

dr hab. inż. Andrzej Przemysław Ziółkowski  
Katedra Telekomunikacji i Fotoniki  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
al. Piastów 17  
70-310 Szczecin

Szczecin, 30.04.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Pilki pt:  
„Formation of vortex beams in nematic liquid crystals”**

**Informacje wstępne**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Pilki podejmuje tematykę tak zwanych *strukturyzowanych pól optycznych*. Zagadnienie to odnosi się do arbitralnego formowania fali elektromagnetycznej poprzez manipulację w obszarze wszystkich możliwych stopni swobody. Jest to zatem pojęcie szerokie, obejmujące manipulację częstotliwością, amplitudą, fazą, polaryzacją oraz strukturą przestrzenną i czasową wiązek optycznych. Zagadnienie badawcze, w którym specjalizuje się Doktorant jest związane ze szczególną grupą strukturyzowanych pól nazywanych w literaturze *wirami optycznymi*. Objęty rozprawą zakres badawczy dotyczy zagadnienia formowania się wiązek wirowych oraz cylindrycznych wiązek wektorowych poprzez wykorzystanie optycznych elementów ciekłokrystalicznych. Podjęta tematyka wydaje się być bardzo aktualna. Gwałtowny rozwój technologii optycznych w obszarach związanych z komunikacją i przetwarzaniem danych oraz optyczną mikromanipulacją i optycznie sterowanymi mikromechanizmami sprawia, że potrzeba prowadzenia prac nad efektywnymi metodami strukturyzowania pól optycznych staje się ewidentna. Fakt ten posiada oczywiste odbicie w dominujących współcześnie trendach publikacyjnych.

Praca Pana mgr. inż. Jacka Pilki powstała na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Urszuli Laudyn oraz Pana profesora Mirosława Karpierza. Tematyka rozprawy doskonale wpisuje się w całokształt prowadzonych od wielu lat w Politechnice Warszawskiej prac badawczych związanych z fizyką ciekłych kryształów. Podjęcie tematu rozprawy należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym.

## Ocena formalna pracy

Rozprawa obejmuje 136 stron i składa się z: 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, spisu symboli i akronimów oraz bibliografii. Praca została napisana w języku angielskim. W strukturze pracy wyodrębniono dwie zasadnicze części. Część pierwszą stanowi opis zagadnień teoretycznych, który obejmuje pierwsze cztery rozdziały. W części drugiej, na którą składają się rozdziały 5, 6 i 7, Autor przedstawia opis oryginalnych wyników eksperymentalnych oraz umieszczone w rozdziale ósmym podsumowanie pracy. Układ rozprawy jest logiczny, przemyślany i klarowny, choć pewne zastrzeżenie można mieć co do proporcji między częścią teoretyczną i badawczą. W empirycznych rozprawach doktorskich część teoretyczna zazwyczaj stanowi mniej więcej 1/3 rozprawy. W przedstawionej pracy części te są w zasadzie równe. Tekst został napisany w miarę starannie i na ile recenzent potrafi to ocenić, poprawną angielszczyzną.

Zamieszczona w pracy bibliografia jest obszerna i aktualna. Zawiera 146 pozycji literaturowych z czego prawie połowa cytowanych prac to artykuły najnowsze, opublikowane w okresie ostatnich 10 lat. W spisie literatury umieszczono dwa odniesienia do artykułów, których pierwszym autorem jest Pan mgr. inż. Jacek Piłka. W rozprawie zacytowana została też praca magisterska Doktoranta.

## Omówienie treści rozprawy

Część teoretyczną otwiera rozdział, w którym Autor przedstawia kontekst badawczy swojej rozprawy, stanowiący wprowadzenie do omawianych zagadnień. Rozdział ten jest bardzo krótki. W sposób zwięzły zarysowano w nim ogólną ideę światła strukturyzowanego, przestrzeń jego zastosowań oraz motywację do podjęcia opisywanych badań. Co istotne, przedstawiono również tezę pracy, którą skonstruowano za pomocą tezy głównej oraz dwóch tez szczegółowych. Posiada ona następujące brzmienie:

*Nematic liquid crystals are suitable media in elements forming optical vortex beams, in particular:*

- 1. Using electro-optical effect for steering polarization, including azimuthal and radial, as well as steering topological charge*
- 2. Using nonlinear reorientational effect*

Mimo, iż zasadnicza część tezy posiada charakter dość ogólny, zastosowane uszczegółowienie jasno identyfikuje problem badawczy oraz wskazuje czego Autor pracy zamierza dowieść.

Rozdział 2 otwiera wstęp merytoryczny do pracy przedstawiając podstawowe pojęcia związane z zagadnieniem strukturyzowanych pól optycznych. Czytelnik jest łagodnie prowadzany od opartego na równaniach Maxwella opisu fal elektromagnetycznych, poprzez pojęcie spinu oraz orbitalnego momentu pędu, w

kierunku strukturyzowanych wiązek optycznych. Wyodrębniono przy tym i omówiono dwa zasadnicze z punktu widzenia rozprawy rodzaje wiązek strukturyzowanych: wiązki wirowe oraz cylindryczne wiązki wektorowe.

Rozdział 3 kontynuuje wprowadzenie teoretyczne skupiając się na zasadniczych pojęciach związanych z ciekłymi kryształami. Autor nie wchodzi w detale chemiczne koncentrując się na pojęciach najistotniejszych, co w ocenie recenzenta, ze względu na dość obszerną część teoretyczną wydaje się posunięciem rozsądnym. Opisane zostały zatem podstawowe właściwości ciekłych kryształów takie jak ich anizotropia, deformacje oraz rotacja polaryzacji w skręconych nematykach. Omówiono także dwa rodzaje nieliniowości optycznej, które występują w ciekłych kryształach: nieliniowość reorientacyjną i termiczną oraz mechanizm generacji solitonów przestrzennych.

Teoretyczną część rozprawy domyka Rozdział 4. Autor przedstawił w nim metody stosowane do generacji wybranych strukturyzowanych wiązek optycznych. Zastosowano przy tym podział na metody oparte na zjawiskach liniowych oraz metody korzystające ze zjawisk nieliniowych, które związane są z generacją wiązek solitonowych, tak zwanych nematykonów. Skonstruowana z omówionych rozdziałów część teoretyczna stanowi dobre wprowadzenie do tematyki doktoratu. W sposób przystępny wprowadza najważniejsze pojęcia z zakresu strukturyzowanych pól optycznych oraz fizyki ciekłych kryształów. W niektórych momentach można odczuwać pewną formę poznawczego niedosytu. Ma to miejsce w szczególności przy czytaniu opisu zjawisk nieliniowych. Wydaje się jednak zrozumiałe, że jest to wynik trudnego zadania właściwej selekcji treści i kontroli ich objętości w procesie przygotowywania rozprawy, która opiera się na więcej niż jednej gałęzi optyki.

Rozdział 5 jest rozdziałem otwierającym eksperymentalną część pracy. Przedstawione w nim wyniki częściowo potwierdzają przyjętą w rozprawie tezę badawczą. Autora wykazuje, że *nematyczne ciekłe kryształy są odpowiednimi ośrodkami do zastosowań w elementach formujących optyczne wiązki wirowe, w szczególności poprzez wykorzystanie zjawiska elektro-optycznego do sterowania polaryzacją, w tym azymutalną i radialną*. Przedstawiona przez Autora koncepcja zarządzania polaryzacją związana jest z budową elektrycznie kontrolowanego, ciekłokrystalicznego konwertera polaryzacji wiązki optycznej. Skonstruowane urządzenie zostało następnie zintegrowane z nanostrukturyzowaną, wirową maską fazową, aby w kolejnej fazie transformacji uzyskać skalarną lub wektorową wiązkę wirową.

W rozdziale 6 Autor rozprawy kontynuuje omawianie wyników eksperymentalnych odnoszących się do generacji wiązek wirowych poprzez wykorzystanie zjawisk liniowych. Przedstawione wyniki uzupełniają rezultaty badań zaprezentowane w poprzednim rozdziale wykazując, że *wykorzystanie zjawiska elektro-optycznego występującego w ciekłych kryształach może służyć do sterowania nie tylko polaryzacją, ale również ładunkiem topologicznym*. Osią tego rozdziału jest przedstawiona w nim koncepcja unowocześnienia typowych płytek „q”.

W rozdziale tym omówione zostały cechy zaproponowanego przez Autora urządzenia oraz przedstawiono rezultaty badania charakteryzujące jego pracę i funkcjonalność.

Rozdział 7 jest ostatnim, w którym prezentowane są wyniki przeprowadzonych badań, w całości będąc poświęconym generacji wiązek wirowych za pomocą efektów nieliniowych. Powołując się na przedstawione w tym rozdziale rezultaty Autor rozprawy wykazuje, że *zjawisko nieliniowości reorientacyjnej może zostać wykorzystane w procesie formowania wirów optycznych*. Głównym i niezmiernie ciekawym, opisanym tutaj zjawiskiem jest efekt, w ramach którego wiązka propagująca się w zaindukowanym przez wirowy nematykon kanale falowodowym, uzyskuje orbitalny moment pędu. W rozdziale tym, Autor przedstawia rezultaty szeregu badań wykonanych w celu zrozumienia i charakteryzacji odkrytego zjawiska.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych przedstawione w kontekście rozważanej w rozprawie tezy. Doktorant przedstawił również implikacje uzyskanych przez siebie wyników, zarówno jeśli chodzi o ich zastosowanie jak i dalsze eksploracje naukowe.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Przedstawioną przez mgr. inż. Jacka Piłkę rozprawę doktorską oceniam wysoko. Praca zawiera wartościowe, oryginalne wyniki zarówno o charakterze aplikacyjnym jak i naukowym. Autor prezentuje nowe rozwiązania w zakresie formowania wirów optycznych poprzez nowatorskie metody manipulacji zarówno polaryzacją jak i ładunkiem topologicznym. Na najwyższą ocenę zasługują moim zdaniem przedstawione w rozprawie, ale jeszcze nie opublikowane rezultaty badań nad wykorzystaniem nieliniowości reorientacyjnej w formowaniu wiązek wirowych. Warto jednak podkreślić, że wszystkie uzyskane w doktoracie wyniki są interesujące i zasługują na docenienie.

Zaprezentowany w rozdziale 5 programowalny, ciekłokrystaliczny konwerter polaryzacji stanowi ciekawą propozycję wśród metod stosowanych w formowaniu pól strukturyzowanych. Przede wszystkim, zwrócić należy uwagę na uniwersalność zaproponowanego rozwiązania. Poprzez odpowiednią kombinację napięć sterujących urządzenie pozwala na konwersję liniowo spolaryzowanej wiązki Gaussowskiej w wiązkę posiadającą jeden z ośmiu dostępnych stanów polaryzacji. Do dyspozycji mamy: dwa ortogonalne stany polaryzacji liniowej, stany polaryzacji kołowej obu skrętności oraz stany polaryzacji azymutalnej, radialnej i wirowej obu skrętności. W aspekt uniwersalności wpisuje się również fakt, że składające się z trzech elementów ciekłokrystalicznych urządzenie jest niewielkie i łatwe w integracji z innymi elementami optycznymi. Ciekawy przykład takiej integracji został zresztą przedstawiony w rozdziale 5 i sam w sobie zasługuje na uwagę. Autor pracy wykorzystał zbudowany przez siebie konwerter w połączeniu z nanostrukturyzowaną, maską fazową uzyskując przez to kompletny, kompaktowy moduł optyczny służący do

formowania wiązek wirowych. Podsumowując można stwierdzić, że zaproponowane urządzenie jest uniwersalne, relatywnie niedrogie a jego obsługa nie wymaga specjalistycznej wiedzy. Stanowi ono dobrą alternatywę dla technik formowania wiązek wirowych korzystających na przykład z przestrzennych modulatorów światła. Odnoszące się do zaproponowanego urządzenia rezultaty badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Materials*. Warto przy tym zaznaczyć, że Autor rozprawy jest pierwszym autorem tej publikacji.

W rozdziale 6 Autor prezentuje urządzenie, które zostało nazwane modulem „Q”. Moduł jest unowocześnioną, posiadającą większą funkcjonalność płytką „q”, która jest elementem wykorzystywanym w formowaniu wiązek wirowych. Skonstruowane przez Autora urządzenie posiada dwie istotne cechy stanowiące o jego zaletach. Po pierwsze, moduł „Q” jest strojony. Poprzez dobór odpowiedniej wartości napięcia może pracować w szerokim zakresie spektralnym obejmującym zakres widzialny i zakres bliskiej podczerwieni. Po drugie, moduły podobnie jak płytki mogą być układane w stos, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie operacji arytmetycznych na wartościach przypisanego im ładunku topologicznego. Dzięki kontroli modułu za pomocą przykładanego do urządzenia napięcia, zaproponowane rozwiązanie daje możliwość przełączania pomiędzy arytmetycznymi operacjami dodawania i odejmowania bez konieczności dokonywania fizycznych zmian w układzie optycznym. Przedstawione rozwiązanie podobnie jak omawiany wcześniej konwerter, cechuje się prostotą, niewielkimi rozmiarami i relatywnie niskimi kosztami. Odnoszące się do zaproponowanego urządzenia rezultaty badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Optics & Laser Technology*. Również w tym przypadku Autor rozprawy jest pierwszym autorem tej publikacji.

Ostatnia omówiona w pracy część wyników eksperymentalnych związana jest z wykorzystaniem nieliniowości optycznej ciekłych kryształów w formowaniu wiązek wirowych. Przedstawiona przez Doktoranta koncepcja jest bardzo interesująca. W ciekłokrystalicznej komórce wytwarzany jest wirowy nematykon. Następnie, do utworzonego przez soliton kanału falowodowego wprowadzana jest wiązka o znacznie mniejszym natężeniu i innej długości fali. Z zaprezentowanych w rozprawie rezultatów wynika, że ładunek topologiczny wiązki propagującej się w tak wytworzonym falowodzie ulega zsumowaniu z wartością ładunku topologicznego nematykonu. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zjawisko to poddano szczegółowej charakteryzacji. Wykazano między innymi, że zachodzi ono dla fal o różnych długościach, oraz że odpowiedzialna za jego występowanie jest nieliniowość reorientacyjna. Dodatkowo wykazano, że możliwe jest także przekazywanie orbitalnego momentu pędu jednocześnie do dwóch wiązek optycznych o różnych długościach fali. Przedstawione zjawisko jest interesujące i w mojej opinii posiada duży potencjał, zarówno w obszarze dalszych eksploracji naukowych jak i w zakresie aplikacyjnym. Z informacji zamieszczonej w rozprawie wynika, że rezultaty tej części badań nie zostały jeszcze opublikowane.

Z doświadczenia recenzenta wynika, że nie da się napisać pracy pozbawionej choćby małych niedociągnięć. Również w recenzowanej rozprawie można znaleźć pewne, drobne niedoskonałości. Niżej, pozwolę sobie wskazać wybrane punkty pracy, które wzbudziły moje wątpliwości.

- (1) W wielu miejscach w rozprawie, zarówno w części teoretycznej jak i w części eksperymentalnej, w tym również w tytułach podrozdziałów, pojawia się fraza „*spherical phase plate*” jako określenie elementu służącego do uzyskiwania helikalnego frontu falowego. W opinii recenzenta mogło dojść tu do pomyłki, gdyż elementem często wykorzystywanym w procesie formowania wirów optycznych jest tak zwana *spiralna* a nie *sferyczna płytka fazowa*.
- (2) W części teoretycznej rozprawy, opisując efekt formowania solitonów przestrzennych Autor wymienia ośrodki, w których zjawisko to zostało zaobserwowane. Poza mediami ciekłokrystalicznymi wymienione zostały także półprzewodniki, polimery i materiały fotorefrakcyjne. Stwierdzono przy tym, że w porównaniu z tymi ośrodkami, ciekłe kryształy wyróżniają się dużo mniejszymi mocami optycznymi, przy których możliwa jest obserwacja zjawisk solitonowych. W mojej opinii akapit ten jest nieprecyzyjny, gdyż media fotorefrakcyjne umożliwiają pułapkowanie wiązek laserowych przy ultraniskich mocach optycznych, schodząc w wybranych przypadkach do poziomu mikrowatów.
- (3) W rozdziale 5 opisującym ciekłokrystaliczny konwerter polaryzacji, na Rys. 5.3 przedstawiono istotny z eksperymentalnego punktu widzenia wykres zależności transmisji w funkcji napięcia przyłożonego do sterowanej elektrycznie płytki falowej. Wykres obejmuje napięcia o wartościach od 0 do 2.5V. Zakres ten powinien zostać rozszerzony, gdyż jak opisano w tym rozdziale, scharakteryzowana wykresem płytka, sterowana jest również napięciami o wartościach wyższych. Ponadto w tekście opisującym wykres, Autor odnosi się do niego jako do wykresu przedstawiającego zależność natężenia światła od napięcia a nie jak wynika z opisu osi, do wykresu opisującego zależność transmisji od napięcia. Analogiczne badanie przedstawiono w rozdziale 6, gdzie również scharakteryzowano płytkę falową. Tym razem jednak, oś pionową wykresu opisano za pomocą mocy optycznej wyskalowanej w jednostkach arbitralnych. Wydaje się, że dobrze byłoby ujednoczyć opis i obie zależności opisać w taki sam sposób.
- (4) W mojej ocenie, przedstawiony w rozdziale 5 opis konwertera polaryzacji, mimo iż interesujący mógłby zostać troszkę poszerzony. Niedosyt można odczuwać szczególnie w kontekście opisu przygotowanej przez zespół prof. Buczyńskiego nanostrukturyzowanej, wirowej maski fazowej. Element ten wydaje się niezwykle ciekawy, został wytworzony nowatorską techniką i praca mogłaby zyskać, gdyby poświęcić więcej miejsca na opis jego parametrów technicznych.

- (5) Jak we wszystkich pracach, które nie przechodzą profesjonalnej korekty tekstu, również w recenzowanej rozprawie znaleźć można małe błędy natury redakcyjnej. Nie mają one istotnego znaczenia w odbiorze pracy, poza tymi miejscami, gdzie mogą subtelnie zmieniać sens zastosowanego zapisu. Przykładem może być opis dwóch ostatnich kolumn w Tabeli 5-1, gdzie stan polaryzacji zamiast słowem „vortical” został przez pomyłkę opisany słowem „vertical”. Odnosząc się do warstwy edytorsko-redakcyjnej pewną uwagę należy poświęcić również umieszczonym w rozprawie ilustracjom. W subiektywnej ocenie recenzenta stanowią one mocny punkt edytorskiej warstwy pracy. Od reguły tej jednak można znaleźć wyjątki, a należą do nich rysunki przedstawiające rozkłady polaryzacji światła, które zyskałyby na czytelności, gdyby były odrobinę większe.

### **Podsumowanie**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera wyniki rzetelnie przeprowadzonych, wartościowych, związanych z dużym nakładem pracy badań eksperymentalnych. Podjęta tematyka jest aktualna, a uzyskane rezultaty posiadają duży potencjał praktyczny i wysoki poziom naukowy. Doktorant wykazał, że dysponuje szeroką wiedzą ogólną poruszając się płynnie w obszarze więcej niż jednej gałęzi optyki, umiejętnie planując i realizując relatywnie wymagające zadania eksperymentalne. Część uzyskanych podczas pracy nad dysertacją rezultatów została opublikowana w renomowanych czasopismach naukowych. Z zamieszczonego w pracy wykazu wynika, że Doktorant jest współautorem trzech publikacji naukowych zamieszczonych w czasopismach z listy JCR o wysokim wskaźniku IF. Dwie z tych publikacji zawierają wyniki bezpośrednio związane z ocenianą rozprawą, przy czym w obu przypadkach mgr. inż. Jacek Piłka jest ich głównym autorem. Mimo, iż formalnie praca nie spełnia wszystkich narzuconych przez Radę Dyscypliny warunków wyróżniania prac doktorskich, można stwierdzić, że zaprezentowane w niej wyniki zasługują na wyróżnienie o charakterze nieformalnym. Tym bardziej, że opublikowanie ostatniej części uzyskanych przez Doktoranta rezultatów jest prawdopodobnie kwestią czasu.

**Reasumując z przekonaniem rekomenduję dopuszczenie Pana magistra inżyniera Jacka Piłkę do dalszych czynności w prowadzonym przewodzie doktorskim, w tym do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski