

Prof. Dr hab. Lech Longa
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytetu Jagiellońskiego
w Krakowie

Kanada, 29 czerwca, 2026

Recenzja ROZPRAWY DOKTORSKIEJ Pani Mgr inż. Moniki Salamagi

p.t.

Innowacyjne rozwiązania układów do pomiaru parametrów ośrodków dwójtomnych przy użyciu przesuwników ciekłokrystalicznych z uwzględnieniem skręconych nematycznych ciekłych kryształów

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy opracowania i analizy innowacyjnych układów polarymetrycznych do pomiaru parametrów ośrodków dwójtomnych, ze szczególnym wykorzystaniem przesuwników ciekłokrystalicznych: liniowych LCVR oraz skręconych nematycznych ciekłych kryształów TNLC. Główny problem badawczy można ująć jako poszukiwanie takich konfiguracji polarymetrycznych, które przy uproszczonej konstrukcji, ograniczonej liczbie elementów oraz możliwie niewielkiej liczbie pomiarów zachowują automatyzację, stabilność i zdolność wiarygodnego odtwarzania parametrów optycznych badanych ośrodków.

Rozdziały 1–3 tworzą podstawę teoretyczną i motywacyjną pracy. Autorka omawia znaczenie polarymetrii w badaniach ośrodków anizotropowych, przedstawia formalizmy Muellera-Stokesa, Jonesa i Muellera-Ścierskiego oraz wprowadza ciekłe kryształy jako elementy aktywne układów pomiarowych. Szczególnie istotne jest rozróżnienie między klasycznymi LCVR, które modulują głównie różnicę faz, a TNLC, w których zmianie podlega również eliptyczność fal własnych.

Pierwszy zasadniczy kierunek badań, przedstawiony w rozdziale 4, dotyczy częściowego polarymetru Muellera zbudowanego z dwóch polaryzatorów liniowych i dwóch LCVR. Uproszczenie konstrukcji prowadzi do uzyskania 9-elementowej macierzy Muellera-Ścierskiego, w której brakuje trzeciego wiersza i trzeciej kolumny. Jest to przypadek szczególnie trudny, ponieważ znane metody uzupełniania niepełnych macierzy nie dawały jednoznacznego rozwiązania, gdy brakujący wiersz i kolumna miały ten sam indeks.

Autorka rozprawy zaproponowała dwie procedury wyznaczania 9 elementów macierzy na podstawie pomiarów natężenia: metodę 16-natężeń i metodę 10-natężeń.

Następnie opracowała algorytm numeryczny oparty na metodzie Newtona-Raphsona, umożliwiający odtworzenie parametrów ośrodka w formalizmie Muellera-Ścierskiego, a następnie rekonstrukcję pełnej macierzy. Kluczowym elementem metody jest rozwiązanie problemu niejednoznaczności wyników przez dodatkowy pomiar próbki po niewielkim obrocie azymutalnym. Istotne jest, że nie wymaga to obrotu elementów polarymetru ani wstawiania dodatkowych komponentów.

Za najbardziej wyróżniający się wynik rozprawy uznaję właśnie rekonstrukcję pełnej macierzy Muellera-Ścierskiego, w ramach przyjętego opisu niedepolaryzujących ośrodków dwójtomnych, na podstawie niepełnej 9-elementowej macierzy w której brakuje trzeciego wiersza i trzeciej kolumny. Wynik ten ma znaczenie metodyczne, ponieważ zamiast bezpośrednio „domierzać” brakujące elementy, autorka odtwarza najpierw fizyczne parametry ośrodka, a dopiero z nich wyznacza pełną macierz. Poprawność procedury potwierdzono symulacyjnie i eksperymentalnie. Dla testowej ćwierćfalówki otrzymano m.in. $\theta = -1,00 \pm 0,73^\circ$, $\gamma = 91,01 \pm 0,33^\circ$, $T_f = 0,985 \pm 0,063$ i $T_s = 0,985 \pm 0,060$, co potwierdza wysoką zgodność z oczekiwanymi parametrami elementu. Wyniki tej części rozprawy zostały opublikowane w *Applied Optics*.

Drugi kierunek badań, przedstawiony w rozdziale 5 rozprawy, obejmuje charakterystykę komórek TNLC jako elementów aktywnych w polarymetrii. Pani mgr inż. Salamaga opracowała metody pomiaru elementów macierzy Muellera-Ścierskiego w funkcji napięcia, wyznaczania parametrów fal własnych, kąta skręcenia, orientacji direktora oraz charakterystyki fazowo-napięciowej. Wyniki pokazują, że TNLC są ośrodkami niedichroicznymi, a napięcie moduluje różnicę faz i eliptyczność fal własnych, jednak nie pozwala kontrolować tych parametrów niezależnie. Ważnym wnioskiem technologicznym jest wskazanie, że do zastosowań polarymetrycznych potrzebne są TNLC o możliwie dużej, lecz płynnie przestrajanej liniowej składowej różnicy faz, co najmniej rzędu 3π , a zmiany między punktami adiabatycznymi powinny być rozłożone w szerokim zakresie napięć. Oznacza to konieczność wspólnej optymalizacji grubości komórki i dwójtomności materiału. Warto nadmienić, że TNLC były dotąd stosowane głównie jako rotatory polaryzacji, modulatory przestrzenne lub elementy polarymetrów Stokesa, natomiast w polarymetrii Muellera ich użycie jest znacznie rzadsze. Autorka rozprawy przywołuje tutaj m.in. prace Blakeneya, Peinado, Bielaka oraz Chironi i Lemmi wśród których szczególnie ważna jest praca Chironi i Lemmi, w której zademonstrowano polarymetr Muellera oparty na dwóch TNLC.

Trzeci kierunek badań, przedstawiony w rozdziale 6, dotyczy jednokierunkowego polarymetru podwójnego przejścia. W takim układzie ten sam moduł pełni rolę generatora i analizatora stanów polaryzacji, a światło dwukrotnie przechodzi przez próbkę dzięki odbiciu od zwierciadła. Jest to rozwiązanie istotne dla próbek, do których dostęp z obu stron jest utrudniony lub niemożliwy, w tym potencjalnie dla badań rogówki oka *in vivo*. Autorka przeanalizowała cztery konfiguracje modułu PSG/PSA: P-TNLC, P-TNLC-TNLC, P-

TNLC1-TNLC2 oraz P-TNLC-LCVR. Układy zoptymalizowano z użyciem liczby warunkowej CN i równoważonej wariancji EWW. Dla układu P-TNLC wykazano, że optymalna maksymalna liniowa składowa różnicy faz wynosi $\Gamma_{\max} = 3\pi$, a dalsze jej zwiększanie nie poprawia istotnie stabilności numerycznej. Analiza wykazała jednak, że rozważane konfiguracje nie prowadzą do pełnych 16 niezależnych równań wymaganych w ogólnej polarymetrii Muellera. Rząd macierzy pomiarowej wynosi 10, co ogranicza zastosowanie układu przede wszystkim do ośrodków liniowo dwójłomnych. Jest to ważny i uczciwie przedstawiony wynik: TNLC nie eliminują wszystkich ograniczeń układu podwójnego przejścia, ale pozwalają zmniejszyć liczbę elementów i uprościć konstrukcję.

Istotnym praktycznym rezultatem rozprawy jest również autorskie oprogramowanie do obsługi przesuwników ciekłokrystalicznych, automatyzacji pomiarów i wyznaczania charakterystyk fazowo-napięciowych. Program LCVR umożliwia realizację serii 16 konfiguracji pomiarowych, natomiast CharacteristicLC służy do wyznaczania charakterystyki fazowo-napięciowej LCVR i został wdrożony w laboratorium dydaktycznym oraz używany przez innych pracowników. Ten element pracy potwierdza praktyczny, aparaturowo-programistyczny wkład autorki.

Z rozprawą wiążą się publikacje o różnym statusie. Publikacja „Partial Mueller matrix polarimeter using liquid crystal modulators”, Applied Optics 62(9), 2329–2337 (2023), której M. Salamaga jest pierwszą autorką, odpowiada bezpośrednio wynikom rozdziału 4. Publikacja „Analysis of the possibilities to generate and analyze different polarization states of light by twisted nematic liquid crystal”, SPIE Proceedings Series, 1250216, 1–8 (2022), dokumentuje jedno z pierwszych wyników dotyczących TNLC i stanowi recenzowaną publikację pokonferencyjną. Prace „In vivo measurements of corneal birefringence properties using the one-way reflective Mueller polarimetry” oraz „Polarimeter for measuring the properties of birefringent media in reflective mode” pełnią w rozprawie rolę ważnych punktów odniesienia: pierwsza pokazuje aplikacyjne zastosowanie wcześniejszego układu do badań rogówki, druga stanowi bazę dla koncepcji jednokierunkowego polarymetru podwójnego przejścia.

Należy również odnotować aktywność konferencyjną Kandydatki. Z treści rozprawy wynika, że wyniki badań dotyczące komórek TNLC były prezentowane na konferencjach naukowych, w których brała udział, a rezultaty badań nad jednokierunkowym polarymetrem podwójnego przejścia przedstawiała na kilku konferencjach krajowych i międzynarodowych. Szczególnie warto wskazać udział w konferencji CLC 2025, gromadzącej specjalistów w dziedzinie ciekłych kryształów, ponieważ doprowadził on do nawiązania współpracy z naukowcami z Wojskowej Akademii Technicznej i do rozmów dotyczących nowych próbek TNLC przeznaczonych do dalszych testów polarymetrycznych.

Końcowe wnioski rozprawy są wyważone i dobrze świadczą o rozumieniu ograniczeń badanych układów. Autorka nie twierdzi, że TNLC rozwiązują wszystkie

problemy polarymetrii, lecz pokazuje, że mogą stać się podstawą prostszych, szybszych i potencjalnie tańszych układów pomiarowych, zwłaszcza w zastosowaniach, w których dopuszczalne jest przyjęcie określonych założeń o właściwościach badanego ośrodka. Praca łączy analizę teoretyczną, algorytmy rekonstrukcji, symulacje, konstrukcję i kalibrację aparatury, pomiary eksperymentalne oraz własne oprogramowanie. Stanowi tym samym wartościowy wkład w rozwój polarymetrii ośrodków dwójłomnych.

Reasumując, stwierdzam, że przedłożona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego z zakresu polarymetrii ośrodków dwójłomnych, wykazuje bardzo dobrą znajomość podstaw teoretycznych i metod eksperymentalnych oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydatkę. W związku z tym rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w obowiązującym porządku prawnym, w szczególności wynikające z ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i wnoszę o dopuszczenie pani mgr inż. Moniki Salamagi do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.



Podpisany elektronicznie przez
Lech Waldemar Longa
01.07.2026
1:27:45 -03'00'