



Katedra Inżynierii i Modelowania Materiałów Zaawansowanych  
Wydział Chemiczny  
Politechnika Wroclawska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Prof. dr hab. inż. Andrzej Miniewicz

Tel: +48(71) 320-35-00,

*andrzej.miniewicz@pwr.edu.pl*

Wrocław, dn. 3.08.2021 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej

pt. **Zjawisko samoorganizacji nematycznych ciekłych kryształów  
domieszkowanych nanocząstkami złota w strukturach  
jednowymiarowych**

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej zatytułowana „Zjawisko samoorganizacji nematycznych ciekłych kryształów domieszkowanych nanocząstkami złota w strukturach jednowymiarowych” wykonana została na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej i opublikowana w pierwszej połowie 2021 roku w Warszawie. Promotorem rozprawy był Pan dr hab. inż. Piotr Lesiak, profesor uczelni. Rozprawa powstała w Zakładzie Optyki i Fotoniki kierowanym przez Profesora dr hab. inż. Tomasza Wolińskiego, który od ponad 15 lat specjalizuje się w badaniach optycznych światłowodów strukturyzowanych i fonicznych wypełnianych ciekłymi kryształami oraz badaniami elektrooptycznych właściwości ciekłych kryształów i ma na tym polu ogromne osiągnięcia naukowe.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej jest wynikiem badań doświadczalnych nematycznych ciekłych kryształów domieszkowanych nanocząstkami złota w bardzo szczególnych układach jednowymiarowych: kapilarach i światłowodach fonicznych. Pani Karolina Bednarska wykonywała swoją pracę we współpracy z Wydziałem Chemii Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie syntezy nanocząstek złota z ligandami mezogenicznymi, z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w zakresie syntezy nanocząstek Au z pokryciem dodekanotiolem oraz z Uniwersytetem Marii Skłodowskiej Curie w Lublinie w zakresie wytwarzania krzemionkowych kapilar. Tezą pracy doktorskiej, jaką chciała udowodnić doktorantka było wykazanie, że cyt. „*Możliwe jest uzyskanie samoorganizującej się struktury periodycznej mającej charakter jednowymiarowego kryształu*

*fotonicznego w mieszaninach nanocząstek złota i nematycznego ciekłego kryształu*". Tak postawiona teza wraz z dokładniejszym opisem zakresu badań przedstawiona w rozprawie na stronie 10 jest nowatorska i oryginalna. Ciekłokrystaliczne jednowymiarowe struktury fotoniczne są znane i badane od lat w tzw. nematykach chiralnych ale nie były znane dla klasy zwykłych nematyków. Doktorantka postanowiła modyfikować standardowe nematyczne ciekłe kryształy (5CB i 6CHBT) poprzez użycie specjalnej domieszki jaką stanowią nanocząstki złota (AuNP). Nanocząstki złota pokryte ligandami organicznymi pozwalają na efektywne mieszanie się z nematykami dzięki podobieństwu chemicznemu grup terminalnych ciekłych kryształów i ligandów mezogenicznych, alifatycznych a także hybrydowych: alifatyczno-mezogenicznych. Doktorantka badała właściwości optyczne ciekłych kryształów (widma UV-Vis i dwójłomność) przed i po domieszkowaniu nanocząstkami złota. Wykonywała badania termooptyczne w kapilarach i dla światłowodów fotonicznych szklanych z kanalikami powietrznymi wypełnianymi fazami ciekłokrystalicznymi domieszkowanymi nanocząstkami złota z różnymi pokryciami oraz pomiary transmisji światłowodów w funkcji temperatury w pobliżu przemiany fazowej nematyk-ciecz izotropowa.

Rozprawa liczy 99 stron, zawiera 65 rysunków typu: wykres zależności fizycznej, schemat eksperymentu czy zjawiska, zdjęcie tekstury czy przemiany fazowej bądź separacji faz. W rozprawie jest 7 tabel a spis literatury liczy i 106 pozycji. Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów, wprowadzenie zajmuje ok. 30 stron, dalej omawiane są różne aspekty eksperymentalne i badania fizykochemiczne włączając omówienie wpływu nanocząstek na uporządkowanie fazy nematycznej i na zmianę jej współczynników załamania oraz temperatury przemian fazowych w funkcji domieszki. Dalej znajdziemy pomiary właściwości transmisyjnych światłowodów dla różnych wypełnień i mikroskopowe pomiary termooptyczne ciekawego zjawiska separacji faz. Rozprawa kończy się podsumowaniem osiągnięć w rozdziale 7 i omówieniem perspektywy dalszych badań.

Charakter rozprawy jest typowo doświadczalny. Opis metod pomiarowych dostarcza większości niezbędnych informacji o wykorzystanej do pomiarów aparaturze i budowie kluczowych dla doktoratu stanowisk pomiarowych, jednakże zawiera też sporo błędów i nieścisłości. O ile szata graficzna jest przyjemna w odbiorze to język rozprawy w wielu miejscach jest niedopracowany i zawiera wiele błędów stylistycznych, gramatycznych i rozmaitego rodzaju niezręczności ale także i błędów formalnych. Kolorowe zdjęcia i wykresy ułatwiają analizę omawianych wyników ale nie wszystkie z nich są klarowne i dobrze opisane co utrudnia zrozumienie pokazywanych na nich zjawisk.

Dorobek publikacyjny Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej obejmuje w sumie 5 wieloautorskich publikacji naukowych umieszczonych na liście Journal Citation Reports (w dwóch z nich doktorantka jest pierwszym autorem). Doktorantka, przedstawia tylko dwie publikacje jako ściśle związane z rozprawą doktorską: publikację w *Optical Materials* z roku 2019 (IF = 3.08) i publikację w *ACS Nano* z roku 2019 (o bardzo wysokim współczynniku oddziaływania IF = 14.588 ). Pozostałe trzy publikacje ukazały się w branżowych czasopismach: *Materials* (2020) i *Sensors* (2019 i 2020). Ponadto, Pani mgr inż. Karolina Bednarska była współautorką 6 publikacji spoza listy JCR w tym 5 doniesień konferencyjnych. Dorobek publikacyjny doktorantki wskazuje na jej wysoką aktywność naukową, choć ze względu na dużą liczbę współautorów każdej z dwóch publikacji wchodzących w skład rozprawy (7 dla *Opt. Mater.* i 12 dla *ACS Nano*) oraz innych publikacji (>7) należy dokładnie omówić wkład doktorantki przynajmniej w powstanie tych dwóch wiodących publikacji, czego oczekuję na obronie. Publikacje naukowe, w których Pani Bednarska brała udział, doczekały się wg. bazy SCOPUS 22 cytowań a tylko publikacja z *ACS Nano* ma ich już 9, co świadczy o jej dobrym odbiorze przez środowisko naukowe.



Do najważniejszych osiągnięć ocenianej rozprawy doktorskiej zaliczam:

1. Obserwację separacji faz bogatej i ubogiej w nanocząstki złota obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym w pobliżu temperatury przejścia fazowego N-I.
2. Obserwację tego samego efektu w strukturach jednowymiarowych (kapilarach) wypełnionych mieszaniną nematyka i nanocząstek złota.
3. Obserwację powstawania struktur periodycznych w kapilarach i powiązanie periodu ze średnicą kapilary.

Wymienione wyżej osiągnięcia potwierdzają słuszność postawionej na początku rozprawy tezy badawczej.

Uważna i krytyczna lektura treści rozprawy przez recenzenta jest potrzebna nie tylko do oceny samego dzieła ale również w celu wyrobienia sobie opinii o poziomie naukowym doktorantki i jej dokonaniach w zakresie fizyki ciekłych kryształów i światłowodów fotonicznych. Podczas lektury rozprawy zwracałem uwagę na uchybienia merytoryczne i techniczne przedstawianego do oceny dzieła głównie po to by następne publikacje Pani Bednarskiej były jeszcze lepsze. Poniżej przedstawiam, listę wybranych szczegółowych uwag krytycznych do części teoretycznej rozprawy a później do części eksperymentalnej. Tych uwag mam znacznie więcej ale przytoczenie ich wszystkich zabrałoby zbyt dużo miejsca.

1. Rozdział 2 zatytułowany Ciekłe kryształy jest rodzajem wprowadzenia czytelnika w zagadnienia opisu miękkiej materii wykazującej cechy ciekłokrystaliczne. W tym rozdziale pojawiło się jednak wiele nieścisłości.
2. Na stronie 12 pojawia się zdanie, cyt. „Molekuły tworzące ciekły kryształ muszą być cząstkami anizotropowymi, tzn. jeden z ich wymiarów musi być o wiele większy niż reszta” tak jest dla kalamityków (cząsteczek prętopodobnych), ale już nie dla dyskotypków, cząsteczek o kształcie dysku, w ich przypadku, grubość cząsteczki jest mniejsza od jej średnicy.
3. Trudno mi też zgodzić się ze zdaniem na str. 13, cyt. „Podstawową regułą ciekłych kryształów jest uporządkowanie wzdłuż jednego kierunku (direktora) ....” To zdanie może być prawdziwe dla kalamityków i fazy nematycznej ale na pewno ta reguła nie pasuje do cholesteryków, w których dyrektor rotuje w sposób ciągły albo dla np. smektyka  $SmC_{alt}$ , w którym dyrektor skokowo zmienia swój kierunek w każdej sąsiedniej warstwie.
4. Definiując główne grupy ciekłych kryształów na str. 13 Autorka rozprawy popełniła sporo błędów. Wymieniając nematyki i smektyki jako trzecią grupę podała fazę kolumnową (ta dotyczy dyskotypków) a dwie pierwsze kalamityków. Wśród dyskotypków jest wiele faz, m. innymi nematyczna, i kilka odmian faz kolumnowych. Definicja smektyków zdaniem, cyt. że „Jest to jednowymiarowe uporządkowanie w trzech wymiarach” jest nieporozumieniem. Albo stwierdzenie, że w fazie smektycznej A, cyt. „molekuły w warstwie są prostopadłe do direktora” jest nieprawdziwe bo molekuły w warstwie są statystycznie równoległe do direktora. Inne kuriozalne stwierdzenie, to że cyt. „środkie ciężkości molekuł nematyka ...orientują się równoległe do direktora”, tak zachowują się długie osie molekuł prętopodobnych, ale nie środki ciężkości, które są punktami. Przytoczone przykłady były dla mnie sygnałem o poważnych brakach doktorantki w opanowaniu problematyki ciekłych kryształów na poziomie podstawowym.

5. Na stronie 15 Autorka rozprawy napisała, że, cyt. „... między sąsiednimi molekułami .... zachodzą dalekozasięgowe reakcje typu dipol-dipol...”. Mam nadzieję, że chodziło o oddziaływania a nie reakcje np. chemiczne.
6. Przytaczając na stronie 17 (równinie 6) teorię Landaua-de Gennes, w energii swobodnej brakuje dwóch istotnych elementów w szczególności bardzo istotnych dla rozważanych w rozprawie zagadnień, mianowicie członu dotyczącego roli gradientów parametru uporządkowania S oraz zależności parametru uporządkowania od odległości od powierzchni.
7. Na str. 18 na rys. 4 widzimy zdjęcie struktury nematyka w obrazie POM a podpis jest następujący: „Rozpraszanie światła na skutek fluktuacji termicznych w ciekłym kryształ w pobliżu temperatury klarowania.” Proszę o wyjaśnienie co naprawdę widać na tym rysunku i jakie rozpraszanie światła widzimy? Typowo w nematykach takie fluktuacje cząsteczek są opisane czasem  $t$  rzędu 0.1 ms i wymagają szybkich kamer by je zarejestrować.
8. Na rys. 5 opisy osi są po angielsku.
9. Rys. 6 a i 6 b, nie tłumaczy dlaczego molekuly obracają się różnie w polu elektrycznym. Co jest przyczyną dodatniej a co ujemnej anizotropii dielektrycznej na poziomie molekularnym? Anizotropia dielektryczna jest cechą makroskopową a nie mikroskopową.
10. Na Rys. 7 b, wkradł się błąd, pokazana jest tekstura homeotropowa a podpisana jako planarna, i w konsekwencji na Rys. 7 c, widok różni się od podpisu.
11. Opisując metody tworzenia warstw orientujących (str. 21) Autorka wyróżnia metody mechaniczne oraz chemiczne, pomijając bardzo ważną metodę fotoorientacji – stosowaną w zastosowaniach fonicznych. Stwierdzenie, że cyt. „mikrorowki, które orientują ciekły kryształ planarnie” jest mitem, są przykłady że molekuly w poczesanych warstwach polimerowych układają się prostopadle do kierunku mikrorowków.
12. Równanie (8) na stronie 22, bardziej mi pasuje do opisu polaryzacji a nie wyindukowanego momentu dipolowego. Polaryzacja dipolowa opisuje obrót molekuly obdarzonej trwałym momentem dipolowym na kierunek pola elektrycznego
13. Opisując próg Freedericksza (nie Frederiksa) na str. 23, nieprawdziwe jest stwierdzenie, że jego wartość zależy od energii kotwiczenia. Ta wartość zależy głównie od stałych sprężystości i wartości anizotropii dielektrycznej.
14. Bardzo skrótowy i pobieżny jest opis światłowódów fonicznych (PCF) i ich podstawowych cech. Mam pytanie do Doktorantki, dlaczego światłowód przedstawiony na Rys. 9 b można nazwać światłowodem fonicznym, brakuje mi struktury periodycznej charakterystycznej dla PCF?
15. W rozdziale 3 zatytułowanym Domieszkowanie ciekłych kryształów, również wkradło się kilka nieścisłości. Na Rys. 13 widnieje podpis zdjęcia sferycznych nanocząstek złota o różnych średnicach. Bez podania, że jest to zdjęcie wykonane mikroskopem elektronowym. Nie podano też warunków wykonania zdjęcia i skali powiększenia. Opisując kategorie metod wytwarzania nanocząstek, wkradł się błąd w postaci „Synteza odgórna (ang. top-down synthesis)” Czy proces mielenia lub trawienia można w ogóle nazwać syntezą? A pisząc o metodach bottom-up, Autorka rozprawy zalicza do nich na pierwszym miejscu metodę sedymentacji, moim zdaniem jest to metoda rozdziału już wytworzonych nanocząstek.
16. Opisując rezonans plazmonów powierzchniowych na str. 30 znalazło się zdanie, cyt. „ Tak oscylująca nanocząstka może stać się „nanoogrzewaczem”, który lokalnie zwiększa temperaturę otoczenia”. Nanocząstka nie oscyluje (podlega ona ruchom Browna) oscylują



elektrony i na skutek oporu generują ciepło w metalu. Moim zdaniem w tym rozdziale zabrakło co najmniej dwóch istotnych wzorów opisujących od czego zależy rezonans plazmonowy a dokładniej jego część rzeczywista i urojona dla nanocząstek metalicznych i jak wpływają ligandy na ten rezonans. Wiadomym jest, że rezonans plazmonowy dla nanocząstki metalicznej zależy głównie od funkcji dielektrycznej metalu i funkcji dielektrycznej ośrodka.

Teraz chciałbym skomentować uzyskane w doktoracie istotne wyniki doświadczalne i ich interpretację.

1. W rozdziale 4 pod tytułem „Charakteryzacja użytych mieszanin nanocząstek złota i ciekłych kryształów” Pani Bednarska podając nazwy związków chemicznych użytych w badaniach podaje ich nazwy w języku angielskim, myślę, że powinno się te nazwy w rozprawie pisanej po polsku, również napisać w języku polskim. To samo dotyczy nazwy chemicznej ligandu mezogenicznego. Na Rysunku 20 pokazane są dwa zdjęcia komórek ciekłokrystalicznych zawierających 5CB i 6CHBT z nanocząstkami AuNP@L1 – o czym te zdjęcia informują? Obie komórki mają czarny kolor (powinny mieć czerwony), nie podano ich rozmiarów ani sposobu wykonania zdjęcia, czy użyto skrzyżowanych polaryzatorów? W pracy nie znalazłem informacji o sposobie syntezy tych nanocząstek, ilości ligandów, dyspersji rozmiarów, zdjęć TEM, itp. Informacje tego typu są niezbędne do analizy obserwowanych zjawisk. Nie podano w jaki sposób tworzono mieszaniny, jak przenoszono nanocząstki po ich syntezie do ciekłego kryształu, jak długo trwała procedura mieszania, itd. Podanie tylko referencji [65] i [75] to trochę za mało jak na doktorat w którym te mieszaniny są głównym badanym materiałem.
2. Przy opisie eksperymentów fizycznych istotne jest podanie parametrów przyrządów i ich roli w eksperymencie. Na stronie 42, ku mojemu zdziwieniu przeczytałem, że cyt. „widmo wyjściowe zbierane było przez polaryzator” (!), choć na rysunku 23 widnieje spektrometr. Widma ekstynkcji badanych komórek ciekłokrystalicznych zawierających AuNP@L1 w 5CB o różnych stężeniach przedstawione na Rys. 24 są widmami znormalizowanymi (moje pytanie – względem czego je normalizowano i po co?). Na wykresach 24 i 25 brakuje podziałek ale co ważniejsze komentarza dlaczego położenie maksimum absorpcji przesuwają się w stronę fal krótszych wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek? Nawet dla długości fali 750 nm widma wykazują znaczną absorbancję, skąd się ona bierze? Dlaczego nie wykonano w komórce homogenicznej pomiarów absorbancji w dwóch ortogonalnych polaryzacjach liniowych? Jak dokładnie wykonano pomiary dwójłomności domieszkowanych ciekłych kryształów? Z wykresu 27 widać wyraźne różnice w położeniach prążków obliczonych teoretycznie i uzyskanych z pomiaru. Skąd się bierze różnica w intensywnościach pomiędzy ciekłym kryształem niedomieszkowanym a domieszkowanym (przy 750 nm nie powinno być absorpcji). Proszę o komentarz w tej sprawie na obronie. Czy próbowano zastosować relacje Kramersa-Kroniga dla pasma absorpcji przez nanocząstki złota?
3. Czy Autorka rozprawy może wytłumaczyć istotne zmiany widm transmisji światłowodu LMA-10 wypełnionego czystym 5CB i domieszkowanym 0.3% AuNP@L1 (por. Rys. 28, str. 47), jeśli w wyniku domieszkowania nie zmienia się dwójłomność?
4. W rozdziale 5 pt. „Badania termooptyczne” znajdują się kluczowe dla tej rozprawy wyniki badań prowadzone w funkcji temperatury pod mikroskopem polaryzacyjnym w warunkach skrzyżowanych pod kątem 90 stopni polaryzatorów liniowych. Tu w opisie eksperymentu nie podano jaka była

- wejściowa polaryzacja światła względem kierunku czesania, nie podano też istotnych dla analizy skali wielkości na zdjęciach ani powiększenia czy użytego obiektywu. Np. na Rys. 31 (a) widzimy czarne pole, następnie rozjaśnienia sugerujące fazę nematyczną (b) i znowu ciemne pole sugerujące fazę izotropową (c) zgodnie z opisem pod rysunkiem. Ponieważ nie podano na zdjęciach temperatur, w których je wykonano, równie dobrze można by założyć zarówno pomiary podczas chłodzenia i ogrzewania, bo końcowe zdjęcia są identyczne. To winno być poprawione.
5. Na Rys. 5.2 gdzie pokazano wyniki badań transmisji światłowodu LMA-10 wypełnionego czystym 6CHBT oraz 6CHBT z 5BCH8N (3% wagowych) zaobserwowano przesuwanie się widma w stronę fal krótszych, co wyjaśniono wzrostem wartości współczynników załamania mieszaniny. Czy wykonano pomiary dla tej mieszaniny czy to tylko przypuszczenie, że tak może być?
  6. Dla zrozumienia wykresów przedstawionych na Rys. 34, str. 56 potrzebna by była struktura pasmowa światłowodu fonicznego z różnymi wypełnieniami, można by tę strukturę przerw fonicznych wprowadzić na te wykresy. Mnie zabrakło precyzyjnej analizy obserwowanych przesunięć widmowych w funkcji temperatury. Jak na tych wykresach wygląda przejście fazowe N-I?
  7. Na stronie 58 pokazano podsumowanie badań termooptycznych. Czy nie warto było dodać precyzyjne badania kalorymetryczne (DSC) tych wszystkich mieszanin by potwierdzić zmiany w temperaturach przejść fazowych i ich rozmycie? Wiadomym jest, że interpretacja wyników w tak skomplikowanym układzie wymaga nie tylko jednej metody pomiarowej ale wielu z nich by zrozumieć wpływ różnych czynników na obserwowane zachowanie się mieszanin.
  8. Na stronie 66 i 67 Pani Bednarska omawia efekt pamięci optycznej w komórce ciekłokrystalicznej w pobliżu przejścia fazowego (por. zdjęcie gwiazdy na Rys. 43). Uważam, że istnieje bardzo wiele znacznie lepszych układów optycznej pamięci stałej i dynamicznej od rozwiązania omawianego w rozprawie, np. działających w oparciu o efekt fotorefrakcyjny, efekty fotochromowe czy reorientacje molekularne wywołane optycznym efektem Kerra.
  9. Na pewno najciekawszym pod względem nowości naukowej są wyniki badań zaprezentowane w rozdziale 6 zatytułowanym „Badania separacji faz”. Autorka rozprawy zauważyła podczas mikroskopowych badań termooptycznych w komórkach ciekłokrystalicznych wypełnionych ciekłym kryształem domieszkowanym nanocząstkami złota niewielkie ale dość regularnie występujące obszary o wyraźnie różnych właściwościach optycznych w pobliżu temperatury przejścia fazowego N-I. Niejednorodności te powiązała ze zjawiskiem separacji faz znanym dla układów niemieszających lub mieszających się w sposób ograniczony cieczy. Analiza zjawiska wymagała wielu obserwacji termooptycznych w dobrze kontrolowanych warunkach temperatury i szybkości jej zmian. Ważnym elementem było przeniesienie obserwacji zjawiska separacji faz do układu kwazi-jednowymiarowego, jakim były kapilary o średnicach od 60 do 3 mikrometrów wypełniane mieszaninami ciekłokrystalicznymi z nanocząstkami złota. W pobliżu temperatury przejścia fazowego N-I w trakcie chłodzenia z fazy izotropowej do nematycznej pojawiały się periodyczne struktury o zwiększonej i zmniejszonej zawartości nanocząstek złota. Zarodkowanie tych struktur zachodzi w dość dobrze oddalonych od siebie obszarach, których period zależy od średnicy użytej kapilary. Pani Bednarska badała te zależności bardzo starannie opracowując specjalny algorytm do wykrywania okresu występowania domen. Wywnioskowała, że zależność między okresem struktury a średnicą kapilary jest liniowa dla kapilar od 3 do 60 mikrometrów. Nachylenia zależności liniowych w różnych kapilarach były różne ale mieściły się w zakresie od ok. 1.7 do 2.8. W tym rozdziale Autorka rozprawy zaprezentowała wiele zdjęć, ale nie zawsze ich kontrast był wystarczający by pokazać to co było w opisie pod zdjęciami (np. Rys. 52 na str. 73, przydałyby się



linie profilu informujące o zmianach jasności obrazów tak jak zrobiono to dla Rys. 45). Na większości zdjęć zabrakło skali długości i temperatury w której dana sytuacja fazowa była fotografowana co znacznie utrudniało ich analizę. Separacja faz zależy od różnicy potencjałów chemicznych w obu fazach, zabrakło mi wytłumaczenia jakie oddziaływania czy proces mogą być źródłem separacji faz? Jaka różnica koncentracji nanocząstek złota jest wystarczająca by ta separacja miała miejsce? Czy kontrast współczynników załamania między tymi fazami może być na tyle duży by obserwować odbicie Bragga, jak sugeruje Autorka rozprawy na stronie 82. Gdy mierzono wcześniej zmiany dwójłomności ciekłego kryształu czystego i domieszkowanego konkluzja była taka, że zmian dwójłomności nie ma (por. str. 46).

Jak już wspominałem na początku mojej recenzji, tekst rozprawy napisany jest językiem, który zapewne nie był sprawdzany przez Doktorantkę pod względem błędów stylistycznych i gramatycznych. Może wynikało to z pośpiechu ale uważne przeczytanie tego co się napisało jest obowiązkiem Autora rozprawy. W mojej ocenie doktoratu nie biorę jednak pod uwagę spraw językowych.

Chciałbym podkreślić, że praca zawiera szereg wartościowych wyników eksperymentalnych i dotyczy ważnych dla współczesnej fotoniki problemów tworzenia nowych materiałów optycznych wynikających z połączenia cech ciekłych kryształów, nanocząstek metali z strukturyzowanymi światłowodami. Dorobek naukowy Autorki dobrze świadczy o jej zaangażowaniu w prace zespołu, ufam, że jej wkład był dominujący przynajmniej przy powstawaniu tych dwóch publikacji, które ściśle są związane z doktoratem.

**Stwierdzam, że praca doktorska Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej jest dziełem oryginalnym, wartościowym a uzyskane wyniki stanowią zauważalny wkład w rozwój fizyki materiałów ciekłokrystalicznych domieszkowanych nanocząstkami metali.**

**Ponadto stwierdzam, że recenzowana rozprawa jak i dorobek naukowy jej Autorki spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych oraz normy akademickie dla prac doktorskich. Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Karoliny Bednarskiej przez Radę Naukową Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Andrzej Miniewicz



Wrocław, dn. 3.08.2021 r.

