

Prof. dr hab. inż. Janusz PARKA  
Instytut Fizyki Technicznej  
Wydział Nowych Technologii i Chemii  
Wojskowa Akademia Techniczna  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
e-mail: [janusz.parka@wat.edu.pl](mailto:janusz.parka@wat.edu.pl)

Warszawa, 20.04 2024 r.

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Pilki**

**pt. „Formation of Vortex Beams in Nematic Liquid Crystals”**

**(Tworzenie wiązek wirowych w nematycznych ciekłych kryształach)**

### **1. Wprowadzenie i przedmiot recenzji**

Recenzja niniejszej rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy doktorskiej mgr. inż. Jacka Pilki jest prof. dr hab. inż. Mirosław Karpierz. Praca dotyczy badania wirów optycznych w nematycznych ciekłych kryształach.

Pod koniec lat 90-tych zaczęto mówić o nowej gałęzi współczesnej optyki, której nadano nazwę „singular optics” lub „optyka nieciągłości”, chociaż początki badań sięgają lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku. Wprowadzone zostało pojęcie światła strukturalnego (strukturyzowanego). Światło strukturalne to bardzo szybko rozwijający się kierunek badań i możliwe perspektywiczne oraz spektakularne zastosowania.

Ważnym zagadnieniem w tej optyce są wiry optyczne. Wir optyczny to rodzaj wiązki posiadającej spiralny front fazowy oraz rozkład natężenia w postaci „obwarzanka” z zerową energią w środku ze względu na zlokalizowane w tym miejscu osobliwości fazy. Wir fazowy ze spiralnym frontem fazowym przenosi orbitalny moment pędu związany z jego ładunkiem topologicznym. Skręcony front falowy występujący w najbliższym otoczeniu wiru optycznego ma z reguły kształt regularnej helisy, choć nie zawsze. Kierunek obrotu helikalnego (prawo- lub lewoskrętny) frontu falowego determinuje znak ładunku topologicznego. Helikoidalny kształt frontu falowego jest odpowiedzialny za niezerowy moment pędu fali świetlnej, który z kolei sprawia, że wiry są stabilną strukturą w ramach frontu falowego. W skład całkowitego momentu pędu fali świetlnej wchodzi również moment pędu związany z jej stanem polaryzacji.

Wiry optyczne z orbitalnymi momentami kątowymi są obiecujące w różnych optycznych zastosowaniach. Niezwykłe właściwości wirów optycznych sprawiają, że wiązka posiada unikalne cechy predysponujące ją do optycznego pułapkowania i obracania cząstek ze względu na rotację fazy. Skupione wiry optyczne mogą być generowane przez skręcone płytki strefowe i dlatego mogą być stosowane np. w obrazowaniach kontrastowo fazowych. Wspomniane powyżej wiry optyczne mają jednak niską wydajność dyfrakcyjną, ponieważ wykorzystują głównie modulację amplitudy.

Z wirami optycznymi związane są ogromne nadzieje, bo oferują one np. możliwość przewyższania ograniczenia przepustowości światłowodów. Mogą one być użyteczne do budowy tzw. pęset optycznych, czyli specjalnie przygotowanych wiązek laserowych służących do manipulowania obiektami w skali mikroskopowej, m.in. atomami, nanocząstkami, a nawet

komórkami. Umożliwia to np. optyczne kodowanie informacji w postaci modów, co pozwala na zwiększenie przepustowości łączy komunikacyjnych, budowę sztucznych sieci neuronowych itp.

W praktycznych zastosowaniach wyzwaniem jest wygenerowanie wirów prostymi i stabilnymi metodami. Zwykle do tego celu stosuje się złożone układy optyczne, które obejmują min. rezonatory, płytki fazowe lub programowalne przestrzenne modulatory światła, a także syntetyczne (generowane cyfrowo) siatki holograficzne.

Ważność i aktualność zagadnienia badawczego podjętego przez Doktoranta jest widoczna w postaci licznych publikacji oraz referatów i posterów, z jakimi spotykam się między innymi na wielu międzynarodowych konferencjach dotyczących ciekłych kryształów.

Tematykę badań Doktoranta uważam za niezwykle nowatorską i perspektywiczną. Interesującym zagadnieniem jest połączenie właściwości wiązek strukturyzowanych z nieliniowością optyczną ciekłych kryształów i badanie wpływu tego typu nieliniowości na propagację wiązek strukturyzowanych w różnych warunkach. Właściwości nieliniowe nematycznych ciekłych kryształów są w tym aspekcie bardzo interesujące ze względu na ich dużą transmisję widmową, nielocalne właściwości, a także anizotropię dwójłomności oraz możliwość łatwej modyfikacji struktury np. przy zastosowaniu pola elektrycznego.

## **2. Zakres pracy i ocena merytoryczna**

Praca doktorska mgr inż. Jacka Piłki dotyczy badań wirów optycznych w różnych przetwornikach zawierających nematyczne ciekłe kryształy, które wykorzystują zarówno zjawiska liniowe jak i nieliniowe. W stosunku do dotychczas stosowanych rozwiązań wykorzystujących przetworniki ciekłokrystaliczne z liniowymi efektami elektrooptycznymi zaproponowane zostały pewne modyfikacje polegające na wykorzystaniu „płytek falowych” (przetworników), które umożliwiły tworzenie wiązek wirowych i wektorowych. Zaproponowane zostały także metody konwersji polaryzacji wykorzystujące tego typu przetworniki ciekłokrystaliczne. Jedną z metod wykorzystuje tzw. moduły Q składające się z kilku przetworników ciekłokrystalicznych sterowanych polem elektrycznym.

Teza pracy została sformułowana przez Doktoranta jasno oraz bezpiecznie i jednocześnie dość ogólnie, ponieważ przeglądając różne artykuły dotyczące zagadnień omawianych w pracy można przypuszczać, że podobną tezę można by przyporządkować do wielu podobnych tematów. Jednocześnie jako recenzent uważam, że ciekły kryształ jako anizotropowe medium o dużych wartościach anizotropii optycznej i łatwej reorientacji jest najciekawszym materiałem w którym można wytwarzać i badać wiry optyczne.

W tej rozprawie zaproponowano innowacyjne podejście do tworzenia wiązek wirowych i wektorowych z wykorzystaniem unikalnych właściwości nematycznych ciekłych kryształów. W badaniach tych systematycznie wykorzystano zarówno efekty elektrooptyczne liniowe, jak i nieliniowe wykorzystując reorientację ośrodka ciekłokrystalicznego do transformacji stanu polaryzacji i/lub ładunku topologicznego wiązki. Mechanizmy te, leżące u podstaw generowania światła strukturyzowanego, zostały szczegółowo przeanalizowane i zastosowane w celu wykazania dużych możliwości nematycznych ciekłych kryształów w kształtowaniu oraz modulacji wiązki optycznej. W badaniach opisanych w niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie ciekłokrystalicznej spiralnej płytki (warstwy) strefowej, której zasada działania

polega na modulacji fazy i demonstruje generowanie skupionego wiru optycznego o dużej wydajności oraz przestrajaniu za pomocą pola elektrycznego. Elementy umieszczone w układzie optycznym można łatwo łączyć ze standardowymi światłowodami, tworząc kompaktową mikrosondę do przekształcania wiązek o przekroju Gaussa w wiązki wirowe.

Ciekłokrystaliczny konwerter polaryzacji zawiera trzy różne elementy ciekłokrystaliczne, które transformują wejściową polaryzację liniową do kilku różnych stanów, między którymi „można się przełączać”. Taki konwerter może być łatwo zintegrowany z układem optycznym, co zostało pokazane przez dołączenie nonostrukturyzowanej sferycznej „płytki fazowej” transformującej wiązkę gaussowskie w wir optyczny. Małe rozmiary i koszt sprawia, że konwerter polaryzacji zapewnia łatwą zmianę pomiędzy pasywnymi i aktywnymi elementami przekształcającymi polaryzację.

Druga metoda generacji wirów optycznych oparta została na modułach Q, tzn. przetwornikach łączących sterowane elektrycznie płytki q i półfalowe. Przetworniki mogą być łączone ze sobą tak, aby wykonywać np. operacje arytmetyczne przy wykorzystaniu ich parametrów zmienianych za pomocą pola elektrycznego. Modularny charakter takiego zestawu powoduje, że może to być tania alternatywa w stosunku do innych rozpowszechnionych metod generacji wiązek wirowych i wektorowych w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni.

Układ rozprawy jest klasyczny. Rozprawa liczy 136 stron, zawiera 72 często wielopanelowych rysunków, wykresów i fotografii, 10 tabel i cytowanych jest 109 pozycji bibliograficznych. Praca została podzielona na dwie części. Pierwsza zawiera wprowadzenie teoretyczne do omawianych zagadnień natomiast druga zawiera opis uzyskanych rezultatów. Rozprawa napisana jest poprawnym technicznym językiem angielskim i podzielona jest na 8 rozdziałów. Ponadto zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykaz symboli i oznaczeń używanych w pracy.

Praca rozpoczyna się wstępem (rozd. 1), w którym Doktorant przekonuje o ważności podjętego zadania, definiując podstawowe pojęcia używane w pracy oraz prezentuje tezę pracy.

W rozdz. 2 omówiono podstawowe pojęcia światła strukturalnego, zaczynając od równań Maxwella i kończąc na skomplikowanych właściwościach fal elektromagnetycznych, intensywności, fazy i polaryzacji. Ta dyskusja zapewnia głębsze zrozumienie, w jaki sposób zmiany parametrów materiałowych i generacyjnych ułatwiają tworzenie światła strukturalnego, ze szczególnym uwzględnieniem wiązek wirowych i wektorowych.

W rozdz. 3 i 4 omówiona została kluczowa rola efektów liniowych i nieliniowych (reorientacyjnych i termicznych) w nematycznych ciekłych kryształach dla powstawania przestrzennych solitonów. Doktorant przedstawił również przegląd metod generacji światła strukturalnego w nematykach i tworzenia worteksów.

W rozdz. 5, 6 i 7 Doktorant zaproponował, zrealizował eksperymentalnie i opisał nowatorskie metody manipulacji polaryzacją oraz ładunkiem topologicznym w materiale ciekłokrystalicznym. W rozdziałach tych, zdaniem recenzenta, opisane zostały główne osiągnięcia mgr. inż. Jacka Piłki. W rozdz. 5 przedstawiono innowacyjny konwerter polaryzacji umożliwiający transformację polaryzacji na różne stany, które są przełączane polem elektrycznym. W rozdz. 6 omówiona została metoda formowania wiązek wirowych przy pomocy modułów Q, które mogą wykonywać optycznie operacje arytmetyczne.

W rozdz. 7 wykazano, że możliwe jest wzmocnienie orbitalnego momentu pędu poprzez wiązki tworzące indukowany soliton. Zgodnie z opisem przedstawionym przez Doktoranta zjawisko to nie było dotychczas obserwowane i opisane w literaturze naukowej.

Rozdział ósmy zawiera podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wnioski. Zdaniem recenzenta w podsumowaniu Doktorant opisał wiele szczegółowych zależności dotyczących konwersji polaryzacji oraz tworzenia wirów optycznych jakie zaobserwował w badanych przetwornikach ciekłokrystalicznych (układach optycznych je zawierających).

Literatura dotycząca tematu jest obszerna i liczy 146 pozycji. Dobrana została poprawnie do tematyki pracy, a cytowania najważniejszych prac są właściwe. Przedstawiona w sposób rzetelny analiza zagadnień podejmowanych w pracy w oparciu o dane literaturowe świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematu i przygotowaniu doktoranta do prowadzenia pracy naukowej oraz realizacji zamierzonych badań. Badane zjawiska są dobrze opisane od strony teoretycznej, co świadczy, że mgr inż. Piłka rozumie podstawy teoretyczne i fizykę badanych zjawisk.

Jeszcze raz należy podkreślić, że praca zawiera starannie opisaną podbudowę teoretyczną dotyczącą tematu oraz dane eksperymentalne.

Uważam, że metody badawcze przyjęte przez Doktoranta są poprawne. Jakość uzyskanych wyników uzyskanych w pracy jest wartościowa a wyciągnięte na ich podstawie wnioski są właściwe. Część wyników została zweryfikowana poprzez umieszczenie ich w publikacjach w czasopiśmie o relatywnie dużym współczynniku wpływu. Uwag krytycznych w tym zakresie nie mam.

### **3. Uwagi ogólne i dyskusyjne**

Praca napisana jest w poprawnym, technicznym języku angielskim, a jej redakcja składna i przejrzysta. W tym zakresie większych uwag nie wnoszę, chociaż występują drobne błędy redakcyjne np.

- uwaga ogólna dotyczy parametrów oporności (przewodności) nematycznych materiałów ciekłokrystalicznych wykorzystywanych przez Doktoranta w badaniach (6CHBT, i mieszanina 903). Ilość jonów, która jest różna w zależności od oporności ciekłego kryształu zastosowanego w eksperymencie może mieć wpływ na uporządkowanie molekuł ciekłego kryształu, wartość pól elektrycznych przy których następuje zmiana orientacji warstwy ciekłego kryształu oraz na zaburzenie tworzących się solitonów i wirów optycznych. Pewnym usprawiedliwieniem dla takiego stanu rzeczy może być fakt, że nawet w najlepszych publikacjach dotyczących podobnej tematyki bardzo rzadko podawane są takie parametry. Pomiary oporności są nie łatwe i wymagają relatywnie dużej ilości materiału ciekłokrystalicznego.

- na str. 7 ...ciekłokrystaliczny konwerter polaryzacji można przełączać prądowo, chyba napięciowo, czyli poprzez zmianę wartości pola elektrycznego,

- do niektórych sformułowań w języku angielskim jak np. str.11 „Vector magnetic field” a nie „vector of magnetic field” lub „magnetic field vector” i kilku innych można by mieć wątpliwości, ale nie będąc „native spikerem” nie formułuję tych zastrzeżeń szczególnie ostro,

- na początku pracy zamieszczony został spis akronimów i symboli. Symboli używanych w pracy jest bardzo dużo. Trochę dziwnym wydaje się przyjęcie w całej pracy

oznaczanie wielkości wektorowych literami pogrubionymi z wektorem. W większości wydawnictw przyjęto, że litera pogrubiona oznacza wektor. Prowadzi to do niejednoznaczności, gdyż np. we wzorze 7.1 i 7.2 wielkościami wektorowymi są zarówno litery pogrubione jak i nie pogrubione. Prowadzi to do zdaniem recenzenta do niezbyt czytelnego zapisu tych formuł. W spisie symboli nie zostały ujęte niektóre oznaczenia występujące w pracy, np.  $\phi$  jako symbol kąta używanego w wielu formułach 4.7 - 4.10 i podobnych. Brak symbolu  $K_{ij}$  używanego do określenia stałych sprężystych nematyka (str. 51), itp.,

- na str. 44 zapisano, że .... while  $n_0$  either increase or decrease..., co nie wydaje się być zasadne w przypadku każdego materiału ciekłokrystalicznego,

- str. 66, nieprawidłowe oznaczenie w podpisie pod rys. 4-11,

- na str. 74 Doktorant podał, że przedstawione na rys. 5. 1 przetworniki spełniały warunki Maugin'a bez wyjaśnienia, w jaki sposób sprawdzane było spełnienie tych warunków i czy inne wykorzystywane w badaniach przetworniki również spełniały te warunki. Mam nadzieję, że Doktorant odniesie się do tej i innych uwag w trakcie obrony.

#### 4. Podsumowanie

Dorobek publikacyjny Doktoranta związany z tematem pracy doktorskiej jest w mojej ocenie skromny, aczkolwiek wystarczający. Składają się na niego 3 współautorskie prace dotyczące bezpośrednio tematyki rozprawy opublikowane w czasopismach z listy JCR oraz jedna praca z tematyki solitonów, która pośrednio dotyczy tematyki pracy doktorskiej. W dwóch pierwszych pracach Doktorant jest pierwszym autorem. Mgr inż. Piłka prezentował wyniki swoich prac również na 3 konferencjach międzynarodowych i jednej krajowej. Informacji o projektach badawczych w których Doktorant brał udział brak. Uwagi krytyczne recenzenta są nieliczne i dotyczą głównie zagadnień redakcyjnych pracy. Ocena końcowa pracy jest pozytywna.

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Piłki zawiera duży ładunek udokumentowanych nowości naukowych z zakresu nieliniowych właściwości nematycznych ciekłych kryształów i generacji w tych ośrodkach wirów optycznych. Doktorant twierdzi, że wykorzystanie efektów nieliniowych do generacji i określenia orbitalnego momentu pędu w wiązce propagującej się w indukowanym przez reorientacyjny nematikon wirowy było zaobserwowane po raz pierwszy. Nie znając całości tematyki, w tym również w ujęciu historycznym dotyczącym badań w tej dziedzinie, recenzent nie jest w stanie jednoznacznie odnieść się do tego stwierdzenia. Badania podjęte przez Doktoranta mają znaczenie poznawcze oraz niewykluczone, że być może również w przyszłości o znaczenie aplikacyjne. Należy raz jeszcze podkreślić, że Doktorant podjął się badań bardzo interesujących zagadnień analizując je zarówno od strony opisu teoretycznego oraz pokazując doświadczalne rezultaty przeprowadzonych badań. Niniejsza rozprawa doktorska pogłębia wiedzę nt. propagacji i manipulacji światła strukturalnego w nematycznych ciekłych kryształach oraz jego zachowania się w falowodach wypełnionych ciekłymi kryształami. Są to, w opinii recenzenta, bardzo ważne zagadnienia dla dalszego rozwoju fotonicznych zastosowań ciekłych kryształów, komunikacji optycznej i ogólnie w optycznego przetwarzania informacji.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Pilki spełnia warunki przewidziane stosowną ustawą o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę o przyjęcie pracy i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Janusz Parka

