



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego

Institut
Optoelektroniki **ioe**

płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, 29 czerwca 2020 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Marii Sowy pt. „X-ray plenoptic microscopy”

Praca doktorska magister Katarzyny Marii Sowy powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. Pawła Koreckiego. Praca została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w 2020 roku. Praca dotyczy opracowania nowatorskiego urządzenia do mikroskopii plenoptycznej w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego (ang. hard X-rays, HXR) oraz badań związanych z możliwością trójwymiarowego obrazowania w tym zakresie z rozdzielczością przestrzenną 400-500 nm i głębią ostrości rzędu kilkunastu mikrometrów. Zagadnienia poruszane w pracy doktorskiej są nowatorskie na skalę światową i są pierwszą demonstracją możliwości obrazowania plenoptycznego w zakresie HXR z użyciem optyki polikapilarnej.

Kamery plenoptyczne zrealizowano do tej pory w zakresie widzialnym. W pracy przedstawiono możliwość realizacji takiego urządzenia w zakresie spektralnym HXR. Celem tej pracy było zaprojektowanie i skonstruowanie mikroskopu rentgenowskiego, który realizuje obrazowanie plenoptyczne w zakresie rentgenowskim. Kamery plenoptyczne na zakres widzialny wykorzystują duże apertury numeryczne obiektywów do uchwycenia obrazów pod wieloma kątami. Ze względu na to, że soczewki refrakcyjne na zakres twardego promieniowania rentgenowskiego posiadają bardzo małe apertury numeryczne (na poziomie miliradianów) budowa plenoptycznej kamery na ten zakres spektralny nie została jeszcze zademonstrowana przez ograniczenia techniczne. Praca pani Sowy demonstruje możliwość zminimalizowania tego problemu poprzez zastosowanie optyki polikapilarnej zamiast typowo stosowanych w zakresie widzialnym macierzy mikrosoczewek.

Prace nad mikroskopem plenoptycznym w zakresie HXR wymagały opracowania nowej wielowiązkowej geometrii obrazowania z użyciem strukturyzowanego polikapilarnego elementu optycznego, dzięki któremu otrzymano wytworzono dużą liczbą wtórnych źródeł promieniowania rentgenowskiego o rozmiarze sub-mikrometrowym generujących swobodnie propagujące się mikrowiązki. Dzięki tej geometrii mikrowiązki oświetlały obiekt pod różnymi kątami i generowały wiele obrazów obiektu w płaszczyźnie detektora, odpowiadających widokowi obiektu pod różnymi kątami. Zastosowanie geometrii wielowiązkowej, nowoczesnych detektorów rentgenowskich z czułością na poziomie pojedynczych fotonów umożliwiło rejestrację obrazów obiektów silnie absorbujących i fazowych w sposób wydajny i z dużym stosunkiem sygnału do szumu. Następnie zaadoptowano wielowiązkową geometrię do obrazowania obiektów trójwymiarowych. Wykorzystano fakt, iż w ognisku optyki polikapilarnej wszystkie mikrowiązki oświetlają obiekt pod różnymi kątami. W rezultacie,

możliwe było obrazowanie z rozdzielczością przestrzenną ~ 500 nm i rozdzielczością poosiową (głębnią ostrości) wynoszącą ok. 10 mikrometrów. Zademonstrowano także trzy tryby obrazowania: w pobliżu płaszczyzny ogniskowej – tryb (reżim) plenoptyczny, w którym rozdzielczość poosiowa jest największa, tryb pośredni w odległości nieco większej od optyki polikapilarnej niż tryb plenoptyczny, a także tryb formowania obrazu w apozycyjnym oku zespolonym, w którym każdy obszar próbki był oświetlony inną mikrowiązką. W tym trybie traci się rozdzielczość głębokościową, jednakże możliwe jest uzyskanie dużo większego pola widzenia wynoszącego kilkaset mikrometrów. W rozprawie zademonstrowano także możliwość połączenia plenoptycznej mikroskopii rentgenowskiej z konwencjonalnymi skanami tomograficznymi, a także z rentgenowską spektroskopią fluorescencyjną. Taki zabieg umożliwił wielomodalną analizę rentgenowską z użyciem lampy rentgenowskiej jako źródła promieniowania oraz pojedynczego rentgenowskiego elementu optycznego w postaci soczewki polikapilarnej.

Praca doktorska zawiera 119 stron w pięciu rozdziałach i posiada 98 odnośników literaturowych. Pracę rozpoczyna wstęp, w którym w syntetyczny sposób omówiono historyczny zarys obrazowania trójwymiarowego w szczególności obrazowania plenoptycznego w zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego oraz próbę przeniesienia tej technologii do zakresu rentgenowskiego. Przedstawiono koncepcję pracy, w której opracowano mikroskop plenoptyczny na zakres HXR w dwóch etapach. Omówiono także układ pracy.

W rozdziale pierwszym omówiono koncepcję obrazowania plenoptycznego. Opis standardowej kamery plenoptycznej przedstawiono na bazie obrazów wykonanych standardową i komercyjnie dostępną kamerą plenoptyczną Lytro. We wstępie zawarto także krótki opis z poprzedniej, niedokończonej próby przeniesienia mikroskopii plenoptycznej do domeny rentgenowskiej przez Longo z użyciem mikrosoczewek Fresnela. Wstęp kończy się opisem związku między obrazowaniem plenoptycznym i tomografią rentgenowską o ograniczonym kącie w geometrii projekcyjnej.

Rozdział drugi zawiera opis teoretyczny powstawania obrazu w obrazowaniu opartym na propagacji. W rozdziale tym poddano również przeglądowi różne rodzaje istniejących elementów optycznych pracujących w zakresie rentgenowskim, opartych o zjawiska odbicia, załamania i dyfrakcji, kładąc szczególny nacisk na optykę kapilarną i jej rozszerzenia w postaci optyki polikapilarnej.

Rozdział trzeci rozpoczyna się omówieniem koncepcji i przedstawieniem rezultatów mikroskopii rentgenowskiej ze opartej na wykorzystaniu defektów w optyce polikapilarnej. Mikroskopia wspomagana defektami była przedmiotem pracy magisterskiej Autorki i zapoczątkowała badania nad plenoptyczną mikroskopią rentgenowską. Główna część rozdziału trzeciego opisuje ideę i przedstawia wyniki eksperymentów dla tak zwanej wielopunktowej (wielowiązkowej) mikroskopii projekcyjnej. Jest ona rozszerzeniem obrazowania wspomaganego defektami z tą różnicą, iż kapilary generujące wiązkę oświetlającą badany przedmiot są wybierane w kontrolowany sposób za pomocą maski z otworkami w taki sposób, iż możliwe jest uzyskanie kilkuset projekcji rentgenowskich obiektów o niewielkich rozmiarach umieszczonych w ognisku optyki polikapilarnej, co poprzez odpowiednie przetworzenie obrazu daje możliwość znacznej poprawy SNR. Wielopunktowa mikroskopia projekcyjna przedstawiona w tym rozdziale jest jednak dopiero pierwszym krokiem w kierunku opracowania układu do plenoptycznej mikroskopii rentgenowskiej.

Rozdział czwarty opisuje właśnie ten układ, demonstrując pomyslną realizację mikroskopii plenoptycznej w zakresie promieniowania rentgenowskiego HXR. Mikroskop ten umożliwił wykonanie plenoptycznego obrazowania rentgenowskiego próbek umieszczonych

w płaszczyźnie ogniskowej optyki polikapilarnej, w miejscu nakładania się mikrowiązek rentgenowskich, gdzie badany obiekt oświetlany jest pod różnymi kątami widzenia. Zaprezentowano możliwości trójwymiarowego obrazowania różnych obiektów, w tym obiektów biologicznych, a także określono rozdzielczość przestrzenną i poosiową. W ostatniej części rozdziału czwartego wykazano możliwość połączenia techniki rentgenowskiej mikroskopii plenooptycznej z konwencjonalnymi technikami obrazowania tomograficznego opartymi na obrocie badanej próbki i rejestracji jej kątowych projekcji oraz z rentgenowską spektroskopią fluorescencyjną do analizy rentgenowskiej próbek, w tym obiektów biologicznych.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie rezultatów pracy i wnioski końcowe. Autorka przedstawiła również możliwości zastosowań opracowanego przez siebie mikroskopu plenooptycznego, np. jako stacja badawcza na linii wiązki PolyX, budowanej na synchrotronie SOLARIS w Krakowie.

Z pracą doktorską powiązane są bezpośrednio dwa artykuły:

1. Sowa, K., Jany, B. & Korecki, P. (2018), 'Multipoint-projection X-ray microscopy', *Optica* 5(577), 6 cytowań, 5 bez autocytoowań, IF: 9.26,
2. Sowa, K., Kujda, M. & Korecki, P. (2020), 'Plenoptic X-ray microscopy', *Applied Physics Letters* 116(014103), 0 cytowań, IF: 3.51.

Są to publikacje wieloautorskie, w których Autorka jest pierwszym, wiodącym autorem. Do czasu sporządzania tej recenzji praca numer 1 była cytowana 6 razy, 5 bez autocytoowań, zaś praca numer 2, z uwagi na krótki czas od chwili opublikowania, nie posiada jeszcze cytowań (dane z bazy Scopus, na dzień 23.06.2020 r.). Należy stwierdzić, iż prace te opublikowano w czołowych czasopismach optycznych i fizycznych, co podkreśla nowatorstwo idei i znaczenie naukowe przedstawionych w nich rezultatów. Ponadto, w swoim dorobku posiada ona pięć innych artykułów z lat 2015-2019, również w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak *Scientific Reports*, *Physical Review Letters* i *Optics Express*. Niektóre z tych artykułów są również związane z tematyką pracy doktorskiej. Do czasu sporządzania tej recenzji prace te były cytowane w sumie 23 razy.

W pracy przedstawiono następujące nowości w stosunku do aktualnego stanu wiedzy:

1. opracowano nową geometrię obrazowania, tzw. wielowiązkową mikroskopię rentgenowską, w oparciu o optykę polikapilarną. Rezultaty opublikowano w pracy [1].
2. opracowano mikroskop plenooptyczny w zakresie HXR bazujący na wielowiązkowej mikroskopii rentgenowskiej. Rezultaty opublikowano w pracy [2].
3. zademonstrowano trzy reżimy (tryby) obrazowania 3-D w układzie mikroskopu plenooptycznego: w pobliżu płaszczyzny ogniskowej, w tzw. apozycyjnym oku zespolonym oraz tryb pośredni.

Na tej podstawie stwierdzam, iż praca doktorska Pani Sowy jest według mnie nowatorska i prezentuje rezultaty na światowym poziomie. Przygotowana jest w sposób merytorycznie poprawny, jest interesująca i napisana została w języku angielskim, co przyczyni się pozytywnie do zwiększenia jej zasięgu na naukowej arenie międzynarodowej. Ponadto, jest przygotowana bardzo starannie pod względem edytorskim. Uważam, iż jakość zaprezentowania uzyskanych wyników i poziom przygotowania pracy jest na poziomie bardzo dobrym.

Jednakże Autorka nie ustrzegła się kilku niedociągnięć. Poniżej przedstawiam pewne nieścisłości, lub też aspekty wymagające komentarza ze strony Autorki pracy, z którymi spotkałem się na etapie lektury:

1. drobne błędy językowe, np. "If the camera is focus on a new plane", "Therefore, if it was be possible" - str. 23, "left to tight" - str. 30, "eb" - str. 39.
2. Strona 18: „capture 3D information about the light” chodziło chyba o “3D information about the object/scene...”
3. Strona 21: “Fig. 1.3(a) is represented as a point (x, u) on the ray-space diagram in Fig. 1.3(b).”, jeśli odwołujemy się do punktu to jego współrzędne powinny być (x', u'), (x,u) to przestrzeń punktów, przynajmniej tak wynika z rys. 1.2 i dobrze byłoby zachować tę ciągłość.
4. Strona 23: Rys. 14b) i 1.4c) przedstawia soczewkę o stałej ogniskowej, zaś płaszczyzna fotodetektora przesuwa się przed ognisko (rys. b) i za ognisko (rys. c). Natomiast opis do rysunku na str. 23 omawia soczewkę o zmiennej ogniskowej i płaszczyznę fotodetektora o stałej odległości od soczewki „If the lens was focused closer or further than the photodetector plane”. Nie bardzo rozumiem konieczność tej zamiany.
5. Równanie 1.4 w stosunku do 1.3. Zamieniono miejscami parametry funkcji $L(u, v, x, y)$.
6. Rys. 1.5 a) i b) nie są oznaczone, poza tym rys. b) jest nieco mylący, gdyż pokazuje ogniskową f_1 równą odległości obrazowej ($f_1 = x_1$) dla $z_0 < \infty$.
7. Równania 2.3-2.8 zawierają pochodne przestrzenne. Skąd w równaniach 2.9 i 2.10 wzięła się raptem pochodna po czasie. Czy nie powinna być to pochodna po (x,y)? Dodatkowo wydaje mi się, że brakuje w tych równaniach nawiasów?
8. Po obliczeniu n^2 z równania 2.6 i wstawieniu do 2.9 w równaniu 2.10 powinien być znak minus w trzecim członie.
9. Równanie 2.12 wymaga aby współczynnik absorpcji był w jednostkach [1/m], natomiast wynikiem równania 2.14 będzie wartość bezjednostkowa.
10. Równanie 2.17: zabrakło zmiennych po których odbywa się całkowanie.
11. Równanie 2.23: w członie fazowym $\exp[ik(x'^2+y'^2)/2]$ jednostki się nie zgadzają, brakuje zmiennej przestrzennej w mianowniku, to powoduje, że w równaniu 2.25 w tym członie jest niepotrzebna wielkość Δ w mianowniku, gdyż będzie ona w członie związanym z powiększeniem M/Δ .
12. Równanie 2.35. Brakuje znaku minus oznaczającego absorpcję. Równanie w tej postaci opisuje wzmocnienie sygnału.
13. Równanie 2.37 posiada błąd w mianowniku w członie odwrotnej transformaty Fouriera.
14. Strona 42: „A monochromatic plane waves are focused at a focal distance $f + n\lambda/2$, where n is a number of Fresnel zones and r_n is a radius of n^{th} zone.” Soczewka Fresnela ogniskuje w pierwszym rzędzie dla monochromatycznego płaskiego frontu falowego na stałej odległości f , a nie na zmiennej zależnej of numeru strefy.
15. Równanie 2.44: $\sin\Theta \approx (r_N/f)$ a nie =.
16. Opis pod rys. 2.6. Podawanie dokładnych wartości składowych współczynnika załamania delta i beta wymaga podania energii rozpatrywanych fotonów.
17. Tabela 3.1. Dla porządku dobrze byłoby podać liczbę fotonów /sekundę bezpośrednio emitowanych z lampy. To pozwoliłoby oszacować sprawność energetyczną poszczególnych elementów optycznych.
18. Rys. 4.1b), po prawej stronie. Czy zależność nie powinna być przypadkiem $\sim \gamma(D+d)$? Szczególnie, iż komentarz w tekście mówi „Propagation along optical axis reduces from a shear (see Eq. (1.4)) to a simple scaling governed by the magnification factor.”
19. Strona 102. Pole widzenia określone jest w jednostkach długości.
20. Oznaczenia (symbole) użyte w pracy czasami pokrywają się, np. β oznacza kąt rozbieżności pojedynczej kapilary w optyce kapilarnej, a także część urojoną współczynnika załamania.

Moje uwagi i komentarze zostały przekazane Autorce pracy. Mam również kilka pytań, które narodziły się podczas lektury rozprawy i na które prosiłbym o odpowiedź w trakcie obrony. Pytania te są wymienione poniżej.

1. Zastanawia mnie stosowalność równania 2.58 określającego rozmiar wiązki w ognisku. Jeśli „OFD is typically on the order of millimetres or centimetres and the typical focal spot size at a level of several microns” (strona 46), to jak można uzyskać rozmiary wiązki w zakresie pojedynczych mikronów dla energii np. 60 keV zgodnie z tym równaniem? Może te d_{spot} powinno być w mikrometrach?
2. Co było powodem dziwnego według mnie unormowania kontrastu w równaniu 3.7 do poziomu tła? Pytam o to, ponieważ w tym przypadku kontrast jest największy i wynosi 1 przy braku sygnału I_0 , wynosi zero dla $I_0=I_b$. Potem zaś kontrast staje się ujemny dla typowego przypadku kiedy to $I_0>I_b$. Proszę o komentarz.
3. Strona 63. Dlaczego sygnał (intensywność) bez optyki jest mniejszy niż sygnał z optyką kolimującą, natomiast po wstawieniu dodatkowej optyki ogniskującej spada znacznie poniżej poziomu obu poprzednich sygnałów? W jaki sposób to było zmierzone? Zastanawia mnie zależność tych trzech sygnałów. Proszę o komentarz.
4. W przypadku obrazowania obiektów biologicznych i mikrokulek polistyrenowych (Rys. 3.22, 4.19) proszę o informację, jak te próbki były zamontowane. Czy były na membranie?
5. Rys. 4.16. Obrazy mikrokulek. Jeśli kulki były tego samego rozmiaru (rys. 4.14 około 3 mikrometrów średnicy) to jaki jest powód, iż na Rys. 4.16 c) ich rozmiar w rekonstrukcjach jest inny? Czy zmiana odległości o te kilkadziesiąt mikrometrów po osi optycznej tak wpływała na powiększenie?

Pomimo tych drobnych uwag stwierdzam, iż rozprawa pani Katarzyny Marii Sowy jest merytorycznie poprawna. Jej układ i struktura nie budzą zastrzeżeń. Jest napisana w sposób zwarty, prostym i zrozumiałym językiem. Dowodzi ona ogromnego wysiłku ze strony Autorki i jej Promotora, co poskutkowało uzyskaniem bardzo interesujących i nowych rezultatów przedstawionych w pracy. Wyniki swoich badań Autorka omówiła w sposób przejrzysty i jasny, odnosząc się do treści zawartych w publikacjach naukowych swojego autorstwa, nie pomijając jednak doniesień innych grup badawczych. Wyciągnięte wnioski są poprawne i przekonujące.

Podsumowując, chciałbym z pełnym przekonaniem stwierdzić, iż uzyskane przez Autorkę wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju metod i układów do obrazowania w rentgenowskim zakresie spektralnym. Obrazowanie w tym zakresie niesie szereg problemów technologicznych, takich jak, między innymi, często niedostateczna ilość promieniowania, niskiej efektywności optyka, konieczność długotrwałych ekspozycji, silna absorpcja promieniowania w materii (szczególnie zakres XUV i SXR). W związku z tym gratuluję i jestem pod wrażeniem uzyskanych przez Autorkę i Promotora wyników eksperymentalnych demonstrujących po raz pierwszy obrazowanie plenoptyczne w zakresie HXR. Biorąc pod uwagę możliwości dzisiejszych źródeł oraz dostępną optykę na ten zakres długości fal promieniowania elektromagnetycznego w tym momencie jest mi ciężko wyobrazić sobie odpowiedniejszą (efektywniejszą) konfigurację sprzętową pozwalającą na zademonstrowanie tego typu obrazowania w tym zakresie spektralnym. Jest to aktualnie unikalna konfiguracja z optycznego punktu widzenia i trudno będzie w najbliższej przyszłości zademonstrować równie efektywny układ obrazujący. Tak jak Autorka stwierdza, z pewnością pomoże użycie promieniowania synchrotronowego jako źródła w mikroskopii plenoptycznej, co znacznie skróci czasy ekspozycji. W badaniach obiektów biologicznych chciałbym jednak zwrócić uwagę na konieczność oszacowania i branie pod uwagę dawek promieniowania pochłoniętych

przez obiekt biologiczny. Z uwagi na geometrię obrazowania obiekt ten jest zlokalizowany w punkcie wspólnym dla kilkuset lub kilku tysięcy mikrowiązek, które oświetlają obiekt i pozwalają w sposób równoległy na rejestrację obrazów pod różnymi kątami, ale wymagane jest, aby ilość fotonów w każdej z tych wiązek była wystarczająco duża by pozwolić na rejestrację obrazu z odpowiednio wysokim stosunkiem sygnału do szumu, co powoduje, że dawka promieniowania pochłonięta przez obiekt może być wysoka. Autorka nie dyskutuje o tym w pracy, co jest zrozumiałe na tym etapie, jednak będzie to bardzo ważne w chwili, gdy mikroskop plenooptyczny będzie wdrożony jako stacja końcowa na linii synchrotronowej.

Bazując na przedstawionej pracy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Autorki dogłębnego zrozumienia zjawisk fizycznych zachodzących w czasie propagacji twardego promieniowania rentgenowskiego w układach obrazujących i obiektach fizycznych, włączając w to posługiwanie się zaawansowanym aparatem matematycznym do opisu tych zjawisk. Pozwoliło to jej na opracowanie mikroskopu plenooptycznego na ten zakres widmowy, jego optymalizacji i aplikacji do badań próbek rzeczywistych, w tym biologicznych. Aby tego dokonać musiała opanować szeroki zakres wiedzy z fizyki (optyki) i matematyki oraz posiadała profesjonalne umiejętności pracy w laboratorium optycznym. Wykazała się również znajomością najnowszej literatury przedmiotu. Zdobyta wiedza pozwoliła jej na samodzielne posługiwanie się nią, poszerzanie jej obszaru, a także wyrażanie nowatorskich idei przedstawionych w jej pracy doktorskiej.

Zatem z pełnym przekonaniem uważam, iż przedstawione w pracy wyniki badań spełniają wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, zaś magister Katarzyna Maria Sowa w pełni zasługuje na dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, z uwagi na bardzo wysoki poziom naukowy przedstawionych rezultatów badań oraz nowatorski charakter pracy wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



płk prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak