2 do 25 nm przedstawia rysunek 2. Do wykonania nanowarstw stosuje się najczęściej technikę CVD (ang. *chemical vapour deposition*) bądź PVD (ang. *physical vapour deposition*). Technika CVD polega na wprowadzeniu do komory substratów, gdzie pod wpływem wysokiej temperatury zachodzą odpowiednie reakcje chemiczne [27]. W przypadku PVD do komory próżniowej wprowadzany jest gaz, który dzięki adhezji krystalizuje się na podłożu [28].

3.2. Zwierciadła

W zakresie EUV/SXR stosowane są różnego rodzaju zwierciadła oraz układy zwierciadeł w zależności od ich planowanego zastosowania. Wykorzystują one zjawisko odbicia do ogniskowania oraz kolimowania promieniowania lub dalszego kierowania wiązki. Zazwyczaj wykonywane są z materiałów o wysokim współczynniku odbicia. W przypadku promieniowania o długości pojedynczych nanometrów wymagane jest zastosowanie zwierciadeł zapewniających odbicie poślizgowe, zaś wymogi dotyczące chropowatości powierzchni o kilka rzędów wielkości przewyższają typowe parametry powierzchni odbijających w zakresie widzialnym lub bliskiej podczerwieni [29]. Chropowatość często wyrażana jest jako ułamek długości fali. Najlepsze zwierciadła, które można zakupić na rynku, charakteryzują się chropowatością rzędu $\lambda/10$. Jednak są one droższe i trudniejsze do wykonania niż elementy o chropowatości $\lambda/4$.

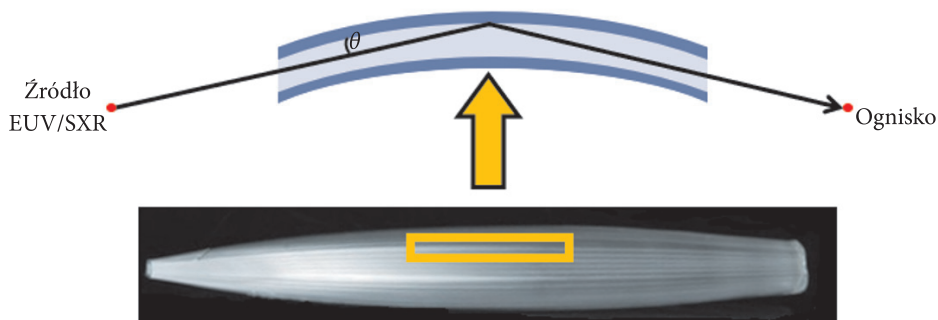


Rys. 3. a) Bieg promieni świetlnych wewnątrz zwierciadła elipsoidalnego oraz b) przykładowe zwierciadło elipsoidalne

Ze względu na kształt powierzchni zwierciadła można podzielić na płaskie [30], wklęsłe i wypukłe [31]. Biorąc pod uwagę rodzaj krzywizny, wśród zwierciadeł wklęsłych i wypukłych można rozróżnić sferyczne [32], eliptyczne [33], paraboliczne [34] oraz hiperboliczne [35] lub ich kombinacje, np. zwierciadła Woltera [36].

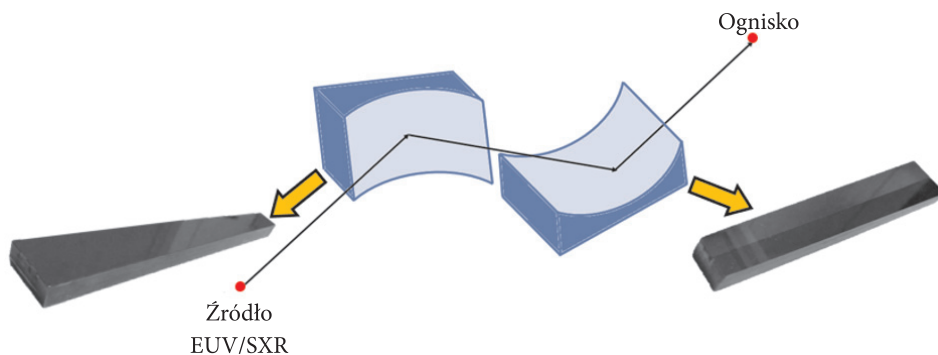
Zwierciadła wspomniane wcześniej najczęściej występują w geometrii o symetrii radialnej (obrotowej) jako elipsoidalne [37] (przedstawione na rysunku 3a oraz 3b), paraboloidalne [38] i hiperboloidalne [39]. Ponadto można je podzielić ze względu na konstrukcję: pojedyncza warstwa odbijająca [40], okresowo wielowarstwowe [41] lub aperiodyczne [42].

Częstym rozwiązaniem zapewniającym kolimację oraz uzyskanie doskonale ograniczonego dyfrakcyjnie rozkładu w ognisku są zwierciadła mono- i polikapilarne (rys. 4). Optyka polikapilarna składa się z układu wielu zakrzywionych kanalików. Wewnątrz nich kąty padania muszą być mniejsze od kąta krytycznego, a zatem systemy te wykorzystują zjawisko odbicia poślizgowego. Kąt padania wzrasta wraz ze średnicą kanalika, dlatego wymagane są ich niewielkie rozmiary — typowo średnica od 2 μm do 50 μm [43]. Promieniowanie, opuszczając każdy z kanalików, skupiane jest następnie w płaszczyźnie obrazowej. Podobnym instrumentem są zwierciadła monokapilarne, które składają się z tylko jednego kanalika, wewnątrz którego zachodzi proces odbicia poślizgowego. Dąży się do minimalizacji liczby odbić wewnątrz kapilary, tak aby sygnał wyjściowy był jak największy. W tym celu kapilara może zostać uformowana w kształt paraboloidy bądź elipsoidy obrotowej, co zapewnia tylko jedno odbicie wewnątrz elementu [44].

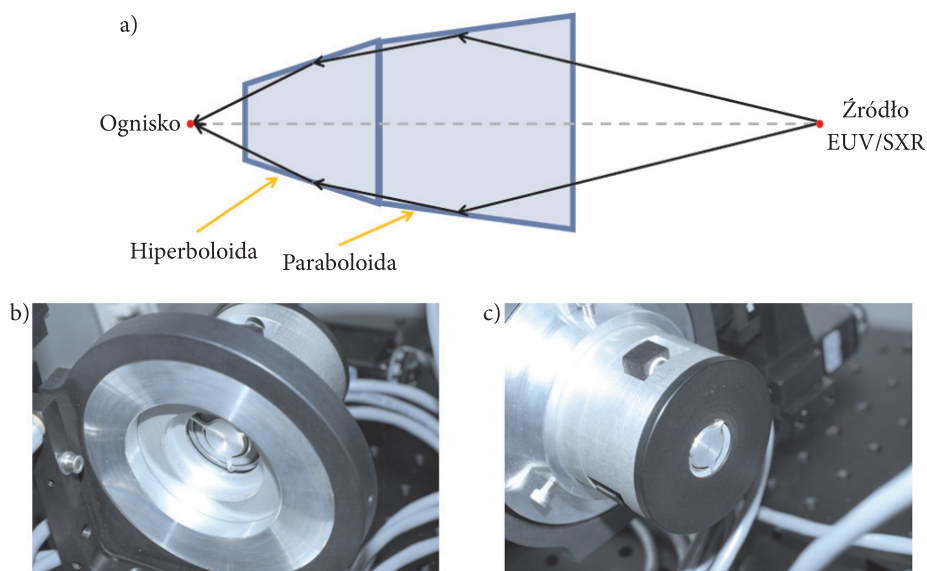


Rys. 4. Bieg promieni świetlnych wewnątrz zwierciadła monokapilarnego lub pojedynczego kanaliku zwierciadła polikapilarnego. Zmodyfikowano na bazie [45]

W 1948 r. P. Kirkpatrick oraz A.V. Baez zaproponowali układ co najmniej dwóch zwierciadeł skupiających bądź kolimujących promieniowanie w osi poziomej i pionowej [46]. Najczęściej system składa się z wklęsłych zwierciadeł — parabolicznych (gdy promieniowanie ma zostać skolimowane) lub eliptycznych (gdy promieniowanie ma zostać skupione), które odbijają pod kątem odbicia poślizgowego. Zwierciadła obrócone są względem osi optycznej o 90° , co zapewnia minimalizację astygmatyzmu [47]. Schemat systemu Kirkpatrick-Baez został zaprezentowany na rysunku 5. System ten jest stosowany w układach wymagających niewielkich strat intensywności przy jednoczesnym skupieniu wiązki do ogniska o małych rozmiarach.



Rys. 5. Schemat działania systemu Kirkpatrick–Baez wraz ze zdjęciami zwierciadeł stosowanych w tego typu systemach. Zmodyfikowano na bazie [48]



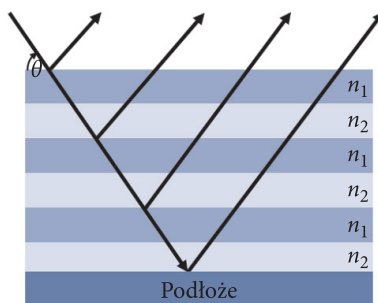
Rys. 6. a) Bieg promieni świetlnych w obiektywie Woltera typu pierwszego oraz b), c) obiektyw Woltera umieszczony w układzie laboratoryjnym

W 1952 r. Wolter zaproponował system zwierciadłany oparty na dwóch zwierciadłach osiowoosymetrycznych działających na podstawie odbicia poślizgowego [49]. Pierwsze z nich miało kształt paraboloidalny, a drugie hiperboloidalny/elipsoidalny w zależności od typu obiektywu. Obiektyw Woltera pierwszego typu został przedstawiony na rysunku 6a wraz z przykładem obiektywu Woltera zastosowanego w układzie laboratoryjnym (rysunek 6b i 6c). Rozwiązanie zaproponowane przez Woltera umożliwia np. obrazowanie w zakresie EUV/SXR.

3.2.1. Zwierciadła wielowarstwowe

Zarówno w zakresie widzialnym, jak i w zakresie EUV/SXR powszechnym rozwiązaniem są zwierciadła wielowarstwowe. Zazwyczaj składają się z naprzemiennych warstw co najmniej dwóch materiałów. Między warstwami dochodzi do interferencji fali padającej i odbitej od danej warstwy, która może spowodować zwiększenie (interferencja konstruktywna) bądź zmniejszenie (destruktywna) refleksyjności danego elementu dla danej długości fali, co w perspektywie wpływa na odpowiedź spektralną struktury wielowarstwowej. W zakresie widzialnym ważnym aspektem jest, aby różnica współczynników załamania obu materiałów była jak największa. W zakresie EUV/SXR ze względu na to, że współczynniki załamania są ~ 1 , aspekt ten jest trudny do osiągnięcia, jednakże nadal dąży się do tego, aby różnica współczynników załamania była stosunkowo duża, np. z wykorzystaniem warstw molibdenu Mo i krzemu Si. Powodem stosowania tej pary materiałów jest duża różnica w ich liczbach atomowych (Mo $Z = 42$, Si $Z = 14$) [50] oraz stosunkowo duża różnica wartości ich współczynników delta (np. $\delta_{\text{Mo}} = 0,0768$, a $\delta_{\text{Si}} = 0,0012$ przy długości fali równej $\lambda \approx 13,5$ nm). Warstwy materiałów w takim elemencie powinny być bardzo cienkie, co wynika z długości absorpcji, która odpowiada za taką grubość materiału, na której intensywność wiązki maleje e-krotnie. Ponadto, w celu poprawy współczynnika odbicia i wpływu na kształt charakterystyki odbiciowej, stosuje się najczęściej powielenie struktury dwóch warstw, np. Mo/Si od kilku do kilkudziesięciu razy [51]. Przykładowe zwierciadło wielowarstwowe zostało zaprezentowane na rysunku 7.

Zwierciadła wielowarstwowe mogą zostać wykonane z pomocą tych samych technik, które omówiono w rozdziale o filtrach optycznych — CVD i PVD.



Rys. 7. Schematyczny bieg promieni świetlnych w zwierciadle wielowarstwowym wykonanym z dwóch materiałów o różnych współczynnikach załamania — n_1 i n_2

3.3. Siatki dyfrakcyjne

Siatki dyfrakcyjne (rys. 8) to elementy optyczne, w których zjawisko dyfrakcji zachodzi na periodycznej strukturze (strukturze, w której następuje przestrzenna modulacja współczynnika załamania). W najprostszej postaci można ją sobie wyobrazić jako zbiór równo oddalonych od siebie szczelin. Promieniowanie na każdej ze szczelin ulega zjawisku dyfrakcji, które skutkuje zmianą kierunku rozchodzenia się fali. Jednym z istotnych parametrów tego typu elementów jest okres powtarzalności takiej struktury lub też stała siatki dyfrakcyjnej d , która definiuje liczbę linii (szczelin) na milimetr. Według najprostszego podziału siatki dzielą się na transmisyjne (rys. 8a) oraz odbiciowe (rys. 8b).

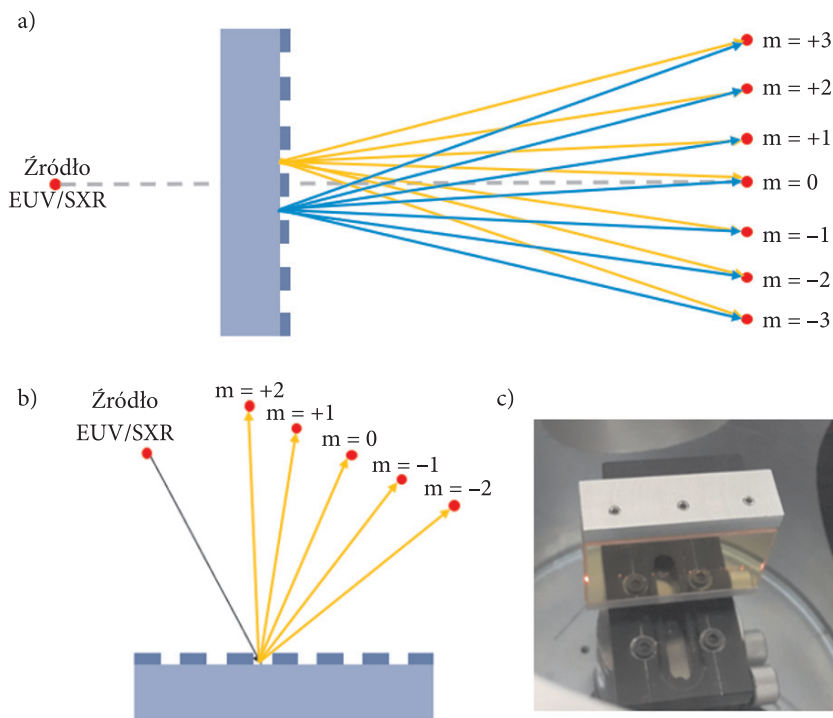
W przypadku siatek transmisyjnych wiązkę padającego promieniowania po przejściu przez siatkę można zaobserwować jako rząd prążków o różnych poziomach intensywności. Typowo najbardziej intensywny jest prążek reprezentujący zerowy rząd widma. Pierwsze prążki po obu stronach prążka zerowego, centralnego, odpowiadają pierwszemu rzędowi widma itd. Aby określić miejsce występowania kolejnych prążków, należy skorzystać z równania 9, w którym m oznacza numer rzędu widma, a α kąt, pod którym można zaobserwować prążek dla analizowanego rzędu widma względem prążka centralnego.

$$d \sin \alpha = m \lambda \quad (9)$$

Dyfrakcyjne siatki odbiciowe wykorzystują zjawisko dyfrakcji zachodzące przy odbiciu wiązki od struktury siatki. Niewymagane jest ograniczanie ich grubości, dlatego wykonywane są w inny sposób oraz stosuje się inne materiały, które mają bezpośredni wpływ na rodzaj oddziaływania promieniowania z materią — transmisję lub odbicie. Zasadę działania siatki opartej na zjawisku odbicia opisuje wzór (10), w którym α oznacza kąt padania promieniowania, a β kąt odbicia promieniowania. Kąty te mierzone są od normalnej.

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m \lambda \quad (10)$$

W zakresie EUV/SXR siatki dyfrakcyjne najczęściej stosowane są do separacji różnych składowych spektralnych padającej wiązki. Większość siatek dyfrakcyjnych na zakres długości fali poniżej 30 nm to siatki odbiciowe w konfiguracji *grazing incidence* [52], które charakteryzują się kątami $\alpha \sim 90^\circ$, chociaż istnieją siatki dyfrakcyjne na zakres SXR pracujące w trybie transmisyjnym, wykonane np. z PMMA na warstwie z azotku krzemu [53], ze złota [54] lub całkowicie z azotku krzemu Si_3N_4 [55]. Siatki transmisyjne mogą w tym zakresie spełniać funkcję filtrów oraz polaryzatorów [56].



Rys. 8. Bieg promieni w siatce dyfrakcyjnej: a) transmisyjnej, b) odbiciowej oraz c) odbiciowa siatka dyfrakcyjna umieszczona w komorze układu laboratoryjnego

Ważnym parametrem siatek dyfrakcyjnych jest ich wydajność dyfrakcyjna. Można ją wyznaczyć jako intensywność promieniowania danego rzędu dyfrakcyjnego do intensywności promieniowania padającego na siatkę. Dąży się do maksymalizacji tego współczynnika. Na jego wartość w największym stopniu wpływ ma wykonanie siatki — kształt, materiał i geometria. Istotnym parametrem jest również rozdzielczość spektralna (widmowa) siatek, którą najprościej można określić jako szerokość RMS (ang. *root mean square* — średniokwadratowa) prążka dla danego niezerowego rzędu dyfrakcyjnego unormowana do wartości długości fali (lub energii fotonów), jaka mu odpowiada ($\Delta\lambda/\lambda$ lub $\Delta E/E$). Często podaje się także wartości odwrotne jako miarę rozdzielczości widmowej.

Siatki dyfrakcyjne można podzielić ze względu na ich okres na siatki amplitudowe i fazowe. W siatce amplitudowej występuje okresowa zmienność transparentności — amplitudy, za którą odpowiedzialna jest część urojona współczynnika załamania, natomiast siatka fazowa ma okresowy profil krzywizny wyrażony kształtem bądź rozkładem części rzeczywistej współczynnika załamania. Można też wyróżnić siatki o sinusoidalnych bądź prostokątnych profilach linii. Ponadto często stosowanym

rozwiązaniem są siatki poślizgowe (karbowane) — ang. *blazed* [57]. Siatki dyfrakcyjne można również podzielić według ich kształtu: na płaskie (ang. *plane grating*) oraz wklęsłe (ang. *concave grating*). Siatki wklęsłe łączą właściwości dyspersyjne oraz skupiające, dlatego są często stosowane do obrazowania [58]. Występują siatki wklęsłe sferyczne, toroidalne oraz elipsoidalne [59]. Jednym z rodzajów siatek dyfrakcyjnych są również siatki holograficzne, które charakteryzują się sinusoidalnym profilem linii [60]. Pozwalają one na uzyskanie obrazu dyfrakcyjnego niemal pozbawionego aberracji [61]. Przykładowa siatka dyfrakcyjna umieszczona w komorze układu laboratoryjnego została przedstawiona na rysunku 8c.

Wykonanie siatki dyfrakcyjnej na zakres EUV/SXR wymaga nanometrowej precyzji w rozstawie linii. W procesie wykonania najprostszyc siatek dyfrakcyjnych na substrat nanosi się fotorezyst, na którym wiązka laserowa generuje wzór interferencyjny [62] lub też skupiona wiązka elektronowa wytwarza wzór [63]. Następnie w procesie chemicznym usuwany jest selektywnie naświetlony bądź nienaświetlony fotorezyst [64]. Istnieją również inne techniki, np. *molding* [65], wytwarzanie linii metodami mechanicznymi [66] itd. Natomiast efekt jest zawsze podobny — w postaci okresowej modulacji powierzchni materiału.

3.4. Płytki strefowe Fresnela

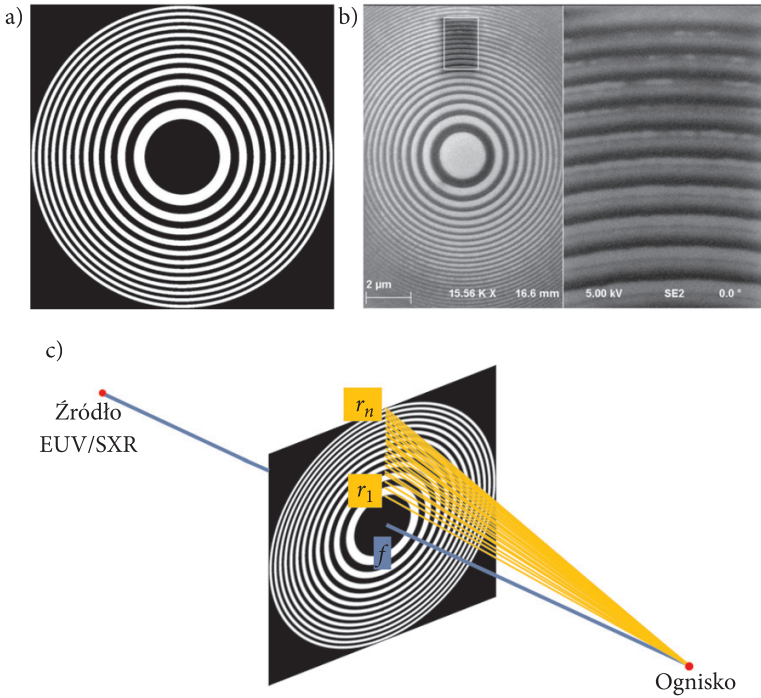
Płytki strefowe Fresnela (ang. *Fresnel zone plate* — FZP) to elementy optyczne stosowane w zakresie EUV/SXR do skupiania promieniowania przy użyciu zjawiska dyfrakcji. W standardowej konfiguracji FZP składa się z kilku radialnie symetrycznych pierścieni, które nazywane są strefami. Naprzemiennie występują strefy „przezroczyste” (o dużym współczynniku transmisji) i „nieprzezroczyste” (o dużym współczynniku absorpcji), tak jak zostało to zilustrowane na rysunku 9. Strefy te modulują promieniowanie elektromagnetyczne tak, że pomiędzy sąsiednimi strefami zachodzi interferencja.

Promień kolejnych stref r_n określany jest przez wzór 11, w którym n oznacza kolejną strefę, λ — długość fali, a f ogniskową.

$$r_n = \sqrt{n\lambda f + \frac{n\lambda^2}{4}}. \quad (11)$$

Aby dostosować rozdzielczość FZP do planowanego zastosowania, należy dobrać odpowiednią liczbę stref S zgodnie ze wzorem 12, w którym w oznacza rozdzielczość.

$$S = \frac{\lambda f}{4w^2}. \quad (12)$$



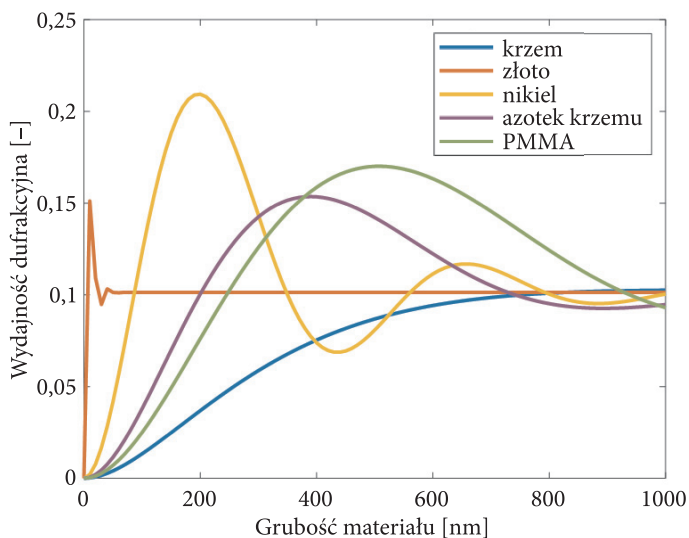
Rys. 9. a) Układ kolejnych przezroczystych i nieprzezroczystych stref w standardowej konfiguracji FZP, b) zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiające płytkę strefową Fresnela wykonaną w Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii (CEZAMAT) oraz c) bieg promieni świetlnych po skupieniu przez FZP

Uzyskanie oczekiwanej wydajności dyfrakcyjnej jest możliwe dzięki wykonaniu FZP z materiału o odpowiedniej grubości, który zapewnia wysoką wydajność dyfrakcyjną dla wybranej długości fali. Wydajność dyfrakcyjna (η_m) określana jest wzorem Kirza (13) [67], w którym m to rząd dyfrakcji, β oraz δ to wcześniej opisane współczynniki definiujące wartość współczynnika załamania danego materiału, a φ to kąt obliczany ze wzoru (14), gdzie t oznacza grubość materiału.

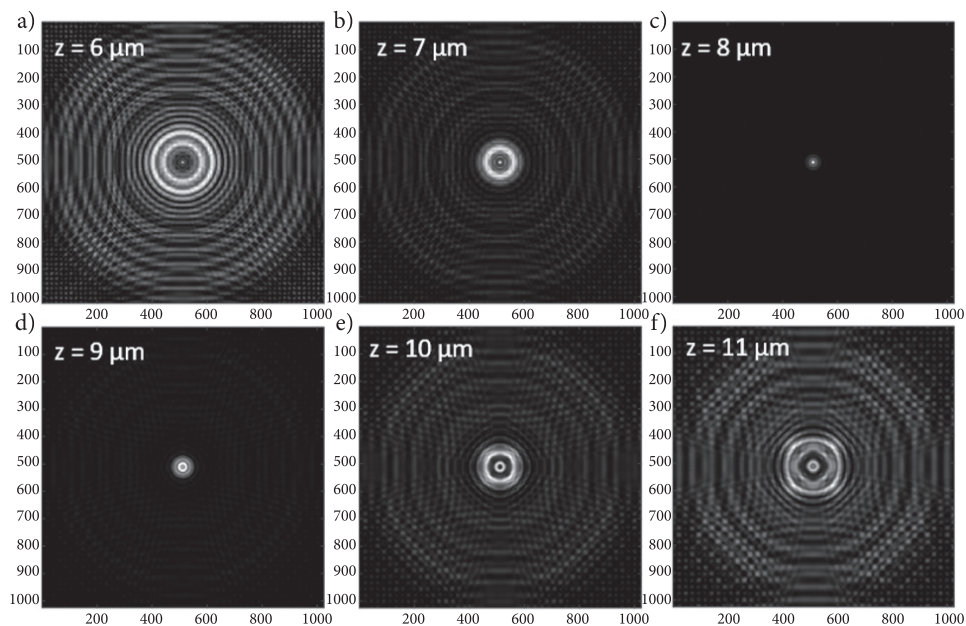
$$\eta_m = \frac{1}{m^2 \pi^2} (1 + e^{-2\varphi\beta/\delta} - 2e^{-\varphi\delta/\delta} \cos\varphi) \quad (13)$$

$$\varphi = 2\pi t\delta/\lambda \quad (14)$$

Na rysunku 10 przedstawiona została obliczona ze wzoru Kirza wydajność dyfrakcyjna dla FZP wykonanych z kilku materiałów przy oddziaływaniu z promieniowaniem o długości fali 2,8 nm. Można zauważyć, że najlepszą wydajność osiąga płytka strefowa wykonana z niklu o grubości około 200 nm.



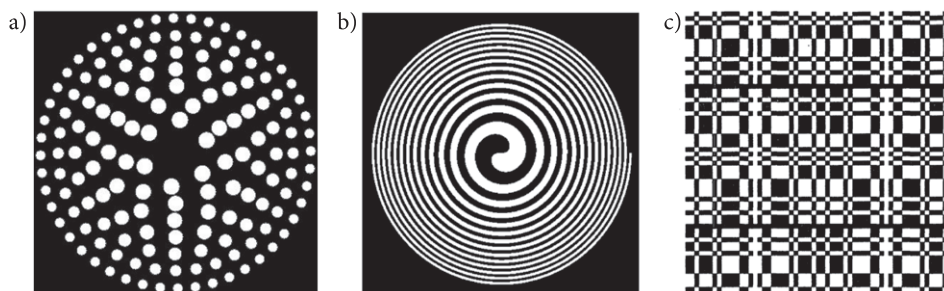
Rys. 10. Wykres ilustrujący wydajność dyfrakcyjną płytek strefowych Fresnela wykonanych z kilku materiałów dla promieniowania o długości 2,8 nm



Rys. 11. Przykład użycia algorytmu dyfrakcyjnego, aby sprawdzić miejsce występowania ogniska dla przykładowej płytki strefowej Fresnela przy długości fali równej 5 nm

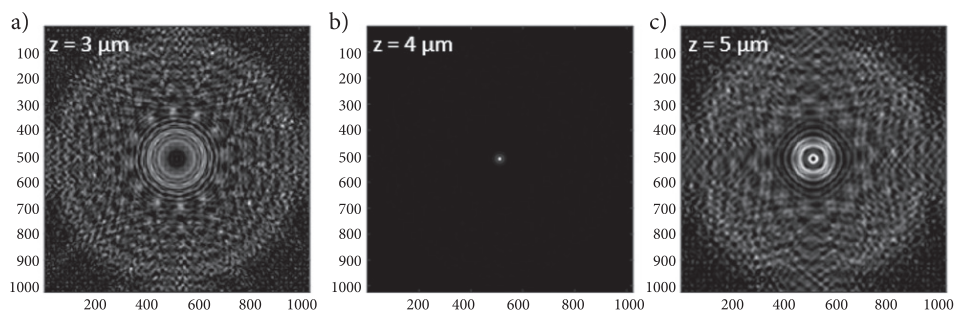
Do przeprowadzenia symulacji komputerowej często stosowane są algorytmy dyfrakcyjne, które pozwalają sprawdzić, czy parametry optyczne i geometryczne zaproponowanej struktury spełniają założenia projektowe. Pozwalają one zwerifikować profile rozkładu intensywności [68] oraz SNR (ang. *signal-to-noise ratio*) w zależności od odległości od płytki strefowej Fresnela, a także określić punkt występowania jej ogniska [69]. Ponadto umożliwiają uzyskanie informacji o rozdzielczości, wydajności dyfrakcyjnej oraz polu widzenia FZP [70]. Przykład użycia algorytmu dyfrakcyjnego [68], aby sprawdzić miejsce występowania ogniska FZP przy oświetlaniu wiązką o długości fali równej 5 nm został przedstawiony na rysunku 11, gdzie z oznacza dystans wzdłuż osi optycznej. Można zauważyć, że najmniejsze ognisko występuje przy $z = 8 \mu\text{m}$, a niewielka zmiana tego parametru wpływa na zmniejszenie jakości obrazowania elementu.

Płytki strefowe oprócz swojej standardowej konfiguracji mogą również występować w formie sitowej (ang. *photon sieve*) [71] — rysunek 12a, spiralnej — rysunek 12b [72] oraz jako płytki niesymetryczne radialnie, takie jak URA (ang. *uniformly redundant arrays*) — rysunek 12c [73].



Rys. 12. Płytki strefowe w konfiguracji: a) sitowej [71], b) spiralnej [72] oraz c) URA [73]. Zaadaptowano za zgodą © The Optical Society

Sitowe płytki strefowe dzięki powiększeniu ich średnicy zewnętrznej umożliwiają dokładniejsze ogniskowanie niewielkiego rozmiaru struktur oraz poprzez zmianę gęstości i średnicy otworów pozwalają na tłumienie wtórnych maksimum i wyższych rzędów dyfrakcyjnych [74]. Przykład ogniskowania z pomocą sitowej płytki strefowej zaprezentowano na rysunku 13. Symulacja została wykonana na podstawie algorytmu dyfrakcyjnego [68], gdzie założono długość fali równą 10 nm. Spiralne ZP stosowane są w mikroskopii, ponieważ pozwalają na wykrywanie efektów fazowych oraz na izotropowe wzmocnienie krawędzi [75]. URA różnią się od FZP funkcją przenoszenia modulacji (MTF — ang. *modulation transfer function*). MTF płytki typu URA jest taka sama jak MTF pojedynczego pinhole'a, co wpływa na to, że jest ona mniej podatna na zakłócenia. Ponadto URA zapewnia lepsze wykorzystanie powierzchni detektora, zachowując pełną rozdzielczość kątową, podczas gdy FZP musi być mniejsza niż detektor [76].



Rys. 13. Przykład użycia algorytmu dyfrakcyjnego, aby sprawdzić miejsce występowania ogniska dla przykładowej sitowej płytki strefowej przy długości fali równej 10 nm

Istnieją różne metody wykonania tego typu struktur. Jedną z nich jest elektronolitografia — EBL (ang. *electron beam lithography*). W tej metodzie nie stosuje się masek wytworzonych na podłożu, ponieważ wzór na rezyście jest wytwarzany dzięki sterowaniu wiązką elektronów za pomocą pola magnetycznego lub/i elektrycznego, co indukuje chemiczną przemianę fotorezystu wskutek absorpcji energii elektronów. Dzięki tej metodzie możliwe jest uzyskanie wysokiej rozdzielczości, która uzależniona jest od szerokości wiązki elektronowej oraz jej interakcji z rezystem [77]. W nowych rozwiązaniach EBL stosowane są wewnętrzne maski wirtualne, które przyspieszają proces zapisu oraz wytwarzania elementów [78].

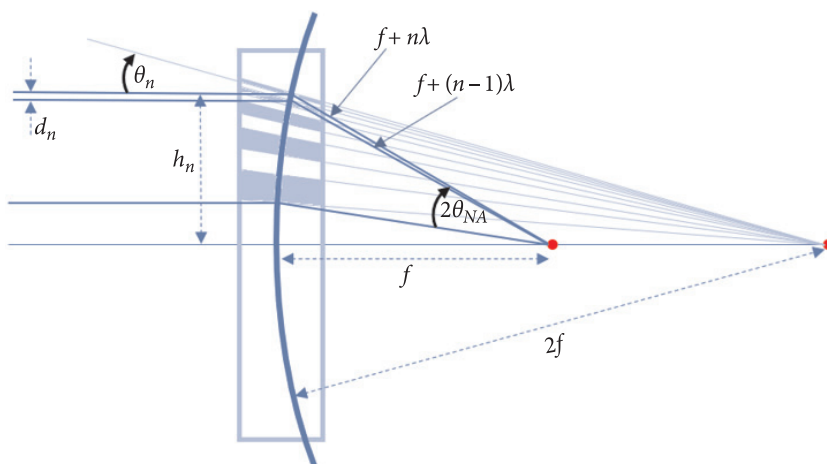
3.5. Rozwiązania hybrydowe

Coraz częściej słyszy się o elementach optycznych, które łączą w sobie kilka z opisanych wcześniej rozwiązań. Można tu wyróżnić płytkę strefową Fresnela o profilu siatki dyfrakcyjnej wykonaną w technologii wielowarstwowej [79]. Taki element może zostać użyty do spektroskopii rentgenowskiej.

Kolejnym z rozwiązań hybrydowych jest wielowarstwowa soczewka Laué'a (ang. *Multilayer Laue Lens* — MLL), która podobnie jak płytkę strefową Fresnela skupia promieniowanie przy użyciu zjawiska dyfrakcji [80]. MLL wykonywana jest w technologii wielowarstwowej. Soczewka ta może skupić promieniowanie do plamki o rozmiarach poniżej 10 nm przy odpowiednio dużej aperturze numerycznej, pozwalając uzyskać rozdzielczość rzędu pojedynczych nanometrów [81]. Przykładowy schemat MLL został przedstawiony na rysunku 14.

Innym zastosowaniem hybrydowym jest kamera plenoptyczna, która łączy w sobie cechy kilku optyk. Zawiera główny element skupiający oraz matrycę mikrosoczewek umożliwiającą zmianę głębi ostrości po wykonaniu zdjęcia. W zakresie krótkofalowym kamery plenoptyczne stosowane są w układach mikroskopowych. Jeden z nich został skonstruowany na bazie dwóch zwierciadeł polikapilarnych oraz matrycy otworów (ang. *pin-hole*) [82]. Mikroskop ten umożliwia obrazowanie

małych cząstek w dużych próbkach i może być stosowany do obrazowania słabo absorbujących obiektów biologicznych. Na zakres miękkiego promieniowania rentgenowskiego zaproponowano również mikroskop stosujący kamerę plenoptyczną składającą się z pojedynczej płytki strefowej Fresnela oraz matrycy mniejszych FZP [83]. Mikroskop ten został utworzony w celu obrazowania w zakresie okna wodnego.



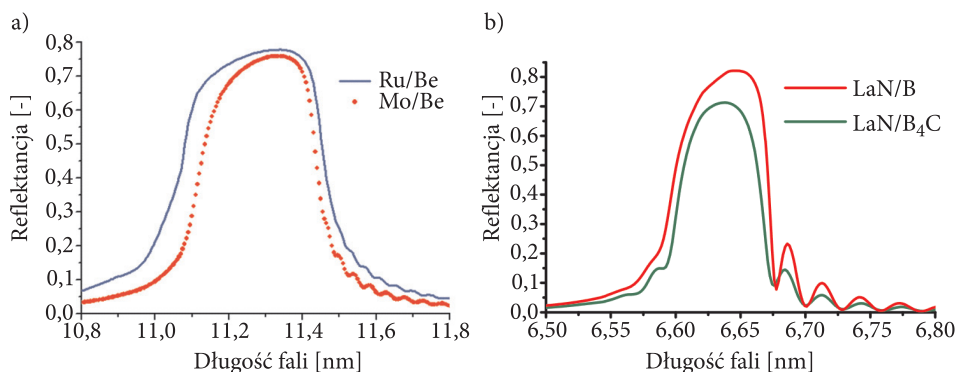
Rys. 14. Schemat wielowarstwowej soczewki Laue'a. Na podstawie rysunku z [81]

4. Zastosowania

Elementy optyczne dotyczące zakresu obejmującego ultrafiolet próżniowy i miękkie promieniowanie rentgenowskie ze względu na swoją specyfikę działania znajdują zastosowanie w wielu obszarach nauki i przemysłu. Filtry optyczne i zwierciadła wielowarstwowe są wykorzystywane w fotolitografii. Do badań i obserwacji przestrzeni kosmicznej często używane są układy teleskopowe zawierające filtry optyczne i zwierciadła (również w konfiguracji Woltera). Także w mikroskopach, spektroskopach oraz tomografach na zakres EUV/SXR stosowane są różnego rodzaju elementy optyki dyfrakcyjnej. Różne elementy optyczne wykorzystywane są też w źródłach synchrotronowych i laserach na swobodnych elektronach, a także w układach służących do diagnostyki plazmy. Przykłady implementacji optyki EUV/SXR w wymienionych obszarach nauki zostały szczegółowo omówione w tym rozdziale.

• Fotolitografia

Celem fotolitografii jest wykonanie struktury o wcześniej zdefiniowanym wzorze. To wieloetapowy proces składający się między innymi z nałożenia warstwy fotorezystu, późniejszego jej wygrzewania, naświetlania, wywołania, wytrawiania oraz usuwania pozostałej warstwy fotorezystu [84]. Przy naświetlaniu używana jest fotomaska, która definiuje wzór na fotorezycie. Do naświetlania często stosowane jest promieniowanie z zakresu EUV/SXR z uwagi na mniejszą długość fali i przesunięcie granicy dyfrakcyjnej do skali nanometrowej [85]. Aby wyselekcjonować promieniowanie z wymienionego zakresu, konieczne jest zastosowanie odpowiedniego filtra lub zwierciadła.



Rys. 15. Wykresy zależności refleksyjności wybranych par materiałów od długości fali do litografii na: a) 11,2 nm oraz b) 6,7 nm. Zaadaptowano z a) AIP Advances [89] oraz b) EUV Litho [86]

Z długości fali, dla której przeprowadzany jest proces fotolitografii, można wyróżnić $\lambda = 13,5$ nm. Do selekcji widma o takiej długości fali zaproponowano wielowarstwowy filtr z cyrkonu i krzemu (Zr/Si), który zapewnia transmisję do 78% [87]. Dla zbliżonej długości fali (13,4 nm) zaproponowano również zwierciadło wielowarstwowe wykonane z molibdenu i krzemu (Mo/Si). Zapewniało ono odbicie na poziomie 66% [88]. Kolejną zaproponowaną niedawno fotolitograficzną długością fali jest 11,2 nm. W tym zakresie stosowane są między innymi zwierciadła wielowarstwowe z molibdenu i berylu (Mo/Be) zapewniające nawet 70,25% odbicia dla tej długości fali (rysunek 15a) [89, 90].

W zakresie EUV dla długości fali 13,5 nm do fotolitografii procesorów stosowane są steppery [91]. To nowoczesne instrumenty o dużych gabarytach zbudowane na podstawie źródła wyladowczego produkującego plazmę w ksenonie (Xe) i wykorzystujące zwierciadła Mo/Si [92]. Steppery EUV umożliwiają pracę z wysokoenergetycznym promieniowaniem, dużą częstotliwością repetycji oraz długotrwałą eksploatacją w połączeniu z nanometrową rozdzielczością [93].

Proces fotolitograficzny może zostać wykonany z większą rozdzielczością dzięki zastosowaniu mniejszej długości fali, co potwierdza wzór 8. Taką długością jest 6,5-6,7 nm. Dzięki użyciu wielowarstwowego zwierciadła z lantanu i węgla boru ($\text{La/B}_4\text{C}$) udało się osiągnąć odbicie na poziomie 58,6% dla długości fali 6,7 nm [94]. Tymczasem zwierciadło wykonane z azotku lantanu i boru (LaN/B) pozwoliło osiągnąć odbicie na poziomie 58,5% dla długości fali 6,65 nm (rysunek 15b) [95].

• Badania kosmosu

Badanie kosmosu z roku na rok staje się coraz popularniejszym działem nauki i ma również ogromne znaczenie gospodarcze. Co roku do przestrzeni kosmicznej wysyłane są różnego rodzaju satelity. Wiele z nich wyposażonych jest w zróżnicowane urządzenia optoelektroniczne. Misje obserwacyjne mogą służyć do osiągnięcia wielu celów — obserwacji Ziemi, dalekich obiektów kosmicznych czy Słońca. Aby obserwować wybrany cel, najczęściej należy zastosować odpowiedni filtr przepuszczający promieniowanie z interesującego dla eksperymentu zakresu. Misja kosmiczna KORTES, której start został zaplanowany na 2024 rok, będzie miała na celu badanie zjawisk zachodzących na Słońcu — erupcji, rozbłysków oraz koronalnych wyrzutów masy. Obserwacja będzie prowadzona w zakresie długości fal od 0,044 do 58,4 nm. Niepożądane promieniowanie z zakresu widzialnego i podczerwonego będzie odcinane za pomocą filtrów wejściowych wykonanych z MoSi_2/Al [96].

Satelita ROSAT wystrzelony w 1990 roku miał skatalogować źródła promieniowania rentgenowskiego oraz EUV w przestrzeni kosmicznej. Na jego pokładzie umieszczony został teleskop rentgenowski oraz szerokokątna kamera. Wewnątrz niej znalazło się osiem filtrów pasmowo-przepustowych wykonanych z różnych materiałów. Najczęściej podłożem był poliwęglan, na który naniesiona została cienka warstwa, np. węgla, węgla boru, aluminium czy berylu (tabela 2) [97].

TABELA 2

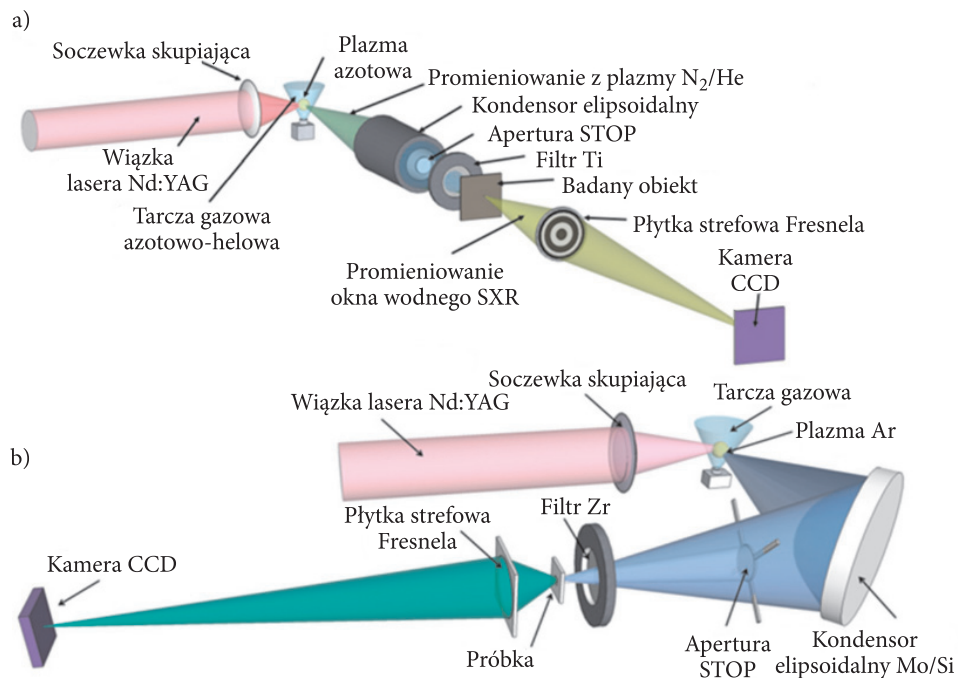
Lista parametrów wybranych filtrów działających na zakres EUV/SXR użytych w szerokokątnej kamerze satelity ROSAT. Zaadaptowano z [97]

Lp.	Zakres długości fali [nm]	Materiał	Grubość [μm]
1	168-198	szkło kwarcowe	-
2	6-14	poliwęglan/węgiel/węgiel boru	0,3/0,2/0,1
3	53-72	cyna/aluminium	0,2/0,2
4	11,2-20	poliwęglan/beryl	0,2/0,3
5	6-14	poliwęglan/węgiel	0,3/0,3
6	15-22	poliwęglan/aluminium	0,2/0,2
7	11,2-20	poliwęglan/beryl	0,2/0,3

Centrum Badań Kosmicznych PAN w ramach współpracy z NASA (ang. *National Aeronautics and Space Administration*) przy planowanej na 2025 rok misji IMAP (ang. *Interstellar Mapping and Acceleration Probe*) ma przygotować fotometr GLOWS (ang. *GLObal solar Wind Structure*), który będzie służył do obserwacji fluorescencyjnej poświaty heliosferycznej w linii Lyman- α neutralnego wodoru ($\lambda = 121,6$ nm). Docelowe obserwacje umożliwią zbadanie zależności strumienia wiatru słonecznego od szerokości heliograficznej oraz rozkładu wodoru międzygwiazdowego w przestrzeni międzyplanetarnej [98]. Fotometr GLOWS zostanie wyposażony w umieszczony przed detektorem filtr optyczny z fluorku magnezu (MgF_2), który będzie przepuszczał promieniowanie o długości fali Lyman- α [99].

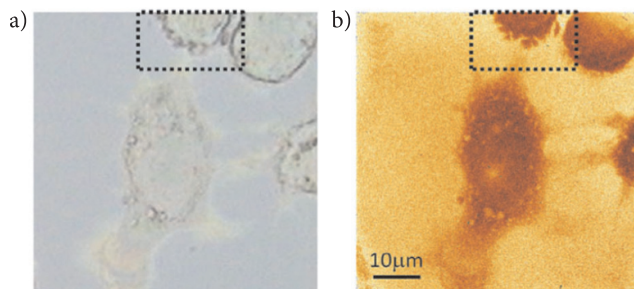
• Mikroskopia

Mikroskopia w zakresie EUV/SXR umożliwia obserwowanie obiektów z nanometrową rozdzielczością przestrzenną [100] z użyciem optyki elipsoidalnej (zwierciadlanej) jako kondensora i FZP jako obiektywu (rysunek 16) [101] bądź FZP jako obiektywu i kondensora [102, 103].



Rys. 16. Mikroskopy z zastosowaniem płytki strefowej Fresnela jako obiektywu oraz zwierciadła elipsoidalnego z jako kondensora na zakres: a) SXR oraz b) EUV. Na podstawie Applied Sciences [104]

Jak zostało wcześniej wspomniane, promieniowanie z omawianego zakresu umożliwia uzyskanie wysokiego kontrastu optycznego w zakresie „okna wodnego”, co znajduje zastosowanie w obrazowaniu obiektów biologicznych [105]. Aktualnie opracowywane mikroskopy na zakres EUV/SXR mogą osiągnąć rozdzielczość na poziomie < 100 nm [106], 75 nm [107] czy 60 nm [108]. Tak wysoka rozdzielczość pozwala na obrazowanie komórek (rys. 17) [109].



Rys. 17. Obraz przedstawiający odwodnione fibroblasty CT 26, które pochodzą z raka jelita grubego *Mus musculus* (szczep BALB/c) w zakresie: a) światła widzialnego oraz b) miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Zaadaptowano z „Opto-Electronics Review” [109]

Mikroskopy działające w tym zakresie wymagają precyzyjnego ustawienia kondensora i obiektywu, aby uniknąć zmniejszenia jakości obrazowania. Wysokie wymagania stawiane są również wydajności elementów optycznych użytych do budowy mikroskopów, tak aby obrazy przez nie uzyskiwane miały wysoki kontrast i współczynnik SNR (ang. *signal to noise ratio*). Nie zawsze jednak systemy próżniowe są w stanie sprostać geometrycznym wymaganiom takich kondensatorów. W takim przypadku można zastosować rozwiązania kompaktowe, takie jak kondensator w formie teleskopu wykonanego z dwóch płytek strefowych Fresnela z azotku krzemu. To rozwiązanie pozwoliło obrazować z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą $9,8 \mu\text{m}$ [110].

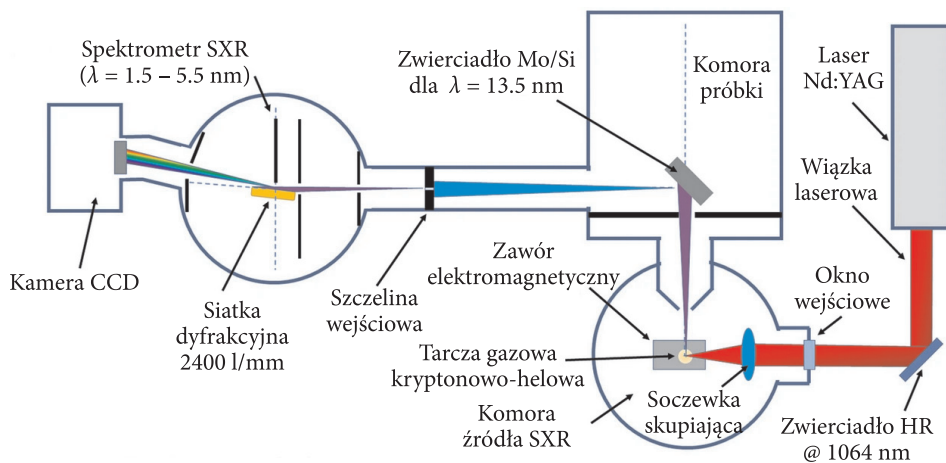
- **Spektroskopia**

Pomiary spektroskopowe najczęściej wykonuje się, aby zmierzyć dokładne wartości długości fali, dla których występują linie absorpcyjne czy emisyjne. W spektrometrach jednymi z najistotniejszych elementów dyspersyjnych są siatki dyfrakcyjne. Co roku powstają nowe rozwiązania, które poprawiają parametry spektrometrów. W spektrometrach często stosowane są siatki holograficzne, dlatego że pozwalają na minimalizację astygmatyzmu oraz krzywizny pola [111].

Aby uzyskać ultrawysoką rozdzielczość spektralną w zakresie EUV i SXR, wymagane jest zastosowanie siatki o bardzo dużej gęstości linii na milimetr. Zaproponowano strukturę poślizgowej siatki dyfrakcyjnej wykonanej z krzemu o gęstości 10 tysięcy linii na milimetr, na którą naniesiono pokrycie z aluminium i cyrkonu (Al/Zr). Dla pierwszego rzędu dyfrakcyjnego osiągnięto 13% oraz 24,6% wydajności dla kątów poślizgowych wynoszących odpowiednio 11° i 36° [112].

• Tomografia

Tomografia to technika znajdująca zastosowanie w wielu obszarach nauki oraz życia codziennego, z których najpowszechniejszym jest medycyna. Podrodzajem tomografii jest koherencyjna tomografia optyczna (OCT — ang. *optical coherence tomography*) [113]. Jedną z jej zalet jest możliwość obrazowania wewnętrznej struktury próbki bez jej uszkodzenia. Technika ta posiada ograniczoną rozdzielczość w zakresie widzialnym oraz podczerwonym, dlatego zaproponowana została XCT — tomografia w zakresie EUV/SXR [114].



Rys. 18. Schemat źródła plazmowego do XCT osiągający rozdzielczość na poziomie 2 nm. Na podstawie „Scientific Reports” [115]

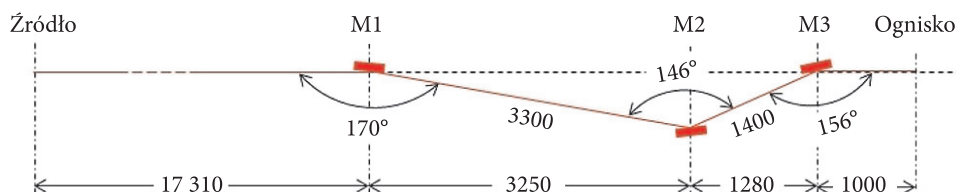
Zespół z Wojskowej Akademii Technicznej opracował układ eksperymentalny źródła plazmowego do XCT (rysunek 18), w którym zostały użyte dwa elementy optyczne działające na zakres EUV/SXR. Pierwszym była poślizgowa siatka dyfrakcyjna posiadająca 2400 linii na milimetr, a drugim zwierciadło wielowarstwowe wykonane z molibdenu i krzemu (Mo/Si) użyte jako próbka. W wyniku pomiarów udało się osiągnąć rozdzielczość na poziomie 2 nm [115]. Bardziej rozbudowana wersja układu XCT ma dodatkowo dwa zwierciadła elipsoidalne do skupiania wiązki sondującej próbkę i akwizycji rozproszonych od próbki fotonów [116],

jednak aktualna rozdzielczość to 20-30 nm. Podobne badania wykonuje się również na synchrotronach [117] lub z użyciem źródeł generujących wysokie harmoniczne (ang. *HHG* — *high harmonic generation*) [118].

- **Lasery na swobodnych elektronach**

Lasery na swobodnych elektronach to wielkoskalowe źródła promieniowania umożliwiające emisję promieniowania z szerokiego zakresu długości fali. Ich szczytowa energia impulsu to nawet 3 mJ, a czas trwania impulsu 10 fs dla zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego [119]. Wiązka elektronów przyspieszana jest w akceleratorze, a następnie kierowana do undulatora, gdzie elektrony pod wpływem pola magnetycznego doznają przyspieszenia poprzecznego. Następnie dzięki technice samowzmacniającej się emisji spontanicznej elektrony formują się w paczki i emitują spójne fale.

W układach laserów na swobodnych elektronach znajduje się wiele elementów optycznych działających w zakresie EUV/SXR, formujących kształt oraz parametry wiązki i kierujących ją do komory, w której będzie prowadzony eksperyment. Takie elementy powinny być odporne na wysoki poziom radiacji w komorach i zapewniać wysoką stabilność termiczną. Przykładem takiej struktury są przebadane na systemach synchrotronowych zwierciadła wielowarstwowe wykonane z węgliku niobu oraz krzemu (NbC/Si), które zapewniały wysokie odbicie oraz stabilność dla zakresu długości fali od 10 do 20 nm [120].



Rys. 19. Schemat rozmieszczenia elementów optycznych w linii VUV PolFEL-a

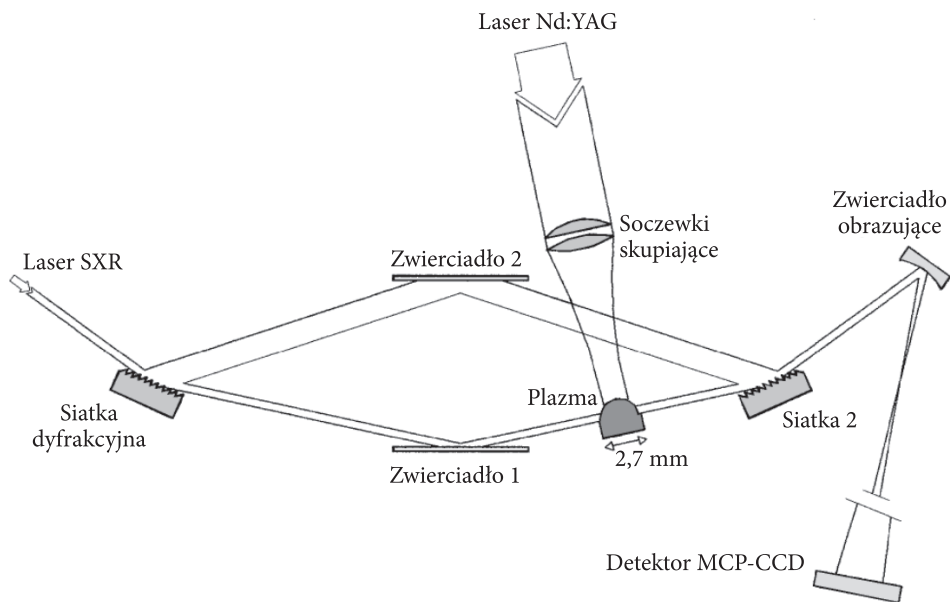
W wielu układach laserów na swobodnych elektronach do monochromatyzacji promieniowania stosowane są siatki dyfrakcyjne. W Helmholtz Centrum Berlin wykonywane są siatki o gęstości linii od 50 do 1200 linii na milimetr [121].

W linii VUV Polskiego Lasera na Swobodnych Elektronach (PolFEL), który powstaje w Świerku [122], będą znajdowały się trzy zwierciadła na zakres krótkofalowy. Będą to dwa zwierciadła płaskie kierujące wiązkę oraz ogniskujące ją zwierciadło elipsoidalne. Zwierciadła te zostaną wykonane z krzemu (Si) z cienką warstwą węgliku boru (B_4C) — rysunek 19.

• Diagnostyka plazmy

Elementy optyczne znajdują również zastosowanie w układach eksperymentalnych mających na celu przeprowadzenie diagnostyki plazmy. Polega ona na pomiarach parametrów wygenerowanej plazmy takich jak temperatura [123], gęstość elektronowa [124] czy też prędkość ekspansji plazmy [125]. Informacje uzyskane dzięki diagnostyce plazmy mają znaczenie w próbach zrozumienia zjawisk fizycznych czy procesów molekularnych.

Wśród instrumentów służących do diagnostyki plazmy ciekawym rozwiązaniem wydaje się interferometr na zakres SXR wykonany na bazie poślizgowych siatek dyfrakcyjnych (rys. 20). W układzie pełnią one funkcję rozdzielaczy wiązki, co umożliwia obsługę interferometru dla wybranej długości fali [126].



Rys. 20. Interferometr do diagnostyki plazmy wykonany na bazie dwóch siatek dyfrakcyjnych. Zaadaptowano za zgodą © The Optical Society [126]

Jednak oprócz plazmy wytwarzanej w laboratorium wykonuje się również diagnostykę plazmy w kosmosie. Pomiar wysokiej temperatury plazmy pochodzącej od Słońca wymagają użycia zwierciadeł zapewniających wysoką wydajność w szerokim zakresie długości fali. Zespół z Padwy przeprowadził symulację dla ośmiu linii emisyjnych [127]. Zaproponowano, że instrument do diagnostyki plazmy słonecznej powinien być wyposażony w dwa kanały. Pierwszy obserwowałby linie o długości fali krótszej niż 12,4 nm, a drugi pozostałe. Zdecydowano, że dla

pierwszego kanału najbardziej wydajne będą zwierciadła wielowarstwowe wykonane z takich par materiałów jak molibden i itr (Mo/Y) oraz itr i pallad (Y/Pd), pokryte warstwą węglika boru, a dla drugiego najlepsze pary materiałów to molibden i krzem (Mo/Si) oraz molibden i beryl (Mo/Be).

5. Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały podstawy działania elementów optycznych w zakresie obejmującym ultrafiolet próżniowy i miękkie promieniowanie rentgenowskie, uwzględniając najważniejsze zjawiska mające wpływ na charakter oddziaływania promieniowania z tego zakresu z materią. Opisano podstawy fizyczne działania optyki oraz najważniejsze zjawiska, na bazie których konstruuje się elementy optyczne w tym zakresie. Wyszczególnione zostały zalety stosowania optyki na zakres EUV/SXR, wśród których najważniejsza jest możliwość obrazowania z wysoką rozdzielczością przestrzenną oraz uzyskania wysokiego kontrastu optycznego w zakresie okna wodnego.

Praca zawiera informacje na temat kilku podstawowych elementów optycznych działających w zakresie EUV/SXR — filtrów optycznych, zwierciadeł (m.in. wielowarstwowych), siatek dyfrakcyjnych oraz płytek strefowych Fresnela. Każdy z wymienionych elementów został opisany z uwzględnieniem zasad działania, różnych jego konfiguracji oraz metod wytwarzania. W pracy zaprezentowano również kilka rozwiązań hybrydowych.

W ostatnim rozdziale zawarte zostały liczne informacje dotyczące możliwości zastosowań elementów optycznych na zakres EUV/SXR. Opisano rodzaje materiałów, które wykorzystuje się do wykonania wybranej struktury, oraz ich osiągi przy realizacji docelowych działań. Opisane obszary zastosowań to fotolitografia, badania przestrzeni kosmicznej, mikroskopia, spektroskopia, tomografia, lasery na swobodnych elektronach oraz diagnostyka plazmy.

Skromna objętość opracowania nie pozwala na zaprezentowanie wszystkich możliwych rozwiązań elementów optycznych na zakres EUV i SXR czy też wielu zastosowań opracowywanych przez ostatnie dziesięciolecia, ale może stanowić dobre wprowadzenie do tego interesującego tematu.

Źródło finansowania pracy — Uczelniany Grant Badawczy WAT 727/2022.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na Polskiej Konferencji Optycznej 15 czerwca 2022 r. w Płocku.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.09.2022. Zatwierdzono do publikacji 11.10.2022.

Martyna Wardzińska <https://orcid.org/0000-0002-6492-3707>
Przemysław Wachulak <https://orcid.org/0000-0001-9853-7946>

LITERATURA

- [1] ENOCH J., *First known lenses originating in Egypt about 4600 years ago!*, Hindsight, 31, 2, 2000, 9-17.
- [2] HUDEC R., MARŠÍKOVÁ V., PÍNA L., INNEMAN A., SKULINOVÁ M., *New trends in space x-ray optics*, Proc. SPIE 10565, International Conference on Space Optics - ICSO 2010, 105652U (20 November 2017), <https://doi.org/10.1117/12.2309110>.
- [3] ZHOU W., APKARIAN R., WANG Z.L., JOY D., *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM)*, [in:] Zhou W., Wang Z.L. (eds), Scanning Microscopy for Nanotechnology, Springer, New York, NY, 2006, https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1.
- [4] XIN WANG et al., *The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement*, 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 502 012008.
- [5] RAY S.F., *Applied Photographic Optics: Lenses and optical systems for photography, film, video, electronic and digital imaging*, 3rd ed., Routledge 2002, <https://doi.org/10.4324/9780080499253>.
- [6] ISO International Standard 21348: 2017, *Space environment (natural and artificial) — Process for determining solar irradiances*.
- [7] DRESCHER L., KORNILOV O., WITTING T., REITSMA G., MONSERUD N., ROUZÉE A., MIKOSCH J., VRAKING M.J.J., SCHÜTTE B., *Extreme-ultraviolet refractive optics*, Nature, 564, 2018, 91-94, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0737-3>.
- [8] ATTWOOD D., *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge 1999, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164429>.
- [9] KUHLMANN T., YULIN S.A., FEIGL T., KAISER N., *EUV multilayer mirrors with tailored spectral reflectivity*, Proc. SPIE 4782, X-Ray Mirrors, Crystals, and Multilayers II, 24 December 2002, <https://doi.org/10.1117/12.451348>.
- [10] COMPTON A.H., ALLISON S.K., *X-Rays in Theory and Experiment*, 2nd. ed., Van Nostrand, New York, 1935.
- [11] HUYGENS Ch., *Traité de la lumiere*, Leiden, Netherlands: Pieter van der Aa, 1690.
- [12] HECHT E., *Optics*, 4 th ed., Pearson Education, Inc., 2002.
- [13] THOMPSON A.R., MORAN J.M., SWENSON G.W. JR, *Van Cittert–Zernike Theorem, Spatial Coherence, and Scattering*, [in:] Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, Astronomy and Astrophysics Library, Springer, Cham, 2017, https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4_15.
- [14] CHANG CH., ANDERSON E., NAULLEAU P., GULLIKSON E., GOLDBERG K., ATTWOOD D., *Direct measurement of index of refraction in the extreme-ultraviolet wavelength region with a novel interferometer*, Optics Letters, 27, 12, 2002.
- [15] SVATOS J., JOYEUX D., PHALIPPOU D., POLACK F., *Soft-x-ray interferometer for measuring the refractive index of materials*, Optics Letters, 18, 16, 1993, 1367-1369.
- [16] The Center for X-Ray Optics, *X-Ray Interactions with Matter*, https://henke.lbl.gov/optical_constants/index.html, [dostęp: 10.09.2022].
- [17] Rigaku, *Multilayer optics for extreme ultraviolet lithography*, <https://www.rigaku.com/products/optics/euv/>, [dostęp: 10.09.2022].
- [18] MICHETTE A.G., *Optical systems for soft X rays*, Plenum Press 1986.
- [19] WANG Z., WANG H., ZHU J., WANG F., GU Z., CHEN L., *Broadband multilayer polarizers for the extreme ultraviolet*, Journal of Applied Physics, 99, 2006, 056108, <https://doi.org/10.1063/1.2179152>.
- [20] SCHMAHL G., RUDOLPH D., SCHNEIDER G., THIEME J., SCHLIEBE T., KAULICH B., HETTWER M., *Diffraction optics for X-ray imaging*, Microelectronic Engineering, 32, 1-4, 1996, 351-367.

- [21] GOLDBERG K., *Testing EUV optics with EUV light: if you can measure it, you can make it*, SPIE Newsroom, Optical Design & Engineering, 2006.
- [22] ZENG G., DAIDO H., TOGAWA T., NAKATSUKA M., NAKAI S., "Water window" x-ray source produced by a slab glass laser, *Journal of Applied Physics*, 69, 7460, 1991, <https://doi.org/10.1063/1.347561>.
- [23] KOERDEL M., DEHLINGER A., SEIM CH., VOGT U., FOGELQVIST E., SELLBERG J.A., STIEL H., HERTZ H.M., *Laboratory water-window X-ray Microscopy*, *Optica*, 7, 6, 2020, 658-674.
- [24] BORN M., WOLF E., *Principle of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press 1980.
- [25] JELINSKY P., Martin Ch., Kimble R., Bowyer S., Steele G., *Composite thin-foil bandpass filter for EUV astronomy: titanium-antimony-titanium*, *Applied Optics*, 22, 8, 1983, 1227-1231.
- [26] JIMENEZ K., NICOLOSI P., JUSCHKIN L., NADEEM AHMED, GABALLAH A.E.H., CATTARUZZA E., SERTSU M.G., GERARDINO A., GIGLIA A., MUSSLER G., ZUPPELLA P., *Extreme ultraviolet free-standing transmittance filters for high brilliance sources, based on Nb/Zr and Zr/Nb thin films on Si₃N₄ membranes: Design, fabrication, optical and structural characterization*, *Thin Solid Films*, 695, 2020, 137739, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137739>.
- [27] KESKI-KUHA R., OSANTOWSKI J.F., LEVITON D.B., SAHA T., WRIGHT G.A., BOUCARUT R.A., FLEETWOOD CH.M., MADISON T.J., *CVD silicon carbide mirrors for EUV applications*, *Proc. SPIE 2543, Silicon Carbide Materials for Optics and Precision Structures*, 23 October 1995, <https://doi.org/10.1117/12.225286>.
- [28] MONACO G., SUMAN M., PELIZZO M. G., NICOLOSI P., *Optical constants of silicon carbide deposited with emerging PVD techniques*, *Proc. SPIE 7360, EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space*, 73600W, 30 April 2009, <https://doi.org/10.1117/12.820684>.
- [29] GULLIKSON E.M., BAKER S.L., BJORKHOLM J.E., BOKOR J., GOLDBERG K.A., GOLDSMITH J.E.M., MONTCALM C., NAULLEAU P.P., SPILLER E.A., STEARNS D.G., TAYLOR J.S., UNDERWOOD J.H., *EUV scattering and flare of 10X projection cameras*, *Proc. SPIE 3676, Emerging Lithographic Technologies III*, 25 June 1999, <https://doi.org/10.1117/12.351162>.
- [30] Extreme Ultraviolet (EUV) Flat Mirrors, strona firmy Edmund Optics, <https://www.edmundoptics.com/f/extreme-ultraviolet-euv-flat-mirrors/39087/>, [dostęp: 10.09.2022].
- [31] BARYSHEVA M.M., PESTOV A.E., SALASHCHENKO N.N., TOROPOV M.N., CHKHALO N.I., *Precision imaging multilayer optics for soft X-rays and extreme ultraviolet bands*, *Physics-Uspekhi*, 55, 7, 2012.
- [32] FROLOV O., KOLACEK K., STRAUS J., SCHMIDT J., PRUKNER V., CHOUKOUROV A., *Application of EUV optics to surface modification of materials*, *Proc. SPIE 8777, Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics IV; and EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space III*, 877707, 3 May 2013, <https://doi.org/10.1117/12.2020158>.
- [33] RAIMONDI L., SVETINA C., MAHNE N., COCCO D., ABRAMI A. ET AL., *Microfocusing of the FERMI@Elettra FEL beam with a K-B active optics system: Spot size predictions by application of the WISE code*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 710, 2013, 131-138.
- [34] RAGOZIN E.N., MEDNIKOV K.N., PERTSOV A.A., PIROZHKOVA A.S., REVA A.A., SHESTOV S.V., UL'YANOV A.S., VISHNYAKOV E.A., *Spectroscopic characterization of novel multilayer mirrors intended for astronomical and laboratory applications*, *Proc. SPIE 7360, EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space*, 73600N, 30 April 2009, <https://doi.org/10.1117/12.820750>.
- [35] ROCHUS P., HALAIN J.-P., RENOTTE E., BERGHMANS D., ZHUKOV A. ET AL., *The Extreme Ultraviolet Imager (EUI) onboard the SOLAR ORBITER mission*, 2009, In A3. 4. Space-based Astronomy.

- [36] WACHULAK P.W., BARTNIK A., SKORUPKA M., KOSTECKI J., JAROCKI R., SZCZUREK M., WĘGRZYŃSKI Ł., FOK T., FIEDOROWICZ H., *Water-window microscopy using a compact, laser-plasma SXR source based on a double-stream gas-puff target*, Appl. Phys. B, 111, 2013, 239-247, <https://doi.org/10.1007/s00340-012-5324-y>.
- [37] MIMURA H., TAKEI Y., SAITO T., KUME T., MOTOYAMA H., EGAWA S., TAKEO Y., HIGASHI T., *Development of ellipsoidal focusing mirror for soft x-ray and extreme ultraviolet light*, Proc. SPIE 9588, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components X, 95880L, 26 August 2015, <https://doi.org/10.1117/12.2187455>.
- [38] BARTNIK A., FIEDOROWICZ H., WACHULAK P., FOK T., WĘGRZYŃSKI Ł., *Optical systems for laser-produced plasma EUV and soft X-ray sources*, Proc. SPIE 10976, 21st Czech - Polish - Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, 109760K, 18 December 2018, <https://doi.org/10.1117/12.2518202>.
- [39] MANGUS J.D., *Optical Design of Glancing Incidence Extreme Ultraviolet Telescopes*, Appl. Opt., 9, 1970, 1019-1025.
- [40] STÖRMER M., HORSTMANN CH., HÄUSSLER D., SPIECKER E., SIEWERT F., SCHOLZE F., HERTLEIN F., JÄGER W., BORMANN R., *Single-layer and multilayer mirrors for current and next-generation light sources*, Proc SPIE. 7077, 2008, <https://doi.org/10.1117/12.798895>.
- [41] NTT Advanced Technology Corporation, *Multilayer Coating for Extreme Ultraviolet Experiments*, 2020, <http://www.ntt-at.com>.
- [42] BARYSHEVA M., GARAKHIN S.A., ZUEV S.YU., POLKOVNIKOV V.N., SALASHCHENKO N.N., SVECHNIKOV M.V., CHKHALO N.I., YULIN S., *Comparison of approaches to the manufacture of broadband mirrors for the EUV range: aperiodic and stack structures*, Quantum Electronics, 49, 4, 2019, 380-385, <https://doi.org/10.1070/QEL16990>
- [43] MACDONALD C.A., *Focusing Polycapillary Optics and Their Applications*, X-Ray Optics and Instrumentation, 10, 2010, 17, <https://doi.org/10.1155/2010/867049>.
- [44] OHZAWA S., *Development of X-ray Guide Tube*, Readout English Edition, No. 12, September 2008.
- [45] Focussing Polycapillary, strona firmy Helmut Fischer, <https://www.helmut-fischer.com/products/x-ray-optics/focussing-polycapillary>, [dostęp: 10.09.2022].
- [46] KIRKPATRICK P., BAEZ A.V., *Formation of Optical Images by X-Rays*, Journal of the Optical Society of America, 38, 9, 1948.
- [47] LIDER V.V., *Kirkpatrick-Baez and Wolter X-Ray Focusing Optics (Review)*, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 13, 4, 2019, 670-682.
- [48] Kirkpatrick-Baez Mirror pairs, strona firmy Crystal Scientific, http://www.crystal-scientific.com/mirror_kb.html, [dostęp: 10.09.2022].
- [49] WOLTER H., *Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen*, Ann. Phys., 445, 1952, 94-114.
- [50] LIU F., *Reflectance Improvement of Mo/Si Multilayer Mirrors and Masks for Extreme Ultra-Violet Lithography*, Hsinchu, Taiwan, 2012.
- [51] YULIN SERGIY A., FEIGL T., BENOIT N., KAISER N., *EUV/soft x-ray multilayer optics*, Proc. SPIE 5645, Advanced Microlithography Technologies, 27 January 2005, <https://doi.org/10.1117/12.579520>.
- [52] PALMER E.W., HUTLEY M.C., FRANKS A., VERRILL J.F., GALE B., *Diffraction gratings (manufacture)*, Rep. Prog. Phys., 38, 8, 1975, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/38/8/002>.

- [53] SOLAK H.H., DAVID C., GOBRECHT J., GOLOVKINA V., CERRINA F., KIM S.O., NEALEY P.F., *Sub-50 nm period patterns with EUV interference lithography*, Microelectronic Engineering, 67-68, 2003, 56-62, [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(03\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00059-5).
- [54] BARBEE TROY W. JR., PIANETTA P., REDAELLI R., TATCHYN R., BARBEE TROY W. III, *Molybdenum-silicon multilayer monochromator for the extreme ultraviolet*, Appl. Phys. Lett., 50, 25, 1987, 1841-1843, <https://doi.org/10.1063/1.97714>.
- [55] GRISENTI R.E., SCHÖLLKOPF W., TOENNIES J.P., MANSON J.R., SAVAS T.A., SMITH H.I., *He-atom diffraction from nanostructure transmission gratings: The role of imperfections*, Phys. Rev. A., 61, 2000, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.61.033608>.
- [56] GRUNTMAN M., *Extreme-ultraviolet radiation filtering by freestanding transmission gratings*, Applied Optics, 34, 25, 1995, 5732-5737, <https://doi.org/10.1364/AO.34.005732>.
- [57] VORONOV D.L., AHN M., ANDERSON E.H., CAMBIE R., CHANG CHIH-HAO ET AL., *High-efficiency 5000 lines/mm multilayer-coated blazed grating for extreme ultraviolet wavelengths*, Opt. Lett. 35, 2010, 2615-2617.
- [58] HUANG Y., LI T., XU B., HONG R., TAO CH., LING J., LI B., ZHANG D., NI Z., ZHUANG S., *Calculation of the diffraction efficiency on concave gratings based on Fresnel-Kirchhoff's diffraction formula*, Applied Optics, 52, 5, 2013, 1110-1116, <https://doi.org/10.1364/AO.52.001110>.
- [59] NAMIOKA T., *Theory of the Ellipsoidal Concave Grating*, J. Opt. Soc. Am., 51, 1961, 4-12.
- [60] PALMER C.A., LOEWEN E.G., *Diffraction Grating Handbook*, Newport Corporation, 2005.
- [61] BROWN B.J., WILSON I.J., *Holographic Grating Aberration Correction for a Rowland Circle Mount I*, Optica Acta: International Journal of Optics, 28, 12, 1981, 1587-1599, <https://doi.org/10.1080/713820509>.
- [62] HUTLEY M.C., *Interference (holographic) diffraction grating*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 9, 7, 1976.
- [63] ZEITNER U.D., OLIVA M., FUCHS F., MICHAELIS D., BENKENSTEIN T., HARZENDORF T., KLEY E.B., *High performance diffraction gratings made by e-beam lithography*, Appl. Phys. A, 109, 2012, 789-796, <https://doi.org/10.1007/s00339-012-7346-z>.
- [64] DILL F.H., *Optical lithography*, IEEE Transactions on Electron Devices, 22, 7, 1975, 440-444, <https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18158>.
- [65] SHALLCROSS R.C., CHAWLA G.S., MARIKKAR F.S., TOLBERT S., PYUN J., ARMSTRONG N.R., *Efficient CdSe Nanocrystal Diffraction Gratings Prepared by Microcontact Molding*, ACS Nano, 3, 11, 2009, 3629-3637, <https://doi.org/10.1021/nn900735y>.
- [66] HARADA T., KITA T., ITOU M., TAIRA H., MIKUNI A., *Mechanically ruled diffraction gratings for synchrotron radiation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 246, 1-3, 1986, 272-277, [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90089-6).
- [67] KIRZ J., *Phase zone plates for x rays and the extreme UV*, J. Opt. Soc. Am., 64, 1974, 301-309.
- [68] REN J., WANG Y., MENG X., SUN W., CAO J., LI J., TAI R., *Research on partially coherent light propagation through zone plates*, Opt. Express, 29, 25, 2021, 40947-40956.
- [69] GUO CH.S, XIE YI-YAN, SHA B., *Diffraction algorithm suitable for both near and far field with shifted destination window and oblique illumination*, Opt. Lett., 39, 8, 2014, 2338-2341.
- [70] KOPYLOV Y.V., POPOV A.V., VINOGRADOV A.V., *Application of the parabolic wave equation to X-ray diffraction optics*, Optics Communications, 118, 5-6, 1995, 619-636, [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00295-J](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00295-J).

- [71] OKTEM F.S., DOVILA J.M., KAMALABADI F., *Image formation model for photon sieves*, 2013 IEEE International Conference on Image Processing, 2013, 2373-2377, <https://doi.org/10.1109/ICIP.2013.6738489>.
- [72] RAFIGHDOOST J., SABATYAN A., *Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams*, J. Opt. Soc. Am. B, 34, 3, 2017, 608-612.
- [73] CANNON T.M., FENIMORE E.E., *Tomographical imaging using uniformly redundant arrays*, Appl. Opt., 18, 7, 1979, 1052-1057.
- [74] KIPP L., SKIBOWSKI M., JOHNSON R.L., Berndt R., Adelung R., Harm S., Seemann R., *Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves*, Nature, 414, 2001, 184-188, <https://doi.org/10.1038/35102526>.
- [75] SAKDINAWAT A., LIU YANWEI, *Soft-x-ray microscopy using spiral zone plates*, Opt. Lett., 32, 18, 2007, 2635-2637.
- [76] FENIMORE E., CANNON M., MILLER L., *Comparison of Fresnel Zone Plates and Uniformly Redundant Arrays*, presented at SPIE Twenty-Second Technical Symposium, San Diego 1978.
- [77] HOLMBERG A., *Nanofabrication of Zone Plate Optics for Compact Soft X-Ray Microscopy*, Doctoral Thesis, Department of Applied Physics Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2006.
- [78] XIONG Z., KUNWAR P., SOMAN P., *Hydrogel-Based Diffractive Optical Elements (hDOEs) Using Rapid Digital Photopatterning*, Advanced Optical Materials, 9, 2, 2020, <https://doi.org/10.1002/adom.202001217>.
- [79] LÖCHEL H., BRAIG CH., BRZHEZINSKAYA M., SIEWERT F., BAUMGÄRTEL P., FIRSOV A., ERKO A., *Femtosecond high-resolution hard X-ray spectroscopy using reflection zone plates*, Opt. Express, 23, 7, 2015, 8788-8799.
- [80] LIESE T., KREBS H.U., REESE M., GROSSMANN P., MANN K., *Development of Multilayer Laue Lenses for Soft X-ray Radiation*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg, July 2010.
- [81] BAJT S., PRASCIOLU M., FLECKENSTEIN H. et al., *X-ray Focusing with Efficient High-NA Multilayer Laue lenses*, Light Sci. Appl., 7, 2018, 17162, <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.162>.
- [82] SOWA K.M., KUJDA M.P., KORECKI P., *Plenoptic X-ray Microscopy*, Appl. Phys. Lett., 116, 2020, 014103, <https://doi.org/10.1063/1.5131494>.
- [83] LONGO E., *From X-ray Tomography to the First X-ray Plenoptic Camera for Nanoparticles Bio-localization*, Imaging, Université Paris Saclay (COmUE), 2018.
- [84] TINGINYANU I., URSAKI V.V., POPA V., *Nanoimprint lithography (NIL) and related techniques for electronics applications*, Nanocoatings and Ultra-Thin Films, 2011, 280-329.
- [85] MARCONI M.C., WACHULAK P.W., *Extreme Ultraviolet Lithography with Table Top Lasers*, Progress in Quantum Electronics, 34, 4, 2010, 173-190, <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.03.001>.
- [86] LOUIS E., MAKHOTKIN I., ZOETHOUT E., MÜLLENDER S., BIJKERK F., *Multilayer Development for Extreme Ultraviolet and Shorter Wavelength Lithography*, EUV Litho, <https://www.euvlitho.com/2011/S24.pdf>.
- [87] BIBISHKIN M.S., CHKHALO N.I., GUSEV S.A., KLUENKOV E.B., LOPATIN A.YA., LUCHIN V.I., PESTOV A.E., SALASHCHENKO N.N., SHMAENOK L.A., TSYBIN N.N., ZUEV S.YU., *Multilayer Zr/Si filters for EUV lithography and for radiation source metrology*, Proc. SPIE 7025, Micro- and Nanoelectronics 2007, 702502, 29 April 2008, <https://doi.org/10.1117/12.802347>.
- [88] STEARNS D.G., ROSEN R.S., VERNON S.P., *Multilayer mirror technology for soft-x-ray projection lithography*, Appl. Opt., 32, 34, 1993, 6952-6960.

- [89] CHKHALO N.I., SALASHCHENKO N.N., *Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics*, AIP Advances, 3, 8, 2013, 082130, <https://doi.org/10.1063/1.4820354>.
- [90] SVECHNIKOV M.V., CHKHALO N.I., GUSEV S.A., NECHAY A.N., PARIEV D.E. ET AL., *Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography*, Opt. Express, 26, 26, 2018, 33718-33731.
- [91] PEASE R.F., CHOU S.Y., *Lithography and Other Patterning Techniques for Future Electronics*, Proceedings of the IEEE, 96, 2, 2008, 248-270, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.911853>.
- [92] HANSSON B.A.M., HEMBERG O., HERTZ H.M., BERGLUND M., CHOI H.-J., JACOBSSON B. ET AL., *Characterization of a liquid-xenon-jet laser-plasma extreme-ultraviolet source*, Review of Scientific Instruments, 75, 6, 2004, <https://doi.org/10.1063/1.1755441>.
- [93] *EUV lithography systems*, strona firmy ASML, <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>, [dostęp: 10.09.2022].
- [94] CHKHALO N.I., KÜNSTNER S., POLKOVNIKOV V.N., SALASHCHENKO N.N., SCHÄFERS F., STARIKOV S.D., *High performance La/B₄C multilayer mirrors with barrier layers for the next generation lithography*, Appl. Phys. Lett., 102, 1, 2013, <https://doi.org/10.1063/1.4774298>.
- [95] MAKHOTKIN I.A., R.W.E. VAN DE KRUIJS, ZOETHOUT E., LOUIS E., BIJKERK F., *Optimization of LaN/B multilayer mirrors for 6.x nm wavelength*, Proc. SPIE 8848, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components VIII, 88480O, 27 September 2013, <https://doi.org/10.1117/12.2024199>.
- [96] KIRICHENKO A., KUZIN S., SHESTOV S., ULYANOV A., PERSON A. ET AL., *KORTES Mission for Solar Activity Monitoring Onboard International Space Station*, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 8, 2021.
- [97] KENT B.J., READING D.H., SWINYARD B.M., GRAPER E.B., SPURRETT P.H., *EUV band-pass filters for the ROSAT wide field camera*, Proc. SPIE 1344, EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy, 1 November 1990, <https://doi.org/10.1117/12.23254>.
- [98] *Współpraca między WAT a CBK PAN przy instrumentacie GLOWS, Urania*. Postępy astronomii, 14.07.2021, <https://www.urania.edu.pl/wiadomosci/wspolpraca-miedzy-wat-cbk-pan-przy-instrumentacie-glows>, [dostęp: 10.09.2022].
- [99] GLOWS, Strona Centrum Badań Kosmicznych PAN, <https://glows.cbk.waw.pl/pl/urządzenie/>, [dostęp: 10.09.2022].
- [100] WACHULAK P., TORRISI A., AYELE M., BARTNIK A., CZWARTOS J., WĘGRZYŃSKI Ł., FOK T., FIEDOROWICZ H., *Nanoimaging using soft X-ray and EUV laser-plasma sources*, EPJ Web of Conferences, vol. 167, 2018, Plasma Physics by Laser and Applications (PPLA 2017).
- [101] TORRISI A., WACHULAK P.W., BARTNIK A., WĘGRZYŃSKI Ł., FOK T., FIEDOROWICZ H., *Biological and material science applications of EUV and SXR nanoscale imaging systems based on double stream gas puff target laser plasma sources*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., B 411, 2017, 29-34.
- [102] BRIZUELA F., BREWER C., FERNANDEZ S., MARTZ D., MARCONI M. ET AL., *High resolution full-field imaging of nanostructures using compact extreme ultraviolet lasers*, Journal of Physics: Conference Series, 186, 2009.
- [103] NAWAZ M.F., JANCAREK A., NEVRKLA M., DUDA M.J., PINA L., *Development and demonstration of a water-window soft x-ray microscope using a Z-pinching capillary discharge source*, Proc. SPIE 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, 102350P, 31 May 2017, <https://doi.org/10.1117/12.2269601>.
- [104] WACHULAK P., TORRISI A., AYELE M., CZWARTOS J., BARTNIK A., WĘGRZYŃSKI Ł., FOK T., PARKMAN T., SALAČOVÁ Š., TURŇOVÁ J., ODSTRČIL M., FIEDOROWICZ H., *Bioimaging Using Full Field and Contact EUV and SXR Microscopes with Nanometer Spatial Resolution*, Applied Sciences, 7, 6, 2017, 548, <https://doi.org/10.3390/app7060548>.

- [105] ADAM J.F., MOY J.P., SUSINI J., *Table-top water window transmission x-ray microscopy: Review of the key issues, and conceptual design of an instrument for biology*, Review of Scientific Instruments, 76, 9, 2005, <https://doi.org/10.1063/1.2018633>.
- [106] BERGLUND M., RYMELL L., PEUKER M., WILHEIN T., HERTZ H.M., *Compact water-window transmission X-ray microscopy*, Journal of Microscopy, 197, 3, 2000, 268-273.
- [107] PARKMAN T., NEVRKLA M., JANČÁREK A., TURŇOVÁ J., PÁNEK D., VRBOVÁ M., *Table-Top Water-Window Microscope Using a Capillary Discharge Plasma Source with Spatial Resolution 75 nm*, Applied Sciences, 10, 18, 2020, 6373, <https://doi.org/10.3390/app10186373>.
- [108] WACHULAK P., TORRISI A., NAWAZ M., BARTNIK A., ADJEI D., VONDROVÁ Š. ET AL., *A Compact "Water Window" Microscope with 60 nm Spatial Resolution for Applications in Biology and Nanotechnology*, Microscopy and Microanalysis, 21, 5, 2015, 1214-1223, <https://doi.org/10.1017/S1431927615014750>.
- [109] WACHULAK P.W., *Recent advancements in the "water-window" microscopy with laser-plasma SXR source based on a double stream gas-puff target*, Opto-Electronics Review, 24, 3, 2016, 144-154, <https://doi.org/10.1515/oere-2016-0018>.
- [110] WACHULAK P.W., TORRISI A., BARTNIK A., WĘGRZYŃSKI Ł., FOK T., JAROCKI R., KOSTECKI J., SZCZUREK M., FIEDOROWICZ H., *Fresnel zone plate telescope for condenser alignment in water-window microscope*, J. Opt., 17, 5, 2015.
- [111] LERNER J.M., CHAMBERS R.J., PASSEREAU G., *Flat Field Imaging Spectroscopy Using Aberration Corrected Holographic Gratings*, Proc. SPIE 0268, Imaging Spectroscopy I, 21, July 1981, <https://doi.org/10.1117/12.959934>.
- [112] VORONOV D.L., ANDERSON E.H., CAMBIE R., CABRINI S., DHUEY S.D., GORAY L.I., GULLIKSON E.M., SALMASSI F., WARWICK T., YASHCHUK V.V., PADMORE H.A., *A 10,000 groove/mm multilayer coated grating for EUV spectroscopy*, Optics Express, 19, 7, 2011, 6320-6325, <https://doi.org/10.1364/OE.19.006320>
- [113] DREXLER W. (ED.), FUJIMOTO J.G. (ED.), *Optical Coherence Tomography*, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [114] FUCHS S., BLINNE A., RÖDEL C., ZASTRAU U., HILBERT V., WÜNSCHE M., BIERBACH J., FRUMKER E., FÖRSTER E., PAULUS G.G., *Optical coherence tomography using broad-bandwidth XUV and soft X-ray radiation*, Appl. Phys. B, 106, 2012, 789-795, <https://doi.org/10.1007/s00340-012-4934-8>.
- [115] WACHULAK P., BARTNIK A., FIEDOROWICZ H., *Optical coherence tomography (OCT) with 2 nm axial resolution using a compact laser plasma soft X-ray source*, Sci. Rep., 8, 8494, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26909-0>.
- [116] ARIKATT A., WĘGRZYŃSKI Ł., BARTNIK A., FIEDOROWICZ H., WACHULAK P., *Laboratory system for optical coherence tomography (OCT) using a laser plasma source of soft x-rays and extreme ultraviolet and focusing ellipsoidal optics*, Optics Express, 30, 8, 2022, 13491-13509.
- [117] SKRUSZEWICZ S., FUCHS S., ABEL J.J., NATHANAEL J., REINHARD J., RÖDEL C., WIESNER F., WÜNSCHE M., WACHULAK P., BARTNIK A., JANULEWICZ K., FIEDOROWICZ H., PAULUS G.G., *Coherence tomography with broad bandwidth extreme ultraviolet and soft X-ray radiation*, Applied Physics B., 127, 55, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07586-w>.
- [118] WÜNSCHE M., FUCHS S., WEBER T., NATHANAEL J., ABEL J.J., REINHARD J., WIESNER F., HÜBNER U., SKRUSZEWICZ S., PAULUS G.G., RÖDEL C., *A high resolution extreme ultraviolet spectrometer system optimized for harmonic spectroscopy and XUV beam analysis*, Review of Scientific Instruments, 90, 023108, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5054116>.
- [119] GALAYDA J.N., ARTHUR J., RATNER D.F., WHITE W.E., *X-ray free-electron lasers - present and future capabilities [Invited]*, J. Opt. Soc. Am. B, 27, 11, 2010, B106-B118,.

- [120] MODI M.H., RAI S.K., IDIR M., SCHAEFERS F., LODHA G.S., *NbC/Si multilayer mirror for next generation EUV light sources*, Opt. Express, 20, 14, 2012, 15114-15120.
- [121] SIEWERT F., LÖCHEL B., BUCHHEIM J., EGGENSTEIN F., FIRSOV A., GWALT G. ET AL., *Gratings for synchrotron and FEL beamlines: a project for the manufacture of ultra-precise gratings at Helmholtz Zentrum Berlin*, J. Synchrotron Rad., 25, 2018, 91-99.
- [122] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, PolFEL 1.0, <https://www.ncbj.gov.pl/polfel>, [dostęp: 10.09.2022].
- [123] FEDIN D., KANTSYREV V.L., BAUER B.S., SHLYAPTSEVA A.S., BRYTOV I., *Polychromator five-channel x-ray/EUV spectrometer with imaging transmission grating for plasma diagnostics*, Proc. SPIE 3764, Ultraviolet and X-Ray Detection, Spectroscopy, and Polarimetry III, 25 November 1999, <https://doi.org/10.1117/12.371101>.
- [124] ASTAKHOV D.I., GOEDHEER W.J., LEE C.J., IVANOV V.V., KRIVTSUN V.M. ET AL., *Exploring the electron density in plasma induced by EUV radiation: II. Numerical studies in argon and hydrogen*, Journal of Physics D: Applied Physics, 49, 29, 2016, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/29/295204>.
- [125] MILLIGAN R.O., DENNIS B.R., *Velocity Characteristics of Evaporated Plasma using Hinode/EUV Imaging Spectrometer*, The Astrophysical Journal, 699, 2, 2009.
- [126] FILEVICH J., KANIZAY K., MARCONI M.C., CHILLA J.L.A., ROCCA J.J., *Dense plasma diagnostics with an amplitude-division soft-x-ray laser interferometer based on diffraction gratings*, Opt. Lett., 25, 5, 2000, 356-358.
- [127] CORSO A.J., DEL ZANNA G., POLITO V., *Future perspectives in solar hot plasma observations in the soft X-rays*, Experimental Astronomy, 51, 2021, 453-474, <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09756-2>.

M. WARDZIŃSKA, P. WACHULAK

Optical elements for the extreme ultraviolet and soft X-ray range

Abstract. The article presents the physical basis and overview of optical elements for the range including extreme ultraviolet (EUV) and soft X-ray (SXR). The first chapter contains an introduction to the subject under review and physical fundamentals. The second chapter presents the basics of optics for the EUV/SXR range, along with highlighting its advantages and disadvantages. The third chapter discusses in detail optical components such as optical filters, mirrors (including multilayers), diffraction gratings, Fresnel zone plates, and hybrid solutions. The fourth chapter presents a wide range of applications of EUV/SXR optics. The final chapter summarises the information presented earlier.

Keywords: automation, electronic and electrical engineering, soft X-rays, extreme ultraviolet, optical elements, optical filters, multilayer mirrors, diffraction gratings, Fresnel zone plates

DOI: 10.5604/01.3001.0016.2808

