



# Uniwersytet Warszawski

## Wydział Fizyki

ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa  
tel.: (022) 55 46 827, fax.: (022) 55 46 882  
e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl  
www.igf.fuw.edu.pl

dr hab. Ryszard Buczyński  
[rbuczyns@igf.fuw.edu.pl](mailto:rbuczyns@igf.fuw.edu.pl)  
Tel: 0 22 55 46 857

Warszawa, 28 marca 2017

**Recenzja  
pracy doktorskiej  
"Polarymetr fourierowski o wysokiej czułości do pomiaru małych zmian dwójłomności  
liniowej"  
mgr inż. Marzeny Prętkiej**

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nowej metody pomiarowej pozwalających na pomiar dwójłomności optycznej w układzie polarymetru fourierowskiego o bardzo wysokiej czułości. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac eksperymentalnych obejmujący budowę demonstracyjnych układów pomiarowych pozwalających na pomiary próbek objętościowo jednorodnych w płaszczyźnie prostopadłej od osi optycznej oraz próbek o zmiennej przestrzennie liniowej dwójłomności. Praca powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Kurzynowskiego na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Autorka rozwija metodę pomiaru fazy przy pomocy analizy prążków obrazu interferencyjnego za pomocą transformaty Fouriera poprzez obrót elementów układu oraz zmianę architektury klasycznego układu pomiarowego co pozwala na uzyskanie dużego przesunięcia prążków przy bardzo niewielkiej zmianie dwójłomności badanej próbki. W szczególności w pracy przedstawione są nowe wyniki dotyczące opracowanych metod pomiarowych jednoeksperymentalnych, które pozwalają na dokładny pomiar dwójłomności bez konieczności rekonfiguracji systemu pomiarowego i prowadzenia serii pomiarów. Wyniki przedstawionych badań mogą mieć istotny wpływ na zastosowanie przedstawionej metody do dynamicznych pomiarów dwójłomności w ośrodkach o zmiennej strukturze m.in. ciekłych kryształach oraz diagnostyce medycznej przy wykrywaniu patogenów oraz pomiarach glukozy i cholesterolu.

Przeprowadzone prace badawcze przez p. Marzenę Prętką doprowadziły do opracowania nowej oryginalnej czułej metody pomiaru dwójłomności, która została przedstawiona we wniosku o ochronę wynalazku pt. 'Sposób pomiaru niewielkich zmian dwójłomności' w czerwcu 2015 roku. Patent został przyznany w listopadzie 2016 roku. Mgr M. Prętka jest współautorką w.w. patentu.

Praca doktorska pani Marzeny Prętkiej zawiera wyniki opublikowane w latach 2012-16 w 7 artykułach indeksowanych przez Web of Science: 2 publikacje w Proc. of SPIE, 1 publikacja w czasopiśmie Photonics Letters of Poland oraz 4 w czasopismach z dziedziny optyki znajdujących się na liście filadelfijskiej w tym: Optics Express oraz Applied Optics. Pani mgr Prętka jest pierwszym autorem 3 z wyżej wymienionych publikacji. Na szczególną uwagę zasługują w pracy opublikowane w Applied Optics w 2015 oraz 2016, które prezentują oryginalne osiągnięcia w zakresie budowy nowych czułych układów do pomiaru dwójłomności. Natomiast praca opublikowana w Optics Express w 2012 roku poświęcona jest klasyfikacji osobliwości tzw. worteksów polaryzacyjnych oraz ich badaniom eksperymentalnym.

Praca doktorska pani Marzeny Prętkiej składa się z 7 rozdziałów, gdzie pierwsze 2 rozdziały stanowią wprowadzenie do tematu doktoratu, natomiast pozostałe 5 rozdziałów (rozdziały 3-7) zawierają oryginalne analizy i wyniki badań przeprowadzonych przez Autorkę

Rozdział 1 stanowi wstęp do pracy i zawiera opis motywacji podjęcia tematu badawczego. Rozdział 2 obejmuje wprowadzenie podstawowych pojęć z zakresu ośrodków optycznych dwójłomnych, opis podstawowych metod pomiarowych: metodzie pomiaru opartej na obrocie elementów układu, metodzie wieloekspozycyjnej wykorzystującej sekwencyjnie pomiar kilku wartości natężenia światła, metodzie z użyciem sygnałów zmiennych w czasie oraz metodzie fotometrycznej. Oba rozdziały zawierają odnośniki do aktualnej literatury światowej i pozwalają czytelnikowi na szybkie, zapoznanie się aktualnym stanem wiedzy w dziedzinie metod pomiaru dwójłomności liniowej. Zawartość rozdziału świadczy o dogłębnym zrozumieniu tematyki podjętej pracy przez Autorkę. Niestety opisowy sposób przedstawienia układów pomiarowych bez schematów i rysunków oraz z minimalną liczbą wzorów czyni ten rozdział trudnym do zrozumienia, jeśli nie posiada się dość zawansowanej wiedzy w dziedzinie.

Rozdział 3 przedstawia opis układu polaryskopowego do pomiaru dwójłomności liniowej wykorzystywanego i rozbudowywanego w rozprawie. Autor przedstawia opis matematyczny oparty na Macierzach Mullera i wektorach Stokesa. Rozdział zawiera także szczegółowy opis



matematyczny układu, metodykę justowania układu oraz prowadzenia pomiarów. W rozdziale wprowadzono także zagadnienia związane z czułością układu pomiarowego i kontrastem prążków, które są kluczowe dla prac badawczych przedstawionych w rozprawie. Sposób opisu jest przystępny, ale równocześnie precyzyjny.

Rozdział 4 zawiera szczegółową teoretyczną i eksperymentalną analizę układu polaryskopowego pod względem niedokładności justowania układu oraz ich wpływu na otrzymywane wyniki pomiarowe i czułość pomiaru. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych Autorka wykazała, że wartość kąta azymutalnego ustawienia próbki i elementu kompensującego mają kluczowe znaczenie dla nachylenia charakterystyki układu i kontrastu otrzymywanych prążków interferencyjnych. W tym rozdziale przeanalizowano również wpływ ustawienia pozostałych elementów układu m.in. płytki ćwierćfalowej oraz analizatora stanowiących tzw. analizator kołowy na dokładności pomiaru częstotliwości nośnej. Przeprowadzone pomiary eksperymentalne potwierdziły otrzymane numerycznie wyniki oraz wykazały możliwość otrzymania maksymalnej czułości na poziomie  $C=1300$  w rozważanym układzie eksperymentalnym.

Rozdział 5 przedstawia wyniki analizy numerycznej oraz przeprowadzonych prac eksperymentalnych dla badanych próbek o zmiennej dwójłomności w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej. Autorka przeprowadziła analizę oraz pomiary dla próbek z niewielkimi zmianami amplitudy oraz zmianami wolnozmiennymi przestrzennie. Przedstawiona metoda wykorzystuje fourierowską metodę demodulacji prążków, która także została opisana w tym rozdziale. Oprócz metody demodulacji prążków Autorka przedstawia także inne stosowane metody rekonstrukcji fazy z rozkładów natężeniowych m.in. przesunięcia fazowego, metodę falkową szkieletowania oraz omawia ich zakres stosowania i ograniczenia. Na podstawie przeprowadzonych symulacji wykazano, że rekonstrukcja fazy dla próbki z jednorodnym rozkładem dwójłomności jest idealna w przypadku całkowitych wartości składowych częstotliwości nośnej. W przypadku niecałkowitych wartości składowych nośnych występują odchylenia w odtworzonej różnicy faz od idealnych wartości na poziomie  $10^{-4}$  stopnia. W przypadku próbek o niejednorodnym rozkładzie faz rekonstrukcja fazy zawsze będzie obciążona błędem niezależnie od całkowitych lub niecałkowitych wartości składowych częstotliwości nośnej. Autorka wykazała, że otrzymywane przy rekonstrukcji błędy można znacznie zmniejszyć przez zastosowanie dodatkowych filtrów np. okna Hamminga. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały duże odstępstwa od wyników symulacji.

Autorka przeprowadziła analizę otrzymanych wyników, za przyczynę błędnych wyników wskazała niejednorodność przestrzenną elementu kompensującego i zaproponowała modyfikację układu pomiarowego.

Rozdział 6 przedstawia wyniki prac dotyczących modyfikacji układu pomiarowego, które miały za cel zredukowanie zniekształceń wprowadzanych do układu przez rzeczywiste niejednorodne elementy optyczne. Autorka zaproponowała 3 zmodyfikowane układy pomiarowe oraz zweryfikowała eksperymentalnie możliwość poprawienia jakości otrzymywanych wyników we wszystkich zaproponowanych układach. Na podstawie przeprowadzonych testowych pomiarów z jednorodną próbką otrzymano poprawę jakości otrzymanych wyników w układzie gdzie ćwierćfalówkę oraz element kompensujący postawiono przed kolimatorem a mierzoną próbkę zamieniono kolejnością z pryzmatem Wollastona. Otrzymane w zmodyfikowanym układzie wyniki odbiegają jednak jakościowo od wyników przewidywanych w symulacjach. Aby polepszyć uzyskane eksperymentalnie wyniki Autorka zaproponowała zastosowanie wybranych metod przetwarzania obrazów do wstępnej obróbki obrazów prążkowych, aby polepszyć ich jakość i usunąć artefakty związane z niejednorodnością oświetlenia i szumem termicznym. Do obróbki numerycznej obrazów prążkowych użyto m.in. filtrów spinowych, filtrów uśredniających oraz filtrów Hamminga. Ich zastosowanie nie miało znacznego wpływu na poprawę jakości otrzymywanych wyników.

Rozdział 7 zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych pracy.

Moja ogólna ocena rozprawy jest wysoka. Praca stanowi ważny element aktualnych badań dotyczących rozwijania metod pomiarowych o wysokiej czułości do określania dwójłomności materiałów optycznych. Metody te mogą mieć także istotne zastosowania w naukach biomedycznych, gdzie pomiar dwójłomności pozwala na bardzo dokładne określenie stężeń glukozy lub identyfikację patogenów znacznikowanych cząsteczkami tworzącymi wraz z nimi elementy dwójłomne, o czym wspominała Autorka w Rozdziale 1.

Przedstawione wyniki nie są prostą modyfikacją wyników znanych z literatury. O oryginalności badań i wadze otrzymanych wyników świadczy poznanie patentu na opracowany układ pomiarowy oraz 2 publikacje w czasopiśmie Applied Optics. Na uznanie zasługuje również konsekwentny sposób prowadzenia badań. Przedstawione wyniki i wnioski opierają się na przeprowadzonych systematycznych badaniach zarówno numerycznych jak i eksperymentalnych.



Autorka stawia tezy, a następnie konsekwentnie weryfikuje je numerycznie i eksperymentalnie. Nie wszystkie prace eksperymentalne zakończyły się sukcesem. Autorce nie udało się otrzymać wyników eksperymentalnych zgodnych z pracami numerycznymi dotyczącymi próbek o zmiennej dwójłomności w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej, gdyż jakość rzeczywistych elementów optycznych np. ciekłokrystalicznych rotatorów polaryzacji odbiega znacznie od zakładanych teoretycznie, a często również od deklarowanych przez producenta. Niemniej jednak nawet negatywna weryfikacja eksperymentu pozwala na osiągnięcie wartościowych wniosków dotyczących praktycznych możliwości wykonania niektórych obiecujących teoretycznie układów.

Z drugiej strony należy podkreślić, że prace doświadczalne związane z pomiarami jednorodnych próbek dwójłomnych zakończyły się sukcesem i pozwoliły na pozytywne zweryfikowanie tezy postawionej na początku pracy. Przeprowadzone przez Panią mgr Prętką pomiary w zaproponowanym przez nią układzie pomiarowym potwierdziły możliwość uzyskania czułości ponad  $C=1300$ , podczas gdy standardowe układy oferują czułość na poziomie  $C=1$ .

Rozprawa jest napisana w jasny i precyzyjny sposób, bogato ilustrowana wynikami doświadczalnymi w części opisującej wyniki prac wykonanych przez Autorkę. Jak każda praca zawiera też pewne słabsze fragmenty. W części stanowiącej wprowadzenie do własnych badań, w Rozdziale 2, Autorka bardzo ograniczyła część dotyczącą wprowadzenia formalizmu matematycznego i podstawowych pojęć związanych z opisem macierzowym optycznych ośrodków anizotropowych. Bardzo interesująca analiza stanu wiedzy dotycząca innych metod stosowanych do pomiaru dwójłomności jest przedstawiona wyłącznie opisowo, nie zawiera żadnych rysunków ani szczegółowych informacji dotyczących czułości metod i ich zestawienia, które łatwo pozwoliłyby na odniesienie otrzymanych w niniejszej pracy wyników do obecnego stanu wiedzy. Jej struktura przypomina wstęp do artykułu naukowego, a nie rozdział opisujący stan wiedzy. Przyjęta przez Autorkę koncepcja czyni ten rozdział trudny do zrozumienia dla niespecjalistów, a olbrzymia wiedza która dysponuje Autorka nie została przedstawiona w przystępnej formie.

W Rozdziałach 4 i 5 brakuje rysunku lub zdjęcia pełnego schematu układu pomiarowego. Autorka na Rys. 3.1 przedstawiła schemat ideowy, a w rozdziale 4 (str. 44) znajduje się tylko opis elementów układu pomiarowego. Ze względu na kluczową rolę budowy układu pomiarowego na jakość rekonstrukcji fazy w badanej próbce, która została przedstawiona w Rozdziale 6 umieszczenie pełnego schematu w rozdziale 4 ułatwiłoby czytelnikowi śledzenie postępu badań

Autorki pracy. W Rozdziale 6.3 Autorka przedstawia analizę błędów zrekonstruowanej fazy w zależności od czułości dla układów z klinem dwójłomnym i kompensatorem Wollastona. Rys. 6.13 oraz 6.14 zawierają wyniki serii 1 i 2, które nie są opisane i trudno domyślić się ich znaczenia z samego tekstu. Podobnie na str. 94 oraz 95 rys. 6.3 oraz 6.5 przedstawiają wyniki pomiarów serii 1-7, które nie są jednoznacznie zdefiniowane w opisie. W pracy zamiennie używane są pojęcia transformacji i transformaty Fouriera. Wydaje mi się że poprawna jest druga forma. Część dziesiąta od całkowitej w podawanych w tekście wartościach liczbowych jest oddzielana w wielu miejscach pracy znakiem kropki zamiast przecinka.

Rozdział 7 stanowiący podsumowanie pracy także pozostawia pewien niedosyt, gdyż jest zbyt ogólny i ogranicza się do podania wyników otrzymanych w pracy. Brakuje w nim porównania osiągniętych wyników z istniejącym stanem wiedzy oraz wskazania jakie cechy zaproponowanych układów stanowią o ich przewadze i mogą mieć kluczowe znaczenie dla przyszłych zastosowań.

Moim zdaniem w praca dodatkowo zyskałaby na wartości jeśli Autorka przedstawiłaby wyniki pomiarów próbki lub serii próbek materiału dwójłomnego o znanych parametrach zmierzonego w zmodyfikowanym układzie zaproponowanym przez Autorkę oraz w innym, standardowym, powszechnie używanym układzie pomiarowym. Pozwoliłoby to na obiektywne i bezpośrednie wykazanie przewagi zaproponowanego w niniejszej pracy układu pomiarowego. Przedstawione w Rozdziale 3.2 wyniki pomiarów ćwierćfalówki i przesuwnika ciekłokrystalicznego nie mają pomiaru referencyjnego.

Powyższe uwagi dotyczą słabszych aspektów przedstawionej pracy, ale nie podważają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Autorki dotyczących opracowania nowej architektury polaryskopowego układu pomiarowego o bardzo wysokiej czułości, które zostały pozytywnie zweryfikowane przez środowisko naukowe w postaci publikacji w renomowanych czasopismach naukowych i przyznanego patentu.

Uzyskane wyniki stanowią istotny krok w rozwoju technik pomiarowych dwójłomności liniowej o bardzo wysokiej czułości i mogą się znacząco przyczynić do powstania nowych przyrządów metrologicznych. Ze względu na prostotę układu pomiarowego oraz pracę w trybie jednoeksperyjnym możliwe będzie jego zastosowanie do dynamicznych pomiarów osrodków

niejednorodnych zawierających elementy anizotropowe zmienne w czasie, takie jak struktury ciekłych kryształów lub znacznikowanych mikroorganizmów.

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa magister Marzeny Prętkiej, w świetle artykułu 13. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, jak również zgodnie z Ustawą z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw, może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Ryszard Buczyński

