



Dr hab. Ireneusz Grulkowski, prof. UMK  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń  
56/611-24-67  
[igrulkowski@fizyka.umk.pl](mailto:igrulkowski@fizyka.umk.pl)  
[www.boelab.org](http://www.boelab.org)

Toruń, 11.09.2021.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marceliny Sobczak**  
*pt. **Badanie właściwości dwójtomnych rogówki ludzkiego oka***

### **Wprowadzenie**

Niniejszą recenzję przygotowano na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. Grzegorza Sęka, na podstawie dostarczonego egzemplarza wydruku pracy doktorskiej. Prace badawcze będące podstawą dysertacji zostały zrealizowane w Katedrze Optyki i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej przez Panią mgr inż. Marcelinę Sobczak pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Magdaleny Asejczyk, prof. PWr.

### **Cel pracy i zasadność podjęcia tematu**

Ogólnie rzecz ujmując, tematyka badawcza rozprawy podlegającej recenzji dotyczy zagadnienia własności optycznych narządu wzroku. W szczególności doktorantka skupiła się na własnościach dwójtomnych rogówki oka ludzkiego. Własności te wynikają ze specyficznej, stosunkowo skomplikowanej organizacji mikrostrukturalnej tej części oka. Należy stwierdzić, że badania struktury narządu wzroku oraz jego wpływu na własności optyczne to niezwykle dynamicznie rozwijająca się dziedzina wiedzy. Badania te nie byłyby możliwe bez zastosowania metod optycznych. Obserwowany w ostatnich latach ciągły rozwój technik optycznych wynika z dostępności nowych technologii (np. źródła światła, elementy optyczne, detektory itp.) oraz pozwala na nowe zastosowania w naukach podstawowych i stosowanych. Metody optyczne są niezwykle atrakcyjne dla badań przyżyciowych (w tym badaniach klinicznych) ze względu na ich



nieinwazyjność i bezkontaktowość. Autorka wykorzystwała metody polaryzacyjne, które standardowo są stosowane np. w badaniach naprężeń, do analizy złożonego ośrodka anizotropowego, jaki stanowi rogówka oka. W związku z tym należy stwierdzić, że problem badawczy poruszany w przedstawionej pracy wpisuje się w bieżące kierunki badań na świecie, a zaproponowane podejście w postaci opracowania szeregu układów polaroskopowych jest aktualnym, oryginalnym i niezwykle cennym osiągnięciem Doktorantki.

Cel pracy został przez Autorkę sformułowany w Rozdziale 1 ("Wprowadzenie") nie w postaci jednego zdania, lecz jako trzy komplementarne cele, które znaleźć można w poszczególnych paragrafach tej części rozprawy, tj. „określenie charakteru rozkładu retardacji, kąta azymutu, a (w) konsekwencji dwójłomności tego ośrodka optycznego”, „sprawdzenie, czy rozkłady opóźnienia fazowego i dwójłomności są symetryczne względem siebie w obrębie całego obszaru rogówki” oraz „sprawdzenie możliwych zastosowań anizotropii rogówki w praktyce okulistycznej, ortooptycznej czy optometrycznej”. Wymienione cele badawcze wynikają z postawionych hipotez, również przedstawionych w Rozdziale 1. Uważam zatem, że problem badawczy został sformułowany poprawnie, a tytuł rozprawy jest adekwatny do założonych celów. Warto w tym miejscu dodać, że postawiony problem wymagał od Autorki podejścia multidyscyplinarnego, łączącego fizykę (optykę), inżynierię, a także naukę o widzeniu i okulistykę kliniczną.

### Struktura pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa składa się ze 131 stron maszynopisu. Praca została podzielona na 6 rozdziałów oraz bibliografię. Dysertacja zawiera również spis treści, zestawienie używanych oznaczeń i symboli, a także (na końcu, nienumerowane strony) zestawienie osiągnięć Kandydatki w postaci listy publikacji, prezentacji i uczestnictwa w konferencjach. W pracy umieszczono łącznie 70 rysunków, 34 tabel oraz 46 równań. Struktura pracy na charakter klasyczny, podobny do prac naukowych w naukach ścisłych. Rozdziały zostały przedstawione w sposób logiczny.

Pierwsze trzy rozdziały mają za zadanie wprowadzić czytelnika w problematykę pracy oraz zapoznać ze stanem wiedzy w dziedzinie badań dwójłomności rogówki. Właściwa część pracy rozpoczyna się wprowadzeniem, w którym Autorka krótko przedstawia historię badań nad dwójłomnymi własnościami rogówki. Stanowi to podstawę do motywowania założonych badań.





Następnie formułowane są tezy pracy oraz cele badawcze. Ostatnie paragrafy zwięźle streszczają osiągnięte rezultaty.

W Rozdziale 2 Doktorantka przedstawia wybrane zagadnienia optyki ośrodków anizotropowych. Celem Autorki jest zaznajomienie z podstawowymi terminami, parametrami opisującymi własności anizotropowe oraz formalizmem opisu teoretycznego, dzięki czemu czytelnik mniej zaawansowany w tej dziedzinie rozumie wielkości mierzone w badaniach będących podstawą dysertacji. Rozdział ten kończy się opisem polaryskopów jako podstawowych narzędzi do badania ośrodków dwójmnych.

Rozdział 3 z kolei skupia się na oku jako obiekcie badań. Zatytułowany jest „Struktura rogówki”, ale oprócz dość szczegółowego opisu budowy rogówki i wpływie na własności optyczne można znaleźć tutaj zestawienie metod pomiaru dwójmności rogówki. W rozdziale tym zaprezentowano także modele strukturalne rogówki oraz optyczne modele anizotropii rogówki, co uważam za bardzo dobrą koncepcję wskazującą na umiejętności syntetycznego podejścia do zagadnienia.

Metodyka badań naukowych została zaprezentowana w Rozdziale 4. Kolejne podrozdziały zawierają opis układów pomiarowych, które zostały opracowane przez Autorkę, tj. polarymetr podwójnej drogi typu Müllera, biomikroskop z lampą szczelinową i polaryzatorem kołowym, polaryskop z obrotowymi płytkami fazowymi, układ optyczny do pomiaru ruchów skrętnych oka. W każdym przypadku opis układu został uzupełniony opisem eksperymentu oraz sposobem analizy danych pomiarowych. W Rozdziale 4 przedstawiono także metodykę opracowania uproszczonego modelu własności dwójmnych rogówki, który posłużył do przeprowadzenia symulacji numerycznych.

Najobszerniejszy Rozdział 5 zawiera wyniki badań. W rozdziale tym, kolejne podrozdziały odpowiadają układowi Rozdziału 4, co znacznie ułatwia czytanie pracy. Zaprezentowano wyniki doświadczeń z wykorzystaniem polarymetru typu Müllera (badanie próbek testowych oraz rogówki oka dla źrenicy naturalnych rozmiarów, źrenicy rozszerzonej i zwężonej, jak również doświadczenie z dwoma grupami wiekowymi), biomikroskopu z lampą szczelinową i polaryzatorem kołowym, polaryskopu z obrotowymi płytkami fazowymi, oraz układu optycznego do pomiaru ruchów skrętnych oka. Rozdział ten kończą wyniki modelowania numerycznego dwójmności rogówek.



Rozdział 6 zatytułowany „Podsumowanie” stanowi syntetyczny opis najważniejszych wyników wraz z rozszerzoną dyskusją wyników pomiarów. Autorka kończy dysertację opisem praktycznej przydatności badań, wpływem tych badań na rozwój dyscypliny oraz wskazaniem planów badawczych na przyszłość.

Ostatnia część pracy to zestawienie bibliograficzne 138 prac, do których odwołuje się Autorka. Jak wcześniej wspominałem, na końcu zaprezentowano osiągnięcia badawcze Doktorantki.

### Uwagi redakcyjne

Dysertacja napisana została starannie przy użyciu poprawnego i precyzyjnego języka w stylu odpowiadającym pracom naukowym. Docenić należy tutaj dyscyplinę Autorki w korzystaniu ze specjalistycznej terminologii w języku polskim. Jednakże Autorka nie ustrzegła się błędów edytorskich, w tym interpunkcyjnych. Większość tych błędów ma charakter tylko błędów typograficznych. Poniżej przedstawiam listę:

- Podziękowania: jest „dr hab. inż. Piotrowi Kurzynowskiemu”, powinno być ‘dr. hab. inż. Piotrowi Kurzynowskiemu” (przypadek zależny)
- s. 2, pierwszy akapit: jest „Dlatego pierwszym celem mojej pracy jest określenie charakteru rozkładu retardancji, kąta azymutu, a konsekwencji dwójłomności tego ośrodka optycznego”, powinno być: „Dlatego pierwszym celem mojej pracy jest określenie charakteru rozkładu retardancji, kąta azymutu, a w konsekwencji dwójłomności tego ośrodka optycznego” (brak w)
- s. 5, podpis wyjaśniający pod równaniem (2.8): amplituda zespolona wektora  $\vec{E}$  – zapis wektorowy należy zachować po obu stronach równania
- s. 18, podpis pod Tabelą 3.1: jest R1, R2,  $\Delta R1$ ,  $\Delta R2$ , powinno być: R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>,  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$
- s. 18, pierwszy akapit: jest „Zmiany w geometrii rogówki”, powinno być „Zmiany geometrii rogówki”
- s. 20, linia 1 od góry: jest „Nabłonek pełni w rogówce rolę ochronną”, powinno być „Nabłonek pełni w rogówce rolę ochronną”
- s. 76, linia 11 od góry: jest „statycznie”, powinno być „statystycznie”
- s. 89, linia 5 od góry: jest „statyczna”, powinno być „statystyczna”





- s. 112, pierwszy akapit: jest „Wiadomo, że dwójłomność rogówki wynika anizotropii lameli oraz ich ułożenia w istocie właściwej.” powinno być „Wiadomo, że dwójłomność rogówki wynika z anizotropii lameli oraz ich ułożenia w istocie właściwej.” (brak z)

W wyniku lektury rozprawy znalazłem również inne niedociągnięcia, których korekta ułatwiłaby czytelnikowi odbiór treści. Zaliczyć tu trzeba następujące uwagi odnośnie edycji tekstu:

- Na stronie 1 użyto skrótu PS-OCT, ale wyjaśnienie tego skrótu znajduje się dopiero na s. 25 oraz 31. Objaśnienia powinny pojawić się przy pierwszym użyciu skrótu.
- s. 43 – Moje wątpliwości budzi użycie terminu „sklejanie funkcji” (ang. unwrapping) dla procedury otrzymywania właściwego opóźnienia fazowego  $\gamma$ . Chyba bardziej właściwym byłoby używanie nazwy „odwijanie fazy”.
- Schematy układów pomiarowych, w których użyto skrótów literowych, nie zawierają wyjaśnienia tych skrótów w podpisach. Objaśnienia te znajdują się w tekście właściwym pracy. Warto by ułatwiać czytelnikowi zadanie podczas chęci szybkiej analizy zadania. Uwaga ta odnosi się także do Rys. 4.19, w którym oznaczenie OA (najprawdopodobniej ‘oś optyczna) nigdzie nie zostało przedstawione.
- Bibliografia zawiera listę publikacji, w których tylko część zawiera nr DOI. W tym przypadku styl powinien być ujednoczony. Rozumiem, że wynikało to z danych w rekordach programu zarządzającego referencjami.

Szata graficzna składająca się z 70 rycin została wykonana poprawnie. Kilka obrazków w części teoretycznej zostało zaczerpniętych z innych prac naukowych, co zostało odpowiednio wskazane w podpisach do rysunków. Mam wrażenie, że pozostałe oryginalne rysunki nie zostały wykonane przy użyciu tego samego oprogramowania, stąd zaobserwować można różnorodność użytych stylów. Na Rys. 3.4 dla jasności warto by dodać oznaczenie lewego i prawego oka. Już wcześniej wspominałem, że dobrą praktyką byłoby niezależne objaśnienie skrótów wprowadzonych na schematach (dotyczy to Rys. 4.1, 4.3, 4.8, 4.11, 4.12). Na Rys. 4.9d warto dodać oznaczenia składowych ( $r$  oraz  $\varphi$ ) w układzie współrzędnych biegunowych. Na Rys. 4.9e wysegmentowano krawędzie figur konoskopowych jako jasne krzywe. Jednakże powrotne przekształcenie do współrzędnych kartezjańskich na mapie na Rys. 4.9f wskazuje, że izochromy są definiowane jako prążki ciemne. Ponadto, czerwone i niebieskie punkty jako punkty



przebiegi izochrom są w praktyce trudno widoczne na Rys. 4.9e-f. Na Rys. 4.19-4.21 nie zawarto skali kolorów na mapie współczynnika załamania światła czy też na obrazie symulowanego obrazu. Niezrozumiała dla mnie jest jakość Rys. 4.6, 5.4 i 5.7. Wyniki te były publikowane, a jednak ryciny z tej samej pracy znajdujące się w dysertacji mają zupełnie inną jakość (por. Rys. 5.1-5.3). Być może wiązało to się z przekształceniem plików w dokumencie manuskryptu. Rysunki 5.5, 5.6, 5.12, 5.14, 5.15, 5.18, 5.20 oraz 5.21 zawierają oznaczenia w języku angielskim. Ponieważ są to oryginalne ryciny Autorki opublikowane w czasopiśmie anglojęzycznym, zaproponowana zmiana nie narażałaby Doktorantce znacznych problemów. Rysunek 5.7 jest stosunkowo niskiej jakości, na którym nie wskazano, czego dotyczą obie krzywe różniące się zapewne kolorem. Czytanie manuskryptu (szczególnie części dotyczącej wyników) nieco utrudnia fakt, że rysunki i tabele są nieco oddalone od miejsc, w których wspomniane są w tekście głównym. Mimo starań Autorki, wynika to z zastosowanych odstępów między liniami i ograniczonego miejsca na jednej stronie maszynopisu.

Tabele zostały przygotowane niezwykle starannie, w jednolitym stylu. Jedyna uwaga dotyczy Tabeli 4.4, w której podano zapewne 95% przedział ufności dla współczynników determinacji  $R^2$ . Jednakże nie zostało wyraźnie stwierdzone.

Przedstawione powyżej uwagi dotyczące edycji tekstu i szaty graficznej nie wpływają znacząco na zawartość merytoryczną pracy, wysoką jakość otrzymanych rezultatów oraz na odbiór informacji. Mam świadomość, że badania zostały przeprowadzone w ciągu ostatnich kilku lat, a Autorka używała różnych narzędzi do wizualizacji wyników pomiarów. Szczegółowa analiza tego aspektu dysertacji wynika tylko i wyłącznie z obsesji recenzenta. Uwagi te należy raczej traktować jako wskazówki dla Autorki w przyszłej pracy zawodowej.

### Uwagi krytyczne i pytania merytoryczne

W tej recenzji chciałbym poruszyć także ważniejsze kwestie merytoryczne, które nasunęły się podczas lektury rozprawy. Część z nich wymaga wyjaśnienia podczas obrony:

- 1) Na s. 17 oraz na Rys. 3.2 Autorka wymienia szczegóły dotyczące geometrii rogówki. Prosiłbym o uszczegółowienie, jaki model oka stanowi referencję do tych stwierdzeń.
- 2) Na s. 32 Autorka stwierdza, że pierwsze badania dwójłomności rogówki metodą PS-OCT zostały wykonane w zespole Götzingera. Faktycznie zespół naukowy z Uniwersytetu Medycznego w Wiedniu był kierowany przez Prof. Hitzenbergera.





- 3) W dysertacji nie znalazłem odniesienia się do kwestii etycznych podczas realizacji badań. Zapewnienia wysokiej jakości badań naukowych ma kluczowe i krytyczne znaczenie szczególnie w badaniach z udziałem ludzi. Prosiłbym o potwierdzenie, że odpowiednie zgody komisji bioetycznej zostały otrzymane.
- 4) Sekcja 4.1.2.3. Autorka nie wspomniała, jakich kropli użyła do farmakologicznego zwężania i rozszerzania źrenicy.
- 5) Aproksymacja izochromy za pomocą czworoboku jest najprostszym sposobem opisu kształtu figur konoskopowych. Obrazy na przykład na Rys. 4.4 pokazują pewną krzywiznę kształtu izochromy. Interesuje mnie, czy bardziej szczegółowa analiza nieśłaby dodatkową informację?
- 6) Nie rozumiem, dlaczego Autorka wykonuje analizę geometrycznych kształtów izochrom i wyraża odległości w pikselach. To samo dotyczy analizy powtarzalności. Czy bardziej poprawnie nie byłoby wyrażanie odległości w mm? To samo dotyczy np. Rys. 4.6.
- 7) Rysunki 4.5 oraz 5.8 – Skąd biorą się skokowe zmiany kąta azymutu?
- 8) Sekcja 4.2.3. – Czy analiza izochrom dla poszczególnych długości fal świetlnych nieśłaby klinicznie użyteczna informację?
- 9) Sekcja 4.2.3. – Czy analiza otrzymanych obrazów konoskopowych była przeprowadzona w pełni automatycznie?
- 10) Prosiłbym o przedyskutowanie charakteru oddziaływania światła z tęczówką. Kwestia ta była poruszana w dyskusji. Czy tęczówka oka może zmieniać polaryzację światła?
- 11) Prosiłbym o wskazanie co przemawiało za podjęciem eksperymentu z różnymi rozmiarami źrenicy.
- 12) W rozdziale poświęconym wynikom pomiarów nie znalazłem informacji dotyczącej porównania parametrów izochrom pomiędzy obiema grupami wiekowymi.
- 13) Dobrze byłoby pomyśleć w przyszłości o badaniach pacjentów z uwzględnieniem własności dwójłomnych i biomechanicznych.

### Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. M. Sobczak ma w przeważającej części charakter typowo doświadczalny. Na uwagę zasługuje także próba modelowania dwójłomności rogówki, co



wykorzystane zostało w symulacjach numerycznych. Zatem Autorka wywiązała się z postawionych zadań.

Niewątpliwym osiągnięciem Doktorantki jest **opracowanie i zbudowanie szeregu oryginalnych układów pomiarowych**, dedykowanych poszczególnym aspektom zagadnienia poruszanego w rozprawie. Wymagało to od Kandydatki zdobycia odpowiedniej wiedzy oraz zdobycia umiejętności z zakresu optyki, inżynierii, biologii i okulistyki. **Doktorantka opracowała samodzielne narzędzia do analizy surowych danych pomiarowych. Układy pomiarowe, zaproponowana metodologia badawcza i oprogramowanie stanowią trwały wkład Autorki w rozwój instrumentarium optycznego służącego do badań anizotropii prostych i złożonych elementów optycznych.** Autorka rozprawy nie ograniczyła swoich rozważań do zwyczajnych testów laboratoryjnych. **Wyzwanie stojące przed Doktorantką było niezwykle trudne w związku z koniecznością wykonywania badań o charakterze eksperymentu badawczego w środowisku klinicznym *in vivo*.** Rozwijanie technologii optycznych i przejście z laboratorium do zastosowań klinicznych z pewnością wymagało wzięcia pod uwagę wielu dodatkowych czynników. Przedstawione wyniki pokazują także, że Autorka sprawnie posługuje się zaawansowanymi narzędziami analizy statystycznej, a dyskusja wyników świadczy o znajomości ograniczeń wykonywanych badań.

**Dysertacja podlegająca ocenie wnosi istotny wkład w zrozumienie anizotropowej natury rogówki.** Uwagi przedstawione przeze mnie wcześniej nie ograniczają mojej wysokiej oceny dysertacji. Doktorantka pokazała, że rogówka nie jest ośrodkiem eliptycznie dwójłomnym i nie jest ośrodkiem dichroicznym. Obserwowana asymetria kształtu figur konoskopowych jest wynikiem nie tylko asymetrii rozkładu grubości rogówki, ale też asymetrii rozkładu dwójłomności. Istotnym odkryciem jest fakt, że asymetria dwójłomności u dzieci jest mniejsza niż u dorosłych. Szczegółowo i kompleksowo przeanalizowano kształt figur konoskopowych oraz grubość rogówki w grupie dorosłych i dzieci. Symulacje dwójłomności rogówki wymagają dalszych badań celem udoskonalenia opracowanego modelu.

**Przedstawiona rozprawa charakteryzuje się nowością na poziomie międzynarodowym.** O jakości, innowacyjności i znaczeniu rozprawy Doktorantki świadczy fakt, że większość przedstawionych wyników zostało już opublikowanych w czasopiśmie z Listy Filadelfijskiej. Wyniki te zostały zawarte w czterech publikacjach, w których Doktorantka jest pierwszym autorem. Ponadto, Pani M. Sobczak jest współautorką zgłoszenia patentowego. Wyniki badań





zaprezentowano także na międzynarodowych i krajowych konferencjach w postaci prezentacji ustnych bądź plakatów. Ze względu na sytuację pandemiczną konferencje te obejmują lata 2018-2019.

**Wyniki badań mają znaczny potencjał praktyczny**, ponieważ mogą zostać praktycznie wykorzystane we wprowadzeniu badań polaroskopowych w procedurach diagnostycznych w okulistyce w przypadku planowania i monitoringu zabiegów chirurgicznych, w tym transplantologii okulistycznej. Podobną drogę przebywa dzisiaj analiza biomechanicznych własności rogówki.

### Podsumowanie

Problem badawczy został prawidłowo i kompleksowo rozwiązany przez Doktorantkę. Założone cele pracy zostały w pełni osiągnięte. Na tej podstawie stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Marceliny Sobczak **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim**, określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ujednolicony tekst Dz. U. z dnia 27 września 2017 roku, poz. 1789 z późn. zm.) oraz w stosownych rozporządzeniach. **W związku z tym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marceliny Sobczak do publicznej obrony. Jednocześnie biorąc pod uwagę argumenty przedstawione w poprzedniej sekcji recenzji, wnioskuję również do Rady Dyscypliny o wyróżnienie ww. rozprawy.** Praca ta zasługuje na wyróżnienie ze względu na innowacyjność i oryginalność rozwiązania problemu naukowego, a także wartość otrzymanych wyników.



*dr hab. Ireneusz Grulkowski, prof. UMK*