

Warszawa, dn. 14 października 2023 r.

dr hab. inż. Piotr Lesiak
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład II Fotoniki i Optyki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Xaviera Forestiera,

pt. „Optimization of glass properties devoted to multi-thermal processes:
Toward mid-infrared photonic components”

Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński

1. Uwagi wstępne

Podstawą wydania opinii jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny „Nauki Fizyczne” Uniwersytetu Warszawskiego, prof. Wojciecha Satuły z dnia 14 września 2023 r. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje w swej części merytorycznej wstęp zawierający wprowadzenie czytelnika w tematykę pracy, część doświadczalną zawierającą opis otrzymanych wyników pomiarów oraz zakończenie i zawiera się na 168 stronach. Część uzupełniającą stanowi bibliografia obejmująca 211 pozycji, spisy rysunków i tabel oraz prezentację dorobku naukowego obejmujący spis publikacji oraz spis odbytych szkoleń.

2. Znaczenie podjętej tematyki

W swojej pracy doktorskiej, pan mgr Xavier Forestier skupił się na tworzeniu i badaniu materiałów służących do budowy elementów optycznych przeznaczonych dla



zakresu bliskiej i średniej podczerwieni (do zakresu 10 mikrometrów). W tym celu Doktorant w swojej pracy badawczej skupił się na technologii wytwarzania szkieł domieszkowanych tlenkami metali ciężkich oraz szkieł chalcogenkowych, a w dalszej kolejności na możliwości wytworzenia z tych szkieł elementów optycznych takich jak światłowodów czy soczewka. Tematyka badawcza, którą zajął się Doktorant jest bardzo aktualna, gdyż w ostatnich latach obserwuje się bardzo duże zainteresowanie układami fonicznymi wykorzystującymi obszar widmowy średniej podczerwieni (MIR) ($\lambda \sim 2\text{--}20\ \mu\text{m}$). Wynika to z faktu, że wiele ważnych cząsteczek organicznych i nieorganicznych ma w tym obszarze widmowym charakterystyczne linie absorpcyjne, odpowiadające podstawowym przemianom energii wibracyjnej i rotacyjnej. Podstawowe przejścia w zakresie średniej podczerwieni mają silniejsze linie niż zwykle stosowane w obszarach widzialnych i bliskiej podczerwieni. Ponadto widma absorpcyjne dla poszczególnych cząstek są szerzej rozłożone w dziedzinie częstotliwości, co umożliwia ich łatwiejsze selektywne wykrywanie. W związku z tym czujniki gazu w zakresie średniej podczerwieni są wysoce pożądane w coraz większej liczbie zastosowań obejmujących analizę chemiczną, takich jak kontrola procesów przemysłowych, monitorowanie środowiska i diagnostyka medyczna.

Podstawowe elementy toru optycznego takie jak soczewki czy światłowodów mają fundamentalne znaczenie podczas projektowania i budowy układów fonicznych. Elementy optyczne na bazie szkieł krzemionkowych (kwarcowych) nie mogą zostać tu wykorzystane gdyż ich praktyczne możliwości transmisyjne kończą się dla długości fali ok $2.5\ \mu\text{m}$. Dlatego można uznać, że podjęta w rozprawie doktorskiej pana mgr Xaviera Forestiera tematyka jest z naukowego punktu widzenia zarówno aktualna, jak i ważna.

3. Teza pracy

Teza pracy nie została sformułowana wprost we wstępie pracy, a jedynie zostały określone cele prac badawczych w formie punktów. Doktorant stwierdził w pracy, że:

Politechnika
Warszawska

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
www.fizyka.pw.edu.pl



- Istnieje możliwość syntetyzowania nowych szkieł z tlenków metali ciężkich o zwiększonej stabilności termicznej, aby wyprodukować opłaczalne soczewki metodą wytłaczania na gorąco do zastosowań w zakresie długości fal od widzialnych do $6\text{ }\mu\text{m}$;
- Istnieje możliwość zwiększenia zakresu przepuszczalności szkieł tellurytowych poprzez obniżenie zawartości wody oraz zastosowanie związków halogenków do produkcji włókien optycznych dla zastosowań w zakresie długości fal do $5,5\text{ }\mu\text{m}$.
- Istnieje możliwość nanostrukturyzacji włókien światłowodowych wykonanych ze szkieł chalcogenkowych, aby skutecznie zaprojektować profil dyspersji, umożliwiającą generację supercontinuum średniej podczerwieni.

Doktorant zrealizował wszystkie wymienione przez siebie cele poprzez realizację kilku prac badawczych. W pierwszej kolejności mgr Xavier Forestier zsyntezował szkło o składzie $\text{SiO}_2\text{-PbO-CdO-Ga}_2\text{O}_3$ i zbadał wpływ tlenku galu na właściwości termiczne i optyczne przy różnej zawartości tlenku ołowiu i tlenku kadmu. Badany materiał okazał się stabilny i odporny na krystalizację co umożliwiło zaprojektowanie i wykonanie soczewki oraz wyciągnięcie włókna światłowodowego. Doktorant był odpowiedzialny także za przygotowanie procesu odwodniania materiały w komorze rękawicowej z kontrolowaną atmosferą w celu polepszenia właściwości transmisyjnych wykonanego światłowodu. Drugim badanym materiałem było szkło tellurytowe w o składzie $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$. Dzięki użyciu różnych technik odwadniania oraz dodaniu związków halogenków podczas procesu wytwarzania, Doktorant uzyskał zwiększenie widmowe transmisji do długości fali $5,5\text{ }\mu\text{m}$. Niestety ten materiał okazał się mało stabilny i dodatkowo podatny na krystalizację, co uniemożliwiło wykonanie elementów optycznych przeznaczonych do dalszych badań.

Kolejnym etapem badań było wykorzystanie szkieł chalcogenkowych do budowy nanostrukturyzowanego włókna światłowodowego o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła, charakteryzującego się niską

Politechnika
Warszawska

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
www.fizyka.pw.edu.pl



tłumiennością w zakresie od 2 μm do 10 μm . Włókna te zostały wytworzone przez mgr Xaviera Forestiera metodą polegającą na układaniu prętów o składzie As-Se i Ge-As-Se, według wcześniej określonego schematu. Badania przeprowadzone przez Doktoranta wykazały, że szkła chalcogenkowe okazały się wystarczająco stabilne, aby wytrzymać procesy termiczne związane z produkcją włókien światłowodowych o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła.

Ostatnim etapem były badania możliwości generacji supercontinuum w światłowodzie charakteryzującym się gradientowym rozkładem współczynnika załamania. Badania wykonane przez mgr Xaviera Forestiera wykazały, że istnieje możliwość generacji supercontinuum w zakresie od 1 μm do 7 μm dla światłowodów wykonanych ze szkła chalcogenkowego.

4. Struktura rozprawy

Praca została podzielona w czytelny sposób na część teoretyczną i badawczą. Każdy rozdział zawiera podsumowanie, osobną numerację rysunków i tabel oraz osobną listę referencji. Taki podział utrudnia trochę nawigację pomiędzy poszczególnymi częściami doktoratu, zwłaszcza w odniesieniu do literatury, nie tylko recenzentowi ale i autorowi dysertacji, gdyż pojawia się w związku z tym sporo błędów edycyjnych. Czasem odnośniki się nie pojawiają, czasem odnoszą się do złych referencji, a czasem są zdublowane.

W rozdziale pierwszym, będącym jednocześnie wstępem teoretycznym, Doktorant zaprezentował obecny stan wiedzy na temat materiału szklistego, jego definicji, właściwości i rodzajów. Rozdział ten zawiera również przedstawienie stanu wiedzy w odniesieniu do włókien światłowodowych czyli opis propagacji światła, opis przyczyn powstawania strat propagacyjnych oraz opis zjawiska dyspersji chromatycznej. Rozdział kończy się opisem zjawisk nieliniowych występujących w dielektrykach. Rozdział ten, pomimo swojej dość znacznej objętości, nie uwzględnia kilku aspektów opisywanych w rozprawie takich jak opis soczewek gradientowych lub



metody wytwarzania szkieł przeznaczonych do wytwarzania włókien światłowodowych. Zwłaszcza opis technologii chemicznego osadzania z fazy gazowej byłby przydatny podczas dyskusji na temat problemów wykorzystania tej metody przy wytwarzaniu szkieł chalcogenkowych na potrzeby włókien światłowodowych.

Rozdział trzeci opisuje wszystkie metody badawcze do badania właściwości termicznych i optycznych szkieł wykonanych przez Doktoranta w ramach tej pracy. Wydaje się jednak, że nie wszystkie metody badawcze zostały wykorzystane w badaniach (np. pomiar współczynnika rozszerzalności termicznej), a niektóre metody nie zostały opisane w ogóle (np. metoda symulacji generacji supercontinuum).

Kolejne trzy rozdziały zawierają oryginalne wyniki badań otrzymane przez Doktoranta w trakcie jego pracy badawczej. Rozdział 3 dotyczy szkieł domieszkowanych tlenkami metali ciężkich. W ramach tego rozdziału prezentowane są wyniki badań termicznych i optycznych właściwości dwóch typów szkieł: $\text{SiO}_2\text{-PbO-CdO-Ga}_2\text{O}_3$ oraz $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$. Rozdział ten w większej części pokrywa się z publikacją Doktoranta (X. Forestier et. al. "Study of $\text{SiO}_2\text{-PbO-CdO-Ga}_2\text{O}_3$ glass system for mid-infrared optical elements.", *Journal of Non-Crystalline Solids* 503, pp52-61, 2019), która jednakże wcale się nie pojawia jako odnośnik w tym rozdziale. Treść, rysunki i tabele są wprost zaczerpnięte z artykułu naukowego do tego stopnia, że czasem nie zgadzają się odnośniki do rysunków w dysertacji.

Rozdział 4 przedstawia opis technologii wytwarzania i badania nanostrukturyzowanych włókien światłowodowych na bazie szkieł chalcogenkowych przeznaczonych dla średniej podczerwieni. W rozdziale tym Doktorant wykazał, że zmieniając ułożenie prętów As-Se i Ge-As-Se, istnieje możliwość uzyskania płaskiego profilu dyspersji, co pozwala efektywnie wykorzystać nieliniowość szkła chalcogenkowego w szerokim zakresie długości fal. Dla światłowodów badanych w tym rozdziale uzyskano transmisję światła w zakresie od 1 do 12 μm .



Rozdział 5 dotyczy zbadania możliwości uzyskania generacji supercontinuum w dwóch różnych nanostrukturyzowanych światłowodach wykonanych ze szkła krzemionkowego przy użyciu impulsów nanosekundowych oraz chalkogenkowego pompowanego impulsami femtosekundowymi. W obu przypadkach uzyskano generację supercontinuum.

Rozprawę kończy rozdział podsumowujący wyniki uzyskane w ramach pracy doktorskiej.

Na moment redakcji rozprawy doktorskiej dorobek pana mgr Xaviera Forestiera stanowią trzy prace opublikowane w czasopismach z listy JCR: Journal of Non-Crystalline Solids (IF 3.5), Applied Nanoscience (IF: 3.9), Advanced Photonics Res. (IF: 3.7) związane bezpośrednio z rozprawą doktorską oraz dwie prace opublikowane w czasopismach z listy JCR: Journal of the Optical Society of America B (IF: 1.9) i Photonics Letters of Poland (IF 0.6) niezwiązane z rozprawą doktorską. W dwóch pierwszych publikacjach, związanych ściśle z rozprawą doktorską, Doktorant występuje jako główny współautor. Wyniki z tych prac są opisane w trzecim, czwartym i piątym rozdziale monografii.

5. Ocena formalna

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej pana mgr Xaviera Forestiera można przyjąć:

- Wykorzystanie technologii nanostrukturyzacji do wytworzenia włókien światłowodowych wykonanych ze szkła chalkogenkowych o składzie As-Se i Ge-As-Se
- uzyskanie generacji supercontinuum w światłowodach nanostrukturyzowanych o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła

Tematyka rozprawy doktorskiej pana mgr Xaviera Forestiera jest atrakcyjna w aspekcie technicznym i technologicznym. Analizowane zagadnienia są ważne dla współczesnej fotoniki w perspektywie praktycznego wykorzystania wyników

Politechnika
Warszawska

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
www.fizyka.pw.edu.pl



uzyskanych w ramach realizacji pracy doktorskiej. Aplikacyjny charakter uzyskanych wyników oceniam bardzo wysoko.

Zawarty w rozprawie materiał badawczy świadczy, że pan mgr Xavier Forestier posiada umiejętności zarówno samodzielnego formułowania problemów technicznych i technologicznych, jak i ich rozwiązywania.

Struktura rozprawy jest poprawna choć autor nie ustrzegł się w niej błędów. Poniżej przedstawiam listę szczegółowych uwag krytycznych do części teoretycznej rozprawy a później do części eksperymentalnej.

1. Błędy edycyjne:

- a. brakuje informacji w spisie treści o referencjach do rozdziału 4
 - b. odniesienie do Rys. 29 na stronie 43 dotyczy propagacji jednomodowej a Rys. 29 pokazuje różnice pomiędzy światłowodem klasycznym a fotonicznym
 - c. referencje 6 i 7 ze strony 61 nie wskazują poprawnych odnośników
 - d. dublujące się referencje (np. 16 i 55 oraz 20 i 38 z rozdziału 1)
 - e. brak skali na Rys. 2 ze strony 108.
 - f. brak jednorodnego opisu rysunków – czasem jest a) i b) a czasem left/right
 - g. Nie zgadza się numeracja na Rys. 8 ze strony 149 i Rys. 9 ze strony 150.
2. Czy wartość lepkości na stronie 61 jest prawidłowa? Niestety nie można tego sprawdzić gdyż coś jest nie tak z odnośnikiem literaturowym w tym przypadku
 3. Czy skrócenie preformy może być wywołane przez skurcz taśmy teflonowej użytej do zawinięcia preformy? Czy stosowano inne techniki zabezpieczenia preformy?
 4. Nie jest wytłumaczone z czego wynikają straty propagacyjne światłowodu dla zakresu 6-7 μm na Rys. 21 i Rys. 22 ze strony 122 i 123.



5. Dlaczego technologia chemicznego osadzania z fazy gazowej nie może być użyta do wytwarzania szkła chalcogenkowych z gradientowym rozkładem współczynnika załamania światła? Jakie ograniczenia ma ta technologia?

Przedstawione uwagi nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta o rozprawie doktorskiej pana mgr Xaviera Forestiera.

6. Podsumowanie

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Praca zawiera duży materiał badawczy. Jest to materiał o charakterze badań eksperymentalnych związanych z przygotowaniem i wykonaniem materiałów szklanych służących do wytwarzania soczewek i światłowodów. Doktorant wykazał, że opracowane i wykonane z jego udziałem materiały mogą służyć jako elementy optyczne przeznaczone dla zakresu średniej podczerwieni. Elementy optyczne wykonane z tych szkła charakteryzują się niską tłumiennością oraz możliwością generacji supercontinuum w zakresie średniej podczerwieni.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr Xaviera Forestiera pt.:

„Optimization of glass properties devoted to multi-thermal processes: Toward mid-infrared photonic components”

spełnia ustawowe wymagania dotyczące uzyskania stopnia doktora. Wniosuję więc o dopuszczenie mgr Xaviera Forestiera do dalszych etapów procedury doktorskiej.

Politechnika
Warszawska

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
www.fizyka.pw.edu.pl