



Wojskowa
Akademia
Techniczna
im. Jarosława Dąbrowskiego



dr hab. inż. Przemysław Wachulak
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
Warszawa

Warszawa, 27 lutego 2016 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej.

**Autor rozprawy: mgr Mikhail Lyubomirskiy,
pt. „High energy X-ray inline interferometry based on refractive optics”.**

Praca doktorska magistra Mikhaila Lyubomirskiego powstała pod kierunkiem promotora, dr. Anatolija Snigireva oraz kopromotor, Pani dr hab. inż. Agnieszki Witkowskiej. Praca, która została złożona na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej w 2015 roku, dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień związanych z rozwojem nowoczesnych technik interferometrycznych z użyciem wysokoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego. Doktorant w swoich badaniach opracował i scharakteryzował trzy interferometry bazujące na optyce odbiciowej i refrakcyjnej na zakres twardego promieniowania rentgenowskiego oraz interferometr wykonany w krzemie w technologii MEMS. Celem rozprawy było użycie zaprojektowanych interferometrów w diagnostyce promieniowania synchrotronowego, między innymi interferometru Younga z dwoma otworkami (pinholami) do wyznaczenia rozmiaru wiązki na linii ID06 w ESRF w Greboble, z mikrometrową rozdzielczością przestrzenną oraz interferometru wielosoczewkowego, zbudowanego na bazie krzemu techniką litografii, do określenia rozmiaru źródła promieniowania synchrotronowego oraz kształtu frontu falowego poprzez zastosowanie fundamentalnej analizy Talbota.

Praca przedstawiona przez Doktoranta, którą miałem przyjemność recenzować, jest pracą eksperymentalną. Główny nacisk w pracy położony został na opracowanie różnych typów interferometrów do zastosowań na wielkoskalowych źródłach promieniowania. Autor w rozdziale pierwszym pracy przybliży czytelnikowi właściwości promieniowania rentgenowskiego oraz możliwe aplikacje tego promieniowania. Omawia w skrócie procesy związane z oddziaływaniem promieniowania z tego zakresu spektralnego z materią. Przybliży również ideę zespolonego współczynnika załamania promieniowania w tym zakresie spektralnym, w szczególności dla energii fotonów z zakresu od kilku do kilkudziesięciu keV. Na jego podstawie definiuje absorpcję oraz przesunięcie fazy, jakie doświadcza

promieniowanie rentgenowskie po przejściu przez materiał. Opisuje także, w moim odczuciu w zbyt wielkim skrócie załamanie, odbicie oraz rozproszenie promieniowania rentgenowskiego w materii.

Drugi rozdział pracy skupiony jest na opisie urządzeń, które Autor używa w ramach swoich badań. Autor przybliży czytelnikowi źródła promieniowania rentgenowskiego i podstawy fizyczne ich działania. Nie jest to opis zbyt dokładny, gdyż Autor wspomina na początku jedynie najstarsze lampy rentgenowskie, kończąc na źródłach synchrotronowych i ich rodzajach (generacjach). W ramach rozdziału Autor opisuje także, już dokładniej, zasadę działania undulatorów – które są źródłami fotonów używanymi przez Autora pracy w ramach jego działań badawczych. Przybliży niektóre parametry wiązki promieniowania synchrotronowego i samych źródeł, takie jak emitancja, rozmiar źródła, jasność, rozbieżność wiązki oraz przedstawia schematycznie i opisuje linie synchrotronowe, tzw. beamlines, wykorzystywane w jego pracy, tj. ID 06 i ID 11. Ważną częścią tego rozdziału, z punktu widzenia badań przedstawionych w dalszej części pracy, jest opis soczewek refrakcyjnych na zakres twardego promieniowania rentgenowskiego. Z uwagi na bardzo małą wartość współczynnika δ w tym zakresie spektralnym ugięcie promieni na pojedynczej soczewce jest zbyt małe, stąd Autor wyjaśnia konieczność użycia układu wielu soczewek, który znacznie skraca wypadkową ogniskową takiego układu skupiającego do tego stopnia, iż można je zastosować w praktyce. Opisuje także podstawowe parametry takich soczewek: ogniskową, współczynnik transmisji, czy też efektywną i numeryczną aperturę, a także głębie ostrości. W końcowej części rozdziału Autor przedstawia metodę litografii wiązką elektronów, którą używał do wytworzenia mikrostruktur na powierzchni krzemu; zarówno mikrosoczewek jak i struktur planarnych do interferometrii. Przedstawia schematycznie i omawia układ do litografii wiązką elektronów oraz opisuje jego ograniczenia. Autor przedstawia także kolejny krok w litografii, następujący po naświetleniu fotorezystu wiązką elektronów, jakim jest izotropowe trawienie plazmowe i anizotropowe trawienie materiału wiązką jonów. Niestety, Autor w wielkim skrócie odnosi informacje o tych metodach do struktur wytworzonych na potrzeby tej pracy. Wspomina jedynie o tym, iż użyto do ich wykonania procesu BOSCH, pozwalającego na uzyskanie struktur o dużej głębokości, rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, jednak robi to w ostatnim paragrafie rozdziału, zaledwie w jednym zdaniu. Ponadto, moim zdaniem niepotrzebnie, przedstawia bardzo luźno związane z pracą zdjęcie tzw. scallopingu (rys. 2.8). Nie przedstawia natomiast wogóle bardzo interesujących danych związanych z samym procesem litografii, takich jak rodzaj fotorezystu, parametry wiązki elektronowej, czasy ekspozycji, parametry procesu wywoływania fotorezystu, dokładność wykonania struktur soczewek, itp.

Rozdział trzeci, który jest również rozdziałem wprowadzającym do właściwej, eksperymentalnej części pracy, jest poświęcony dyfrakcji promieniowania elektromagnetycznego. Autor przybliży czytelnikowi dyfrakcyjne równanie Fresnela-Kirchhoffa, opisuje również dwa skrajne przypadki - dla małych odległości od

apertury (strefa bliska) – dyfrakcja Fresnela oraz dla strefy dalekiej – dyfrakcja Fraunhoffera. Podrozdział poświęca także na opis dyfrakcji na strukturach okresowych – efekt Talbota. Wprowadzenie to jest wymagane dla lepszego zrozumienia dalszej części pracy, niestety, w moim odczuciu, podrozdział opisujący efekt Talbota jest przedstawiony zbyt skrótowo, jedynie nieco ponad jedna strona, bez podania, przykładowo, typowych rozkładów amplitudowo-fazowych za strukturą okresową w postaci siatki dyfrakcyjnej, tzw. „Talbot carpets”. Dokładniejszy opis tego efektu znacznie poprawiłoby zrozumienie tego rozdziału przez czytelników nieco mniej zapoznanych z tym efektem. Autor podaje zamiast tego prawie półstronicowy, cytat z eksperymentu przeprowadzonego przez Talbota w 1836r. dla wiązki promieniowania białego, związany w niewielkim stopniu z pracą Autora.

Rozdział czwarty poświęcono opisowi zjawiska interferencji promieniowania częściowo spójnego. Autor opisuje w nim zjawisko spójności z rozróżnieniem na spójność przestrzenną i czasową. Podział taki jest konieczny dla zrozumienia podstaw działania opracowanych przez Autora interferometrów. Definiuje również (początkowo błędnie, co zostaje następnie poprawione) zależność drogi spójności przestrzennej od rozmiaru źródła, co pozwala mu w następnych rozdziałach na wyznaczenie rozmiaru źródła bezpośrednio ze współczynnika widzialności (ang. visibility), czy też z modulacji próżków otrzymanych interferogramów. W jednym z podrozdziałów Autor opisuje także kilka rodzajów interferometrów używanych często w zakresie promieniowania rentgenowskiego, takich jak interferometr Bonse’go-Hart’a, klasyczny interferometr Younga z dwiema szczelinami lub z dwoma otworkami, interferometr z podwójnym zwierciadłem oraz, zaproponowany przez promotora Autora, interferometr z soczewkami refrakcyjnymi CRL. W końcowej części rozdziału Autor opisuje, na bazie poprzednich prac, możliwe sposoby określenia spójności wiązki promieniowania z undulatora i rozmiar źródła, takie jak bezpośrednie obrazowanie z użyciem CRL, pomiar bazujący na określeniu rozkładu intensywności dyfrakcji w strefie bliskiej na absorberze o znanej geometrii, czy też użycie klasycznego interferometru Younga, w którym rozmiar źródła otrzymuje się poprzez dopasowanie teoretycznego rozkładu prążkowego intensywności do rozkładu eksperymentalnego poprzez zmianę parametru jakim jest właśnie rozmiar źródła.

W rozdziale piątym Autor przedstawia zaproponowany przez siebie układ interferometru Younga z możliwością płynnej zmiany odległości pomiędzy otworkami. Autor opisuje teoretycznie widzialność interferogramów w funkcji odległości pomiędzy otworkami, koncepcję interferometru ze zmyślnie rozwiązany problemem zmiany płynnej odległości między otworkami, oraz przechodzi do pierwszych danych eksperymentalnych, które przedstawia w swojej pracy, dotyczących użycia powyższego interferometru do otrzymania interferogramów dla fotonów o energii 11 keV z linii ID 06. Następnie rozważa poprawienie widzialności prążków poprzez zastosowanie dodatkowo układu sześciu liniowo ustawionych soczewek CRL wykonanych z berylu. Uzyskał dzięki temu trzykrotne skrócenie odległości do płaszczyzny strefy dalekiej oraz dziesięciokrotne poprawienie

widzialności prążków w interferogramach. Ostatecznie uzyskał w tym układzie serię interferogramów dla różnych odległości między otworkami, co pozwoliło na określenie rozmiaru źródła linii ID 06 na około 40 mikrometrów, w kierunku o mniejszej rozbieżności, co było zgodne z wcześniejszymi pomiarami otrzymanymi za pomocą innych metod.

W kolejnym, szóstym rozdziale Autor dyskutuje opracowane przez siebie interferometry wielosoczewkowe, przedstawia ideę ich działania i przykłady ich wykonania, które zastosował w swoich badaniach. W moim odczuciu brakuje nieco więcej informacji technicznych o sposobie ich wykonania i parametrach procesu litograficznego. Interferometry te działają podobnie do klasycznego interferometru Younga z tą różnicą iż zamiast dwóch źródeł, powstałych poprzez przestrzenne próbkowanie frontu falowego, mamy w tym przypadku większą ilość, 6 lub nawet 30 w pojedynczej strukturze płytki krzemowej. Autor przedstawia teoretyczne podstawy ich działania oraz eksperymentalnie potwierdza zawężenie szerokości prążków, pozwalające dodatkowo na poprawę ich widzialności w strukturze interferogramu. Dodatkowo Autor stwierdza, iż struktury soczewek są wysokiej jakości z uwagi na możliwość uzyskania widzialności prążków na poziomie 90%. Udowadnia także, iż interferometry wielosoczewkowe mogą być stosowane z powodzeniem do energii fotonów równej 65 keV (badania na linii ID 11), jednakże z uwagi na fakt iż droga spójności przestrzennej źródła o tak wysokiej energii miała wartość ok. 60 mikrometrów, nie był w stanie uzyskać interferogramów o wysokiej widzialności prążków interferencyjnych. Z tego też powodu nie udało mu się zmierzyć rozmiaru źródła na tej linii, zamiast tego przedstawił symulacje komputerowe dla źródła o rozmiarze 2 mikronów. Zmierzył jednak rozmiar źródła dla mniejszej energii fotonów - 32 keV, stosując do tego celu interferometr z trzydziestoma zestawami soczewek, otrzymując w rezultacie 15.4 mikrometra i długość drogi spójności przestrzennej 110 mikrometrów, również bardzo blisko wartości zmierzonych innymi metodami. W ostatniej części rozdziału Autor przedstawia, dość skrótowo, możliwe aplikacje powyższych interferometrów, poza ich oczywistymi zastosowaniami, jako urządzeń do analizy frontu falowego, fotolitografii w zakresie rentgenowskim, czy też jako układów poprawiających rozkład przestrzenny wiązki promieniowania z zakresu rentgenowskiego do zastosowań na synchrotronach lub laserach na swobodnych elektronach.

W ostatnim, siódmym rozdziale, Autor przedstawia kolejny, ostatni typ interferometru, jakim jest interferometr dwuzwierciadlany, w konstrukcji odmiennej od znanych do tej pory interferometrów ze zwierciadłami leżącymi w jednej płaszczyźnie. Opracowany przez Autora interferometr pozwala na rejestrację interferogramów w przypadku źródeł o niskiej spójności przestrzennej, co jest niewątpliwie zaletą, jednakże słaba kontrola nad jakością powierzchni zwierciadeł, powstałych na skutek anizotropowego trawienia krzemu nie pozwala mu na uzyskanie widzialności prążków bliskiej jedności, wskutek rozpraszania promieniowania na powierzchniach o relatywnie dużej chropowatości. Dodatkową zaletą takich interferometrów, o czym mówi Autor, jest możliwość umieszczenia

różnych konstrukcji interferometru w monolitycznym układzie poprzez wytrawienie zarówno wieloelementowych soczewek refrakcyjnych jak i interferometrów zwierciadlanych, co niewątpliwie uatrakcyjniło rozwiązania proponowane przez Autora. Ostatni, ósmy rozdział pracy stanowi jej podsumowanie.

Uzyskane przez Autora wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju interferometrii w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego. Praca porusza problemy jak najbardziej aktualne i budzące duże zainteresowanie w środowisku naukowym, jednocześnie przedstawiając sposób ich rozwiązania. Układy tego typu, szczególnie w postaci struktur monolitycznych, znajdują z pewnością zastosowanie jako dodatkowa, szybka diagnostyka wiązek na źródłach wielkoskalowych, lecz niektóre z nich mogą być także użyte do diagnostyki źródeł kompaktowych, których rozwój w ostatnich latach był bardzo znaczący. Przedstawione w rozprawie rezultaty badań zostały częściowo przedstawione w dwóch artykułach opublikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej (Optics Letters, 2015 i Optics Express, 2014) z czego jeden został opublikowany z nazwiskiem Doktoranta jako pierwszego autora, w 2015 roku. Aktualnie, liczba cytowań prac Doktoranta wynosi jedynie 1 (na podstawie danych z bazy Scopus), jednak, jest to zapewne związane z krótkim okresem czasu, jaki upłynął od chwili publikacji.

Praca licząca 111 stron wraz z 47 rysunkami i 75 odnośnikami literaturowymi została w całości napisana w języku angielskim. Pomimo faktu, iż nie jest to praca zbyt obszerna, jej zawartość w stopniu dobrym odzwierciedla osiągnięte przez Autora wyniki. Układ pracy i jej struktura nie budzą zastrzeżeń. Sama praca jest napisana w sposób zwarty, prostym i zrozumiałym językiem. Eksperymentalne wyniki badań, podbudowane często przez symulacje numeryczne, Autor przedstawił w sposób przejrzysty i jasny, odnosząc się do treści zawartych w publikacjach naukowych swojego autorstwa, nie pomijając jednak prac innych grup badawczych, zajmujących się podobną tematyką. Wyciągnięte wnioski są poprawne i przekonujące, zaś cel pracy został osiągnięty.

Do pewnych mankamentów pracy, które przekazane zostały Doktorantowi oraz usunięte w poprawionej wersji pracy, należą dość częste błędy językowe i edytorskie (zła numeracja niektórych równań i rysunków). Autor niekiedy stosuje skróty myślowe, które mogą dla przyszłych czytelników być niejasne, przykładowo określa kąt padania w podrozdziale 1.2 do normalnej (co często ma miejsce w zakresie widzialnym widma elektromagnetycznego), po czym, niemal natychmiast, przedstawia równanie na kąt krytyczny w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego, gdzie kąt padania zwyczajowo mierzy się do powierzchni. Doktorant nie ustrzegł się również niewielkich błędów merytorycznych, nazywając rys. 2.4. widmem undulatora, błędów w równaniach 2.16 oraz 4.5, czy też niejasnego opisu osi rzędnych na rys. 6.4. Błędy te powstały jednak, w moim odczuciu, raczej poprzez nieuwagę i pośpiech podczas tworzenia pracy, który dał się zauważyć w trakcie jej czytania, a nie poprzez brak kompetencji. Nie wpłynęły one jednak w żaden negatywny sposób na osiągnięte i przedstawione w pracy wyniki badań. Uważam, iż rezultaty te są na bardzo wysokim poziomie.

Świadczą one także o dużym zaangażowaniu i ilości pracy poświęconej przez Autora rozprawie.

Bazując na przedstawionej pracy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Doktoranta dogłębnego zrozumienia zjawisk i opanowania szerokiego zakresu wiedzy z optyki i fotoniki oraz zagadnień z inżynierii materiałowej. Zatem z pełnym przekonaniem uważam, iż przedstawiona praca spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Mikhaila Lyubomirskiy'ego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. inż. Przemysław Wachulak