

Warszawa, 02.09.2026r

Dr hab. inż. Urszula Laudyn, prof. uczelni

Wydział Fizyki

Politechnika Warszawska

ul. Koszykowa 75

00-662 Warszawa

urszula.laudyn@pw.edu.pl

Tel: 501 247 339

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Salamagi pod tytułem

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

wykonanej pod opieką dr. hab. Władysława Artura Woźniaka, prof. uczelni

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Salamagi została wykonana na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki w Katedrze Optyki i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne. Promotorem rozprawy jest dr hab. Władysław Artur Woźniak, prof. uczelni.

Przedmiot rozprawy

Rozprawa dotyczy polarymetrii optycznej, w szczególności pomiaru parametrów ośrodków dwójłomnych metodami wykorzystującymi formalizm Stokesa-Muellera oraz wykorzystania przestrajalnych elementów ciekłokrystalicznych. W pracy można wyróżnić dwa główne nurty badawcze. Pierwszy dotyczy odtworzenia pełnego zestawu parametrów polaryzacyjnych ośrodka dwójłomnego z niepełnej, dziewięcioelementowej macierzy Muellera-Ścierskiego, w której brakuje jednocześnie wiersza i kolumny o tym samym indeksie, a więc z przypadku uznawanego w literaturze za szczególnie trudny. Autorka stawia pytanie o możliwość odzyskania parametrów badanego ośrodka oraz rekonstrukcji pełnej macierzy na podstawie ograniczonej informacji. Drugi nurt badań dotyczy możliwości zastosowania skręconych nematycznych ciekłych kryształów TNLC w jednokierunkowym układzie podwójnego przejścia, w którym ten sam moduł optyczny kolejno pełni funkcję generatora i analizatora stanów polaryzacji. Celem nadrzędnym było opracowanie rozwiązań o uproszczonej konstrukcji, bez elementów obracanych i wymiennych, przy zachowaniu zdolności do charakteryzacji ośrodka, oraz określenie granic informacyjnych takich układów. Praca łączy wyprowadzenia

analityczne, symulacje numeryczne i badania eksperymentalne prowadzone na samodzielnie zestawionych stanowiskach pomiarowych. W części dotyczącej pierwszego z problemów rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, potwierdzone publikacją w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym; w części drugiej ma ona przede wszystkim charakter modelowy i optymalizacyjny, a jej najważniejszym rezultatem jest wskazanie fundamentalnego ograniczenia rozważanej architektury pomiarowej.

Jest to tematyka aktualna i uzasadniona naukowo. Uproszczenie konstrukcji polarymetrów, eliminacja elementów mechanicznie obracanych, zmniejszenie liczby modulatorów oraz ograniczenie liczby koniecznych pomiarów stanowią problemy istotne zarówno z punktu widzenia metrologicznego, jak i aplikacyjnego. Jednocześnie obszar ten jest już rozwinięty i obejmuje szereg wcześniejszych rozwiązań wykorzystujących przesuwniki ciekłokrystaliczne oraz komórki skręconego nematycznego ciekłego kryształu. Analiza literatury potwierdza, że zastosowanie TNLC w polarymetrii nie jest nową ideą. Oryginalność przedłożonej do recenzji rozprawy leży w konkretnych konfiguracjach układów, opracowanych procedurach rekonstrukcji oraz sposobie wykorzystania sprzężonego modułu PSG/PSA.

Główny cel pracy został sformułowany jako opracowanie układów polarymetrycznych do badania ośrodków dwójłomnych przy użyciu przesuwników ciekłokrystalicznych, z uwzględnieniem TNLC. Następnie cel ten rozbito na pytania badawcze dotyczące częściowego polarymetru LCVR oraz na hipotezy dotyczące przydatności TNLC w nieklasycznym polarymetrze podwójnego przejścia.

W mojej ocenie słabszą stroną rozprawy jest brak jednej precyzyjnej tezy naukowej. Zamiast niej Autorka formułuje cel główny, trzy pytania badawcze odnoszące się do części pierwszej oraz dwie szerokie hipotezy i dwa pytania odnoszące się do części drugiej. Pytania badawcze dotyczące części pierwszej są sformułowane poprawnie: są konkretne, weryfikowalne i prowadzą bezpośrednio do wyników podrozdziałów 4.3.1–4.3.2.

Gorzej zdefiniowana została hipoteza zakładająca uzyskanie „układów pomiarowych nowej jakości”, zminimalizowanie błędów i kosztów „bez utraty jakości, szybkości i precyzji pomiarów”. Hipoteza zawiera pięć niezależnych twierdzeń, w których brakuje zdefiniowanego kryterium ilościowego oraz wskazanego układu odniesienia. W obecnej formie bardziej przypomina to program badawczy niż hipotezę naukową.

Realizacja celu rozprawy, w moim odczuciu, jest nierównomierna. Pytania dotyczące części pierwszej zostały w pełni zrealizowane i zweryfikowane: od modelu, przez symulacje, aż po eksperyment, a następnie zakończone publikacją. W części dotyczącej TNLC opracowano modele, wykonano szeroką charakterystykę elementów oraz przeprowadzono symulacje i częściowe testy eksperymentalne, lecz nie wykonano końcowej weryfikacji całego proponowanego polarymetru na próbce o znanych parametrach. Sama Autorka w podsumowaniu stwierdza, że dalsze prace i nowe próbki TNLC mają

dopiero umożliwić „doświadczalne potwierdzenie jego użyteczności do badania ośrodków liniowo dwójłomnych”.

Omówienie treści rozprawy

Rozprawa liczy 143 strony i została napisana w języku polskim. Składa się z ośmiu rozdziałów o klasycznej dla rozpraw doktorskich strukturze: wprowadzenia z celem i pytaniami badawczymi (rozd. 1), dwóch rozdziałów przeglądowych obejmujących formalizm polaryzacji i polarymetrii (rozd. 2) oraz fizykę ciekłych kryształów (rozd. 3), trzech rozdziałów prezentujących wyniki własne (rozd. 4, rozdz. 5, i rozdz. 6), rozdziału poświęconego autorskiemu oprogramowaniu (rozd. 7) oraz podsumowania (rozd. 8). Pracę zamyka bibliografia licząca 199 pozycji i wykaz dorobku naukowego. Wprowadzenie (Rozdział 1) przedstawia motywację badań, podstawową problematykę polarymetrii, przegląd typów modulatorów stosowanych w modułach PSG/PSA i uzasadnienie wyboru LCVR oraz TNLC. Przegląd modulatorów jest rzeczowy, z prawidłowym wskazaniem wad każdego z rozwiązań. Pozytywnie oceniam jasne rozdzielenie zagadnienia częściowej rekonstrukcji macierzy Muellera od zagadnienia zastosowania TNLC w układzie podwójnego przejścia. Bardzo dobrze oceniam sposób, w jaki Autorka rozgranicza swój wcześniejszy udział w pracach zespołu od wkładu własnego rozprawy. Trafnie zdefiniowana jest też luka badawcza, obserwacja, że przy braku trzeciego wiersza i trzeciej kolumny macierzy Muellera-Ścierskiego pozostaje jedynie siedem różnych elementów, świadczy o dobrym rozumieniu struktury problemu. Mam natomiast zastrzeżenia do sposobu przedstawienia luki badawczej. Stwierdzenie, że zastosowanie TNLC w polarymetrii Muellera jest „ledwo zauważalne” oraz, że sformułowane pytania badawcze „nie znalazły dotychczas odpowiedzi w literaturze”, w moim odczuciu są stwierdzeniami zbyt daleko idącymi. Część szerzej sformułowanych zagadnień była wcześniej analizowana w literaturze; oryginalny jest natomiast szczególny wariant architektury i procedury rekonstrukcji. Moją uwagę zwraca również stwierdzenie „żadne elementy nie są usuwane ani obracane” przy jednocześnie stosowanej metodzie rozstrzygania niejednoznaczności rozwiązań z podrozdziału 4.3.2.2, która wymaga azymutalnego obrotu badanej próbki i powtórzenia całej serii pomiarów.

Rozdział 2 stanowi obszerne wprowadzenie teoretyczne potrzebne w dalszych częściach rozprawy. Zakres jest poprawny: obejmuje stany polaryzacji, dwójłomność, rachunek Jonesa, formalizm Stokesa-Muellera, macierz Muellera-Ścierskiego, częściową polarymetrię i metody optymalizacji. Szczególnie dobrze oceniam podrozdział 2.4 w którym wprowadzono ogólne równanie pomiaru polarymetrycznego i macierz pomiarową $[W]$ oraz omówiono rolę jej rzędu. To właśnie te równania pozwalają Autorce w rozdziale 6 sformułować kluczowy wniosek.

Rozdział zawiera kilka błędów, których nie sposób uniknąć w tak obszernych pracach. Większość wymienionych uchybień wygląda na błędy redakcyjne lub błędy przepisywania wzorów. Poniżej przytaczam kilka z nich:

- Na s. 11, w opisie polaryzacji kołowej, podano, że składowe pola powinny być przesunięte o nieparzystą wielokrotność π , podczas gdy prawidłowy warunek wynosi $(2k + 1)\pi/2$.
- s. 12: zakres kąta eliptyczności dla polaryzacji lewoskrętnej zapisano jako $45^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$, powinno być $-45^\circ \leq \theta < 0^\circ$.
- Na s. 14 stwierdzono, że po dopasowaniu polaryzacji padającej do stanu własnego „dwójłomność nie występuje”. W takim przypadku nie znika dwójłomność materiału; pobudzony zostaje jedynie jeden stan własny i nie obserwuje się względnego opóźnienia dwóch pobudzonych składowych.
- Na s. 19 stwierdzono, że znormalizowany wektor Stokesa (M, C, S) opisuje sferę o promieniu I , podczas gdy po normalizacji promień wynosi 1.
- Na s. 21, równ. (2.58): zapisano $C = \cos 2\theta_r \sin 2\theta_r$. Z definicji stosowanych w całej pracy powinno być chyba $C = \cos 2\theta_r \sin 2\alpha_r$.
- Na s. 21, równ. (2.60): legenda rozkładu Lu–Chipmana została odwrócona, macierz $[M_A]$ opisano jako diatenuator, a $[M_D]$ jako depolaryzator, podczas gdy w oryginalnym rozkładzie jest odwrotnie. Sam zapis wzoru jest jednak poprawny.
- Również równanie (2.77) budzi zasadnicze wątpliwości: przy symetrycznej kombinacji iloczynów zespolonych występuje czynnik i , co prowadziłoby do urojonej wielkości używanej następnie do budowy rzeczywistej macierzy Muellera.
- Na s. 30: stwierdzono, że błędy są minimalizowane, gdy liczba warunkowa jest „zoptymalizowana (minimalna lub maksymalna)”. Przy przyjętej definicji $CN = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ optimum oznacza wyłącznie minimalizację, co zresztą Autorka poprawnie podaje kilka zdań dalej.

Rozdział 3 przedstawia podstawy fizyki ciekłych kryształów, działanie LCVR i model TNLC. Pozytywnie oceniam fakt, że Autorka nie idealizuje modelu TNLC. Omawia ograniczenia prostego modelu Lu–Saleha, wpływ zakotwiczenia powierzchniowego i możliwość stosowania bardziej zaawansowanych modeli przy większych napięciach. Wartościowy jest także przegląd zastosowań ciekłych kryształów w polarymetrii, znacznie precyzyjniejszy niż sformułowania z wprowadzenia. Moje ogólne zastrzeżenie dotyczy poziomu szczegółowości części materiałowej. Rozdział liczy 8 stron, z czego podrozdziały 3.1 i 3.2 mają charakter podręcznikowego wprowadzenia jakościowego, tymczasem kolejne rozdziały 5 i 6 dotyczą właściwości fizycznych konkretnych komórek, a sama rozprawa formułuje pod ich adresem konkretne wymagania technologiczne. Zabrakło mi w rozdziale 3 informacji bardziej szczegółowych pozwalających uzasadnić wymagania stawiane w rozdziałach 5 i 6. W całym rozdziale nie podano ani jednego parametru materiałowego: nie ma wartości n_e , n_o ani Δn , nie ma dyspersji, stałych elastyczności, anizotropii dielektrycznej, lepkości obrotowej czy też temperatur przejść fazowych.

Po drugie, nie wprowadzono pojęcia przejścia Fréedericksza ani pojęcia napięcia progowego. Rozdział stwierdza jedynie, że „im większe napięcie tym większa rotacja molekuł”. Krzywe pomiarowe zamieszczone w rozdziale 5 wskazują na efekt progowy, jednak bez wprowadzenia tego pojęcia pozostaje to w pracy niewyjaśnione. Po trzecie, pominięto całkowicie rolę stałych elastyczności i teorię Franka-Oseena. Przywołano dość lakonicznie formalizm marzeciowy Berremana, jednak nie podano, że sam rozkład dyrektora wyznacza się niezależnie z minimalizacji energii swobodnej Franka-Oseena w polu elektrycznym. W moim odczuciu stwierdzenie o nieliniowym profilu skręcenia pozostaje w pracy niewyjaśnione. Po czwarte, zakotwiczenie powierzchniowe potraktowano wyłącznie opisowo („cząsteczki blisko powierzchni nie pochylają się”). Nie wprowadzono pojęcia energii zakotwiczenia, rozróżnienia zakotwiczenia silnego i słabego ani kąta tzw. pretiltu, mimo że wielkości te decydują o opóźnieniu omawianym na s. 36. Po piąte, czas odpowiedzi omówiono jakościowo, bez podania zależności czasów narastania i relaksacji od grubości warstwy, lepkości reorientacyjnej i stałych elastyczności. Tymczasem w podsumowaniu formułowana jest teza, że proponowany układ będzie szybszy od układu odniesienia, bez konkretnych danych ciężko to ocenić.

Do drobniejszych uchybień należy zaliczyć bardzo ogólne stwierdzenia, m.in. to, że cząsteczki pod wpływem pola elektrycznego obracają się równoległe do pola. Wymaga to dodatkowej anizotropii dielektrycznej. Dość niefortunne jest również określenie „dezorientacja molekuł” na stronie 34 czy „molekularna dezorientacja” na stronie 38. Określenie planarnej tekstury nematycznej jako układu, w którym „molekuły są ułożone warstwowo” (s. 35), jest mylące, bo warstwowość jest cechą faz smektycznych; stwierdzenie, że cząsteczki „starają się obrócić równoległe do kierunku pola” (s. 35), zakłada dodatnią anizotropię dielektryczną i wymaga takiego zastrzeżenia. Zdanie na str 36 „część cząsteczek pozostaje zakotwiczona w warstwie wyrównania”, raczej chodziło o warstwę ograniczającą? Zdanie na stronie 38: „Cząsteczki znajdujące się bliżej okienek komórki TNLC...” o jakich okienkach tutaj mowa? Ponowne określenie „łatwość rotacji poszczególnych warstw” może być mylące w odniesieniu do nematycznych ciekłych kryształów.

Rozdział 4 jest w mojej ocenie najmocniejszą częścią rozprawy. Autorka wyprowadza jawne rozwiązanie analityczne dla ośrodka niedichroicznego, proponuje procedurę numeryczną dla przypadku ogólnego, rozwiązuje problem dwuznaczności rozwiązań i weryfikuje metodę symulacyjnie oraz eksperymentalnie. W odczuciu recenzenta jest to bardzo rzetelna i nietrywialna praca, którą oceniam wysoko. Za wartościowy uważam także pomysł rozstrzygania niejednoznaczności rozwiązań przez powtórzenie pomiaru po niewielkim azymutalnym obrocie próbki. Obserwacja, że kąt azymutu rozwiązań prawidłowych rośnie o kąt obrotu, a rozwiązań błędnych maleje o tę samą wartość, jest niebanalna i została poprawnie zweryfikowana symulacyjnie (zestawienie Tabel 4.4 z 4.7 oraz 4.5 z 4.8 daje różnice dokładnie $+10^\circ$ i -10°). Kierunek zmiany odtworzonego azymutu umożliwia wybór prawidłowej rodziny rozwiązań bez rekonfiguracji samego PSG i PSA. Należy tu zaznaczyć, że

Ossikovski i Arteaga wykazali już w 2019 r., że niedepolaryzującą dziewięcioelementową macierz z brakującym wierszem i kolumną można uzupełnić, przy czym istnieją dokładnie 2 rozwiązania i potrzebna jest dodatkowa informacja o próbce, aby wybrać właściwe. Oryginalność pracy Salamagi polega zatem przede wszystkim na opracowaniu procedury opartej na parametrach Muellera-Ścierskiego oraz na praktycznym sposobie rozstrzygania niejednoznaczności poprzez kontrolowany obrót próbki. Wynik ten został opublikowany przez doktorantkę jako pierwszą autorkę w *Applied Optics* w 2023 r.

Napotkałam jednak kilka błędów, wymagających weryfikacji:

- we wzorze (4.18) element $m_{12} = m_{21}$ zawiera czynnik $(T_f^2 + T_s^2)/2$, zamiast $(T_f^2 - T_s^2)/2$. dla ośrodka niedichroicznego elementy pierwszego wiersza poza m_{11} powinny zniknąć, a w zapisanej postaci nie znikają.
- we wzorze (4.22) w ostatnim składniku występuje $T_s \sin \gamma$ zamiast iloczynu $T_f T_s \sin \gamma$, obecnego w analogicznych elementach macierzy.
- równanie (4.35) na s. 45 prowadzi do $T = T^+ = \sqrt{m_{11}}$, podczas gdy z (4.25) i (2.52) wynika $T^+ = m_{11} = T^2$, a zatem $T = \sqrt{T^+}$.
- równanie (4.37) na s. 49, wprowadzające warunek $M^2 + C^2 + S^2 = 1$ jako „dodatkowe równanie” wiążące ze sobą składowe wektora Stokesa badanego ośrodka, jest przy definicjach $M = \cos 2\theta \cos 2\alpha$, $C = \cos 2\theta \sin 2\alpha$, $S = \sin 2\theta$ tożsamością trygonometryczną, a nie niezależną informacją.

Moje zastrzeżenie do części eksperymentalnej dotyczy zestawienia Tabel 4.13 i 4.14 Dla tej samej ćwierćfalówki, na tych samych danych pomiarowych, metoda analityczna z podrozdziału 4.3.1 daje różnicę faz $86,1 \pm 1,4^\circ$ oraz $86,34 \pm 0,90^\circ$, a metoda numeryczna z podrozdziału 4.3.2 $91,01 \pm 0,33^\circ$. Rozbieżność bliska 5° jest wielokrotnie większa od podanych odchyłeń standardowych. Rozprawa nie komentuje tej rozbieżności; na s. 64 odchylenie metody analitycznej opisano jako „nieznaczne”. W moim odczuciu wymaga to wyjaśnienia.

Pomimo tych drobnych zastrzeżeń uważam rozdział 4 za bardzo dobry naukowo, aby stanowił zasadniczy oryginalny element rozprawy.

Rozdział 5 ma przede wszystkim charakter eksperymentalny i przedstawia pomiary dwóch komórek TNLC, komercyjnej firmy Thorlabs ($d = 6 \mu\text{m}$) i wykonanej w Politechnice Warszawskiej (E7, $d = 17 \mu\text{m}$) oraz autorską procedurę odtwarzania charakterystyki fazowo-napięciowej z pomiaru samej transmisji. Jest to wartościowy materiał eksperymentalny. Zabrakło mi informacji jaki materiał ciekłokrystaliczny został wykorzystany w komercyjnie dostępnej próbce. Czy była to ta sama mieszanina E7 jak w komórce przygotowanej w Politechnice Warszawskiej?

Za mocne strony uznaje: pomysłowy dobór czterech stanów wejściowych pozwalający wyznaczyć wszystkie 16 elementów macierzy przy prostych rachunkach; decyzję o nieaproxymowaniu krzywych pomiarowych; kontrolę spójności metody przez obrót komórki; oraz przede wszystkim sformułowanie praktycznych wymagań technologicznych wobec komórek TNLC.

Napotkałam jednak kilka błędów i nieścisłości wymagających wyjaśnienia.

Krok 7 algorytmu na s. 76 zapisano $\Gamma = \sqrt{\gamma^2 - \phi^2}$, podczas gdy z równania (3.4) rozprawy, $\gamma^2 = \phi^2 + (\Gamma/2)^2$, wynika $\Gamma = 2\sqrt{(\gamma^2 - \phi^2)}$. Brakuje czynnika 2. Co istotne, późniejsze wartości liczbowe, np. jednocześnie podane $\gamma_{\max} = 1.37\pi$ i $\Gamma_{\max} = 2.54\pi$, odpowiadają wyrażeniu z prawidłowym czynnikiem 2. Najprawdopodobniej zatem, błąd występuje w tekście, a nie w kodzie, ale wymaga to jednoznacznego potwierdzenia przez doktorantkę.

Drugą istotną wątpliwością jest interpretacja tzw. lokalnych punktów adiabatycznych. Zgodnie z modelem TNLC przedstawionym wcześniej w rozprawie, lokalny punkt adiabatyczny występuje dla $\gamma = m\pi$ (rozdział 3.3 str. 38), wówczas macierz Jonesa TNLC redukuje się do macierzy rotacji, a obrót polaryzacji liniowej jest równy kątowi skręcenia komórki ϕ (s. 38). Tę samą interpretację Autorka przyjmuje na s. 73, wykorzystując minimum transmisji pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami kołowymi do lokalizacji takiego punktu. Dla komórki Thorlabs minimum to przypisano napięciu $U = 2,67V$ (rys. 5.7, s. 77). Tymczasem niezależna rekonstrukcja charakterystyki na podstawie pomiaru między równoległymi polaryzatorami liniowymi prowadzi do minimum przy $U = 2,3V$, dla którego Autorka otrzymuje $\gamma = \pi$ (rys. 5.12–5.13, s. 81–82), natomiast dla $U = 2,67V$ podaje $\gamma = 0,7956\pi$. W ramach przyjętego modelu ten ostatni punkt nie spełnia więc warunku $\gamma = m\pi$. Dodatkowo przy $U = 2,67V$ zmierzony obrót wynosi $69,58 \pm 0,16^\circ$, podczas gdy niezależnie wyznaczony kąt skręcenia komórki wynosi $88,68^\circ$. Jest to niezgodne z własnością lokalnego punktu adiabatycznego, w którym obrót powinien być równy ϕ . Wyjaśnienie zaproponowane na s. 79, odwołujące się do małej grubości komórki, w moim odczuciu nie jest wystarczające. Zbyt mała grubość komórki może rzeczywiście powodować słabsze podążanie polaryzacji za директором, czyli odejście od limitu Maugina, jednak sama rozprawa wcześniej rozróżnia limit Maugina $\beta \gg \phi$ od lokalnego punktu adiabatycznego $\gamma = m\pi$ traktując je jako różne przypadki. W ramach modelu Lu–Saleha przyjętego w rozprawie warunek $\gamma = m\pi$ prowadzi, zgodnie z równaniem (3.2), do macierzy czystej rotacji o kąt ϕ . Dlatego wyjaśnienie rozbieżności wyłącznie małą grubością komórki oznacza odejście od założeń tego modelu i wymaga odrębnego uzasadnienia.

Dodatkowo stwierdzenie na stronie 79, że *komórka jest „na tyle cienka, że cząsteczki nie zdołały wykonać pełnego obrotu płaszczyzny polaryzacji”* jest niefortunne, molekuły ciekłego kryształu nie wykonują obrotu płaszczyzny polaryzacji. Skręca się dyrektor, natomiast stan polaryzacji ewoluuje w wyniku propagacji przez przestrzennie zmieniający się ośrodek anizotropowy.

Z drobniejszych uwag, nie sprecyzowano, czy podawane napięcie jest wartością skuteczną, amplitudą czy wartością międzyszczytową; jest to istotne, ponieważ model z rozdziału 3 odnosi kąt pochylenia do wartości skutecznej, a w rozdziale 6 porównywane są przebiegi sinusoidalny i prostokątny.

W rozdziale 6 Autorka analizuje cztery warianty wspólnego modułu PSG/PSA, opracowuje metody wyznaczania rzeczywistych stanów generatora i analizatora, przeprowadza optymalizację orientacji polaryzatora, bada wpływ parametrów komórki i sygnału sterującego, a na końcu wyznacza rząd rzeczywistej macierzy pomiarowej. Metoda wyznaczania wektora Stokesa analizatora wyłącznie z pomiarów natężenia (równ. 6.2, s. 93) jest pomysłowa i użyteczna. Badanie wpływu kształtu i częstotliwości sygnału modulującego dostarcza praktycznej wiedzy, której brakuje w literaturze przedmiotu. Najwyżej jednak oceniam to, że Autorka nie poprzestała na analizie liczby warunkowej, lecz zbadała również rząd rzeczywistej macierzy pomiarowej. Wykazała, że dla analizowanej architektury wynosi on 10 i nie zwiększa się przy zmianie kąta azymutu polaryzatora, kąta skręcenia TNLC, orientacji direktora, maksymalnej retardancji, gęstości próbkowania ani wariantu konstrukcji PSG/PSA (s. 110). Jest to naukowo istotny wynik ograniczający, ponieważ wskazuje, że proponowana klasa układów nie może dostarczyć 16 liniowo niezależnych informacji wymaganych do rekonstrukcji dowolnej pełnej macierzy Muellera. Autorka następnie prawidłowo zawęży zakres zastosowania i wykazuje, że dla ośrodków liniowo dwójłomnych problem można sprowadzić do dziewięciu niezależnych równań i dziewięciu elementów macierzy.

Sprawdzenia wymagają relacje pomiędzy współczynnikami macierzy pomiarowej przedstawione na s. 111. W tekście stwierdzono, że współczynniki pozadiagonalne są parami równe ($w_{12} = w_{21}$, $w_{13} = w_{31}$, $w_{23} = w_{32}$) albo różnią się znakiem ($w_{14} = -w_{41}$, $w_{24} = -w_{42}$, $w_{34} = -w_{43}$). Tymczasem przebiegi pokazane na rys. 6.26 nie dla wszystkich par wydają się zgodne z tym opisem; w szczególności dla par w_{13}/w_{31} , w_{23}/w_{32} , w_{14}/w_{41} i $\frac{w_{24}}{w_{42}}$ wizualnie obserwuje się relacje przeciwne do podanych w tekście. Ponieważ Autorka zaznacza, że zależności te zostały zweryfikowane bezpośrednio na macierzach współczynników, zasadne byłoby wyjaśnienie, czy rozbieżność wynika z oznaczeń na rys. 6.26, z zapisu relacji w tekście, czy z przyjętej konwencji. Kwestia ta jest istotna, ponieważ wskazane symetrie współczynników stanowią następnie podstawę uzasadnienia redukcji problemu do dziewięciu niezależnych równań dla ośrodka liniowo dwójłomnego.

W odczuciu recenzenta najistotniejszym ograniczeniem części eksperymentalnej rozdziału 6 jest brak pełnej weryfikacji eksperymentalnej poprawności działania proponowanego układu na próbce o znanych parametrach. Nie przedstawiono pomiaru referencyjnego ośrodka liniowo-dwójłomnego obejmującego wybór stanów PSG/PSA, rejestrację natężeń w proponowanym układzie, rekonstrukcję parametrów próbki oraz porównanie ich z niezależnie znanymi wartościami. Ograniczenie to jest przez Autorkę jasno wskazane w podsumowaniu rozprawy, gdzie stwierdzono, że dalsze prace z nowymi komórkami TNLC mają umożliwić doświadczalne potwierdzenie przydatności układu do badania ośrodków liniowo dwójłomnych. Rozdział 6 traktuję przede wszystkim jako wartościową analizę

teoretyczno-numeryczną i proof-of-concept elementów układu, a nie jako pełną eksperymentalną demonstrację gotowego polarymetru. Należy podkreślić, że badania i wyniki zaprezentowane w rozdziale 6 związane były z kierowanym przez Doktorantkę grantem Preludium.

Rozdział 7 poświęcono autorskiemu oprogramowaniu wspomagającemu prowadzenie pomiarów z wykorzystaniem elementów ciekłokrystalicznych. Aplikacja LCdevice umożliwia automatyzację pomiarów transmisji i stanu polaryzacji w funkcji napięcia sterującego, natomiast CharacteristicLC służy do wyznaczania i wykorzystywania charakterystyk fazowo-napięciowych przesuwników ciekłokrystalicznych. Wartością praktyczną tego rozwiązania jest jego rzeczywiste wykorzystanie zarówno w badaniach prowadzonych w laboratorium, jak i na stanowisku studenckim. Rozdział ma przede wszystkim charakter techniczno-użytkowy i uzupełnia przedstawione wcześniej wyniki eksperymentalne, dokumentując narzędzia opracowane przez Autorkę na potrzeby prowadzonych badań.

Rozdział 8 stanowi syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. Pozytywnie oceniam, że Autorka wskazuje również ograniczenia proponowanych rozwiązań, w szczególności stwierdzając, że w rozważanej architekturze PSG/PSA nie jest możliwe uzyskanie jednokierunkowego polarymetru podwójnego przejścia pozbawionego ograniczeń dotyczących klasy badanego ośrodka. Pewnego doprecyzowania wymaga natomiast stwierdzenie na s. 119, że „udowodniono” możliwość uzupełnienia niepełnej macierzy Muellera do pełnej postaci. Wykazanie to odnosi się do klasy ośrodków i modelu Muellera-Ścierskiego przyjętych w rozdziale 4, a nie do dowolnej macierzy Muellera, w szczególności opisującej ośrodek depolaryzujący. Podobnie deklarowane na s. 122 skrócenie czasu pomiaru dzięki sterowaniu pojedynczym TNLC należy traktować jako przewidywaną zaletę konstrukcyjną proponowanego rozwiązania; w rozprawie nie przedstawiono bezpośredniego, ilościowego porównania czasu pomiaru z układem wykorzystującym dwa LCVR.

Uwagi drobne i redakcyjne

- W spisie ważniejszych skrótów zamieniono angielskie rozwinięcia PSG i PSA (przy PSA podano Polarization State Generator, przy PSG — Polarization State Analyzer). Definicje polskie są poprawne.
- Luka w numeracji równań: po (5.10) następuje (5.20); równania (5.11)–(5.19) nie występują.
- Numer „Rys. 4.11” występuje dwukrotnie (s. 61 i 62)
- Brakuje rysunków o numerach 6.14 i 6.15 — po rys. 6.13 (s. 103) następuje bezpośrednio rys. 6.16.
- Odsyłacz „rys. 2.18” na s. 105 dotyczy rysunku 6.18; w podpisie tego rysunku występują podwójne znaki minus oraz ujemne wartości kąta skręcenia niespójne z tekstem.
- Rysunek 3.3 opatrzono źródłem „[Thorlabs]” bez odpowiadającej pozycji w bibliografii;

- Część rysunków w rozdziałach przeglądowych została wstawiona jako mapy bitowe o wyraźnie gorszej rozdzielczości niż pozostałe rysunki. Autorka konsekwentnie podaje źródła pozyskania tych rysunków, jednak część pozostała bez wskazania źródła m.in. 2.2, 2.4, 2.5 czy 3.2
- Rysunek 3.2 nie ma wskazanego źródła, a wydaje mi się dobrze znany z innych opracowań, rosze o informację, skąd został zaczerpnięty.
- Niespójna liczba cyfr znaczących w Tabeli 5.1
- Stosunkowo duża liczba literówek i kolokwializmów w rozdziale 6, wyraźnie wyższa niż w pozostałych częściach pracy (m.in. „odorności”, „zuważono”, „przypisywne”, „opisujacej”, „Zares”, „polaryztaora”, „eksperymentalne”, „funckcji”, „częstotliowość”, „TNCL”), co sprawia wrażenie braku końcowej korekty tego rozdziału.
- Liczne sformułowania oceniające bez podanej miary („duża dokładność”, „wysoka odporność”, „na tyle mała”, „prawie pokrywa się”) powtarzają się w całej pracy; w rozprawie z zakresu nauk fizycznych takie określenia powinny mieć odniesienie ilościowe.
- Rysunki mają opisane osie z jednostkami i są w większości czytelne, jednak brakuje jednolitej konwencji graficznej. Sprawia to wrażenie, że poszczególne wykresy powstawały w różnym czasie i nie zostały ujednolicone przed złożeniem pracy. Rozmiar czcionki opisów osi i legend zmienia się w bardzo szerokim zakresie. Umieszczenie legend oraz zasada ich tworzenia są w pracy niespójne. Konwencja opisu osi również zmienia się między rozdziałami, nie jest zachowana spójność.

Dorobek publikacyjny Doktorantki związany z rozprawą obejmuje jeden artykuł pierwszoautorski w *Applied Optics* (2023), bezpośrednio odpowiadający treści rozdziału 4, dwa artykuły współautorskie w *Optics Express* dotyczące wcześniejszych prac zespołu oraz recenzowany referat w materiałach konferencyjnych SPIE obejmujący część wyników rozdziałów 5 i 6. W połączeniu z samodzielnym wykonaniem modeli, oprogramowania, stanowisk i eksperymentów opisanym w rozprawie i świadczy o samodzielności badawczej i spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Reasumując, rekomenduję dopuszczenie Pani magister Moniki Salamagi do dalszych czynności w prowadzonym przewodzie doktorskim, w tym do publicznej obrony.

