

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Jarosława Cimka

pt.: „Wieloskładnikowe szkła krzemianowe z wysoką zawartością tlenków metali ciężkich do zastosowań fotonicznych”.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr Jarosława Cimka p.t. „Wieloskładnikowe szkła krzemianowe z wysoką zawartością tlenków metali ciężkich do zastosowań fotonicznych”, którego promotorem jest dr hab. Ryszard Buczyński (Instytut Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego), a promotorem pomocniczym dr inż. Ryszard Stępień (Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie). Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego, prof. dr hab. Dariusza Wasika.

### *Tematyka i cel pracy*

Technologia szkła krzemionkowego opracowana w postaci osadzania z fazy gazowej (CVD – ang. Chemical Vapour Deposition) umożliwiła w ubiegłym wieku realizację w pełni optycznej telekomunikacji światłowodowej (ang. AON – All Optical Network) oraz powstania laserów włóknowych dużej mocy. Jednocześnie rozwijane były różne konstrukcje światłowodów do zastosowań czujnikowych czy budowy nowych rodzajów źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Początkowo obejmowały one klasyczny rodzaj włókien tj. ze skokowym profilem współczynnika załamania światła, a do najważniejszych należą światłowody telekomunikacyjne, polaryzacyjne i z podwójnym płaszczem (ang. double-clad). Nowym rodzajem światłowodów krzemionkowych były włókna fotoniczne, w których transmisja realizowana jest dzięki wytworzeniu fotonicznej przerwy wzbronionej wynikającej z periodycznego układu otworów. Światłowody te początkowo stosowane były jako elementy sensorowe, a później w związku z rozwojem źródeł piko i femtosekundowych były badane jako potencjalne źródła szerokopasmowe tj. (ang. supercontinuum). O ile powyższe zalety światłowodów krzemionkowych są niepodważalne, to sam materiał jako szkło posiada dobrze znane ograniczenia dotyczące zakresu spektralnego w bliskiej podczerwieni czy małej wartości nieliniowego współczynnika załamania światła. W związku z tym prowadzone są od wielu lat badania nad propozycją nowych szkieł do zastosowań w technice światłowodowej. Obok modyfikacji szkła krzemionkowego czyli różnych składów szkieł krzemianowych, powstało

wiele innych osnów zarówno tlenkowych (fosforanowe, tellurynowe, germanianowe) jak i nietlenkowych (fluorkowe, tellurkowe czy chalcogenidowe). Wszystkie te szkła w obrębie stabilnych termicznie składow umożliwiają wytworzenie światłowodów o różnych celach aplikacyjnych. Jednym z aktualnych kierunków badawczych są światłowody pozwalające na konstrukcje nowych szerokopasmowych źródeł promieniowania w zakresie środkowej podczerwieni. Można realizować takie układy poprzez domieszkowanie pierwiastkami ziem rzadkich lub generację superkontinuum. O ile pierwsza metoda wymaga zwykle określonych parametrów niskiej energii fononów osnowy to druga stabilnych termicznie szkielek do budowy światłowodów o dedykowanych właściwościach takich jak.: właściwości nieliniowe, kształtowanie dyspersji, formowanie konstrukcji włókna fotonicznego (PCF ang. Photonic Crystal Fibre). Dobór tego rodzaju szkielek nie jest zagadnieniem oczywistym, sprowadzającym się tylko do syntezy i pomiaru ich parametrów optycznych (jak w wielu publikacjach, w tym też z listy JCR). Szkła takie w odniesieniu do projektowanych struktur fotonicznych, ich właściwości falowodowych, transmisyjnych czy nieliniowych (uzyskanych w drodze modyfikacji struktury), muszą spełniać wymogi technologii światłowodów obejmujące zagadnienia ich stabilności termicznej, tendencji do krystalizacji czy dopasowania wartości współczynnika rozszerzalności termicznej.

W tym obszarze zawiera się tematyka pracy doktorskiej mgr Jarosława Cimka. Dotyczy ona opracowania wieloskładnikowych szkielek krzemianowych modyfikowanych tlenkami metali ciężkich do konkretnie adresowanych zastosowań fotonicznych. Wprowadzanie do osnowy jonów ciężkich prowadzi do przesunięcia krawędzi absorpcji w zakresie średniej podczerwieni, a także wzrostu wartości współczynnika załamania światła. Chociaż prace tego typu prowadzone były dla wielu różnych składow i generalnie wpływ metali ciężkich na właściwości szkielek krzemianowych jest znany to słusznie Autor zauważa, że systematyczne badania nad parami szkielek o określonych parametrach dedykowanych technice światłowodowej należą do rzadkości. Technologia tego typu materiałów należy do jednych z łatwiejszych, ale ze względu na trudny proces wyciągania światłowodów fotonicznych wymaga kompleksowego podejścia obejmującego obok charakteryzacji właściwości optycznych szkielek, pogłębionej analizy parametrów technologicznych jak stabilność termiczna czy długość szkielek. Podejmując to wyzwanie Autor już na wstępie sformułował następujące cele:

1. *„Opracowanie układu dwóch szkielek do wytwarzania całoszkłanych włókien fotonicznych z możliwie maksymalną różnicą współczynników załamania światła.*
2. *Opracowanie układu dwóch szkielek do wytwarzania całoszkłanych włókien fotonicznych z wysoką transmitancją w zakresie od światła widzialnego do średniej podczerwieni.*

3. Opracowanie szkła do wytwarzania soczewek metodą wyciskania na gorąco (ang. Hot embossing), mogącego pracować w zintegrowanych układach do detekcji gazów”.

i tezy pracy:

- „Możliwe jest uzyskanie wysokiego kontrastu współczynników załamania (powyżej 0,4) dwóch wieloskładnikowych szkieł krzemianowych, przeznaczonych do wspólnego przetwarzania termicznego.
  - Możliwe jest opracowanie dwóch wieloskładnikowych szkieł krzemianowych z wysoką zawartością tlenków metali ciężkich, przeznaczonych do wspólnego przetwarzania termicznego, dla których wspólne okno transmisyjne zawiera się w zakresie od 0,5 do 4,5  $\mu\text{m}$ ”.
- Zakres pracy obejmował:
- „Badanie zakresu tworzenia się szkła w układzie tlenkowym  $\text{SiO}_2\text{-PbO-Bi}_2\text{O}_3$ .
  - Badanie wpływu dodatku tlenków metali, takich jak tlenek sodu, tlenek tytanu oraz tlenków metali ciężkich takich jak tlenku baru, tlenku kadmu i tlenku cynku, na właściwości termiczne szkła bizmutowo ołowiowo krzemianowego.
  - Określenie nieliniowych współczynników załamania różnych szkieł wieloskładnikowych, w tym ołowiowo krzemianowych, borokrzemianowych, szkieł krzemianowych z wysoką zawartością tlenków metali ciężkich, fosforanowych i tellurowych.
  - Wyznaczenie zmian właściwości termicznych i optycznych szkieł w zależności od warunków prowadzenia syntezy. W szczególności zmian zawartości grup hydroksylowych w szklach powodujących silną absorpcję w zakresie 2,8-3,2  $\mu\text{m}$ ”.

Należy podkreślić, że cel pracy jednoznacznie wskazuje na rozwiązanie problemu naukowego jakim jest uzyskanie nowych właściwości optycznych struktur fotonicznych poprzez opracowanie technologii par szkieł do konstrukcji światłowodów o ściśle określonych parametrach. Zagadnienia będące przedmiotem pracy są istotne i aktualne z naukowego punktu widzenia, gdyż prowadzą do uzyskania struktur pozwalających na badanie generacji superkontinuum czy też nowych elementów mikrooptycznych. Stwierdzam, że przyjęte przez Autora założenia są słuszne, a cel i teza pracy zostały sformułowane prawidłowo.

#### **Układ pracy**

Licząca 160 stron praca jest podzielona na dwie części: literaturową (rozdz. 1-3) oraz doświadczalną (4-7). Wyeksponowane zostały następujące fragmenty rozprawy: wstęp zawierający cel, tezę i zakres pracy, podsumowanie, lista publikacji Autora oraz bibliografia. We wstępie Autor wskazał najnowsze kierunki rozwoju pasywnych struktur fotonicznych i na tej podstawie przedstawił motywację dotyczącą realizacji niniejszej rozprawy. Dalej w części literaturowej, obejmującej 60 stron, dokonano charakterystyki porównawczej głównych rodzajów szkieł stosowanych w światłowodach fotonicznych (rozdz.1), ich preparatyki (rozdz. 2) oraz użytych w pracy metod pomiarowych (rozdz. 3). Kolejno

przechodząc do opisu realizacji pracy Autor wykonał systematyczne badania nad układem szkieł  $\text{SiO}_2\text{-PbO-Bi}_2\text{O}_3$ , (rozdz. 4) aby na tej podstawie oszacować możliwości technologiczne i osiągnąć założone wartości parametrów optycznych szkieł i w konsekwencji wytworzyć z nich światłowody i struktury fotoniczne (rozdz. 5 i 6). Prezentacja osiągniętych wyników opatrzona jest wnikliwą dyskusją, zamieszczaną na każdym etapie pracy. Stwierdzam, że układ pracy jest poprawny i pozwala na jednoznaczną ocenę osiągnięć własnych mgr Jarosława Cimka.

### ***Ocena pracy***

Rozprawa doktorska Pana mgr Jarosława Cimka ma technologiczny charakter i jest ukierunkowana na ściśle określone cele aplikacyjne jakimi jest opracowanie szkieł do wytworzenia w pełni szklanych („całoszklanych” - w rozumieniu wypełnienia szkłem otworów powietrznych) włókien fotonicznych o dużej różnicy współczynników załamania światła i szerokim zakresie transmisji VIS-NIR oraz soczewek wyciskanych na gorąco. Należy podkreślić, że z punktu widzenia techniki wyciągania światłowodów fotonicznych, włókna „całoszklane” oferują mniejszy poziom zniekształceń geometrycznych i pozwalają na szerszy zakres przetwarzania i odwzorowania struktur o wielkościach rzędu setek nanometrów. Jest to wyraźnie widoczne już w części literaturowej, w której Autor podkreśla i dyskutuje aspekt przetwarzania szkła w struktury fotoniczne, wskazując na zalety i ograniczenia obecnie stosowanych szkieł. Zaprezentowane w tabeli 2 ogólne podsumowanie właściwości szkieł stosowanych we włóknach PCF określa kryteria wstępne jakimi kierował się Autor w wyborze układu szklatego. W istocie zwraca On szczególną uwagę na parametry stabilności termicznej szkieł komentując je w kontekście występujących w osnowie składników. Biorąc pod uwagę dodatkowo kontrolę wartości współczynnika rozszerzalności termicznej i założonego współczynnika refrakcji, słusznie Autor stwierdza, że zadanie opracowania dwóch różnych składów szkieł mających współpracować w wyrafinowanej konstrukcji fotonicznej nie jest łatwe nawet w obrębie znanych szkieł krzemianowych. Wynika to z faktu wielokierunkowego wpływu poszczególnych składników na parametry optyczne i termiczne szkła. Stąd, przytaczane przez Autora znane problemy z lepkością szkła nawet krzemionkowego wytwarzanego metodą osadzania z fazy gazowej, gdzie nadmierne stosowanie modyfikatorów np.  $\text{P}_2\text{O}_5$  czy  $\text{B}_2\text{O}_3$  wpływa na obecność naprężenia na granicy rdzenia i płaszcza światłowodu. Istotne w tej części są spostrzeżenia dotyczące kontrolowania procesu wytopu szkła, tj. rodzaju atmosfery (utleniającej/redukującej) poprzez przepłukiwanie stopu czy też wprowadzanie składników zawierających tlen. Jak również ostrożne wprowadzanie składników, które nie są

ewidentnie szkłotwórczymi i mimo zalet optycznych (np. wzrost współczynnik refrakcji, czy nieliniowości) silnie podnoszą tendencję szkła do krystalizacji. Autor odnosi się do tego typu aspektów w kontekście znanych osnów, wysuwając przy tym konkretne sugestie technologiczne dotyczące właściwego doboru surowców, tygli czy procesu kłębienia wydalnie zmniejszającego stężenie jonów  $\text{OH}^-$  w szkłe. Kolejno przechodzi do szczegółowego opisu metod badawczych pozwalających na wyznaczenie parametrów (liniowy i nieliniowy współczynnik załamania światła, transmisja, współczynnik rozszerzalności cieplnej, temperatura transformacji, dylatometryczna temperatura mięknięcia, krzywa lepkości szkła) istotnych z punktu widzenia planowanych struktur fonicznych. Należy podkreślić przejrzystość części literaturowej prowadzącej do wniosku, że Autor dokonał nie tylko rzeczowego i aktualnego przeglądu literatury (157 pozycji), ale cechuje Go przede wszystkim dobra znajomość potrzeb współczesnej fotoniki i możliwości technologicznych w zakresie szkła i światłowodów umożliwiających ich realizację. Na każdym etapie prowadzona jest dyskusja i wysuwane logiczne wnioski wyjaśniające kolejne kroki badawcze. Postępowanie takie jest słuszne i nie dziwi recenzenta wobec faktu wieloletniego doświadczenia i warsztatu badawczego w zakresie technologii szkła i światłowodów promotora pomocniczego dra inż. Ryszarda Stępnia i Zakładu Szkła, Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie.

Autor słusznie rozpoczyna swoje prace od systematycznych wytopów w ramach układu  $\text{SiO}_2\text{-PbO-Bi}_2\text{O}_3$ , prowadzących do opracowania trójkąta Gibbsa i na tej podstawie (tab.5, rys. 33) selekcjonuje składy o zawartości 50-60% mol  $\text{SiO}_2$ . Analiza wykonanych pomiarów ich właściwości zawarta w tabeli 6 (w szczególności krzywe lepkości) wskazuje na dobrą powtarzalność procesu technologicznego. Widoczna na krzywych DSC skłonność do krystalizacji niemal wszystkich składów szkła, sugeruje dalszą ich modyfikację, co zostało zaproponowane przy użyciu wybranych tlenków ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{CdO}$ ). Zastosowanie stężenia 5% mol dla wszystkich tlenków wydaje się rozsądne z punktu widzenia przyszłej optymalizacji właściwości optycznych i termicznych szkła związanej z wytwarzaniem struktur fonicznych, które determinują postawione w pracy cele. Zrealizowana przez Autora preparatyka składów szkła miała doprowadzić do wytworzenia układów pozwalających na uzyskanie światłowodów fonicznych do generacji superkontinuum w bliskiej i środkowej podczerwieni oraz soczewek nanostrukturyzowanych. Podstawową trudnością dla tych układów to, pomijając oczywistość uzyskania parametrów optycznych, wysoka stabilność termiczna i dopasowanie lepkości par szkła umożliwiające wielokrotne przeciąganie w trakcie procesu ich kształtowania. Autor, świadom tych trudności (rozdz. 5 - wstęp), proponuje

początkowo dobór składu osnowy do dobrze znanych stabilnych termicznie szkieł F2 i SF6 firmy Schott. Dopasowanie krzywych lepkości wobec znacznych różnic temperatur charakterystycznych pomiędzy osnową borokrzemianową, a szklami ołowiowymi wymaga wprowadzenia znacznego stężenia tlenków alkaicznych. W rezultacie poszukiwań powstaje skład szkła oznaczony NC-21A ( $55\text{SiO}_2\text{-}26\text{B}_2\text{O}_3\text{-}1\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}3\text{Li}_2\text{O-}9,5\text{Na}_2\text{O-}5,5\text{K}_2\text{O}$ , %mas) zawierający sumarycznie ok. 20 %mol alkaliów, pozwalając tym samym na dopasowanie krzywych lepkościowych wybranych szkieł w zakresie 6-7dPas. Ponadto, różnice w wartości lepkości szkieł F2 i SF6 (w stosunku do NC-21A) umożliwiają przy wyciąganiu światłowodów na modyfikacje kształtu komórki sieci oraz wprowadzanie elementów przetwarzalnych na poziomie mikrometrów. Dowodem na to jest wytworzenie dwóch struktur włóknowych będących połączeniem szkieł NC-21A z F2 i SF6 (rys. 47 i 48).

Kolejnym zadaniem była modyfikacja opracowanego szkła w celu uzyskania wzrostu współczynnika refrakcji o wartość 0,03 umożliwiającej konstruowanie soczewek gradientowych o rozmiarach dopasowanych do wielkości rdzeni światłowodowych. Naturalnym wyborem był tlenek baru, który jest często wykorzystywany do tych celów, jednocześnie nie wpływa znacząco na strukturę szkła przy stosunkowo niskich zawartościach. Autor wykonał serię syntez dla zawartości BaO 0,6-9% mol jednocześnie próbując wprowadzić CdO. Ostatecznie zdecydował się na wykorzystanie szkła z samym dodatkiem tlenku baru – uzyskując w ten sposób, jak sądzi recenzent lepszą jednorodność optyczną szkła. Przy małych zawartościach metali ciężkich zawsze spodziewać się można fluktuacji w wartości współczynnika załamania światła, stąd wprowadzenie samego BaO powinno dawać bardziej powtarzalne wyniki. Jak poprzednio cel aplikacyjny został zrealizowany w postaci soczewki gradientowej oraz włókna ze strukturyzowanym gradientowym rdzeniem. Soczewka o grubości  $12\mu\text{m}$  i ogniskowej  $80\mu\text{m}$ , umieszczona na czole światłowodu pozwoliła na uzyskanie przewężenia wiązki o wartości  $8\mu\text{m}$ . Natomiast wytworzone włókna o średnicach rdzenia od ok.  $3\mu\text{m}$  do  $6\mu\text{m}$  składały się wielokrotnie przycienionych pręcików ze szkieł NC-21A oraz NC-34 i charakteryzowały się zmienną dyspersją umożliwiającą uzyskanie wartości bliskiej zero – interesującej z punktu widzenia generacji supercontinuum o dużej koherencji.

W kolejnym rozdziale 5.3 Autor podejmuje się udowodnienia pierwszej części tezy, a więc opracowania struktury o dużej różnicy współczynników załamania światła. Jako szkło o wyższym współczynniku załamania światła ( $n_D=1,940$ ) stosuje układ PBG81 ( $40\text{SiO}_2\text{-}30\text{PbO-}10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}13\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-}7\text{CdO}$ ) podejmując wyzwanie dopasowania jego parametrów technologicznych do szkła borokrzemianowego. Wobec znacznej różnicy w zawartości tlenków ciężkich nie było to zadanie łatwe, ale korzystając z wcześniejszych doświadczeń

modyfikuje Autor stosunki molowe składników alkaicznych w ramach szkła NC-21A uzyskując osnowę o składzie  $53\text{SiO}_2\text{-}28\text{B}_2\text{O}_3\text{-}1,5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{Li}_2\text{O}\text{-}5\text{Na}_2\text{O}\text{-}7,5\text{K}_2\text{O}$  (UV-710). W związku z planowanym zastosowaniem tego szkła do uzyskania superkontinuum ok. 2800nm oba rodzaje szkieł są poddawane procesowi kłębienia prowadzącego do znacznego obniżenia zawartości jonów  $\text{OH}^-$  w zakresie 2800-3300 nm. Uzyskuje w ten sposób dobrą zgodność parametrów technologicznych i różnicę współczynników refrakcji równą 0,414. Ponadto weryfikuje wstępnie poziom naprężeń występujący pomiędzy parami szkieł dokonując oceny polaryskopowej obrazów połączeń wykonanych w temperaturze ok. 640C (6dPas), a następnie wykonuje światłowód o wymiarach geometrycznych  $180\mu\text{m}/24\mu\text{m}$  (średnica płaszcz/rdzeń) i tłumieniu ok. 6dB/m (1560nm). Przy tej długości fali wzbudzenia (laser 80fs, 6nJ) przeprowadzone zostały symulacje generacji superkontinuum sugerujące uzyskanie płaskiej charakterystyki w zakresie 900-2500nm, dla zaprojektowanej struktury fotonicznej o stałej sieci  $\Lambda=2,08\mu\text{m}$  i współczynniku wypełnienia  $d/\Lambda=0,4$ .

Naturalną konsekwencją użycia szkła borokrzemianowego była jego nieużyteczność powyżej  $2,8\mu\text{m}$  wynikająca z obecności krawędzi w średniej podczerwieni. Dopasowanie szkła (do PBG81) o transmisji powyżej tej wartości wymagało zaproponowania składu pozbawionego tlenku boru i zawierającego cięższe tlenki (rozdz. 5.4). W wyniku poszukiwań (tab. 18) Autor zaproponował szkło o składzie  $50\text{SiO}_2\text{-}20\text{PbO}\text{-}15\text{ZnO}\text{-}10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}5\text{BaO}$  (SPB-N12), z doskonałym dopasowaniem krzywych lepkości i dylatometrycznej potwierdzeniem czego był pomiar polarymetryczny. Jednak najistotniejszym aspektem tej części pracy była analiza zmian parametrów (Tab. 20, rys. 75) termicznych i optycznych względem zmiennych warunków syntezy (rys. 73) wskazujących na fluktuacje wartości temperatur charakterystycznych, ale przede wszystkim wartości współczynnika refrakcji. Rzuca to w konsekwencji na parametry przyszłych struktur fotonicznych.

Uważam przeprowadzone prace zawarte w rozdziale 5 za istotne w obrębie szkieł dedykowanych technice światłowodowej. Koniecznym uzupełnieniem badań, wynikającym z zastosowań opracowanych szkieł do generacji szerokiego widma superkontinuum było określenie wartości nieliniowego współczynnika załamania światła. Słusznie Autor zauważył, że w literaturze pojawiają się nieco różne wartości tego parametru dla tych samych szkieł wynikające nie tylko z faktu używania różnych długości fali lasera. Ważnym rezultatem tych badań, przeprowadzonych techniką z-scan było wykazanie znacznych różnic w wartości parametru  $n_2$  szkieł wynikających z samego procesu technologicznego ich wytwarzania jak to miało miejsce w przypadku układu PBG81. Zaprezentowane wartości dla różnych 15 szkieł

(tab. 24), pozwolą z pewnością na usystematyzowanie tych wyników i doprowadzą do weryfikacji wpływu parametrów nieliniowych na projektowanie struktur fotonicznych.

W ostatnim rozdziale Autor opisuje próby otrzymania soczewek metodą odcisku (ang. „hot embossing”). Faktycznie, pomimo niezbyt wyrafinowanej techniki tego procesu nie jest to zadanie łatwe i wymaga ścisłego dopracowania elementów termicznych materiału szkła oraz samego urządzenia. Wynika to z przytoczonego opisu dotychczas wykonywanych soczewek polimerowych i chalcogenidkowych oraz prób doświadczalnych Autora. Niezbędne jest tu podejście indywidualne względem założonego celu jakim było opracowanie soczewki dla zakresu podczerwieni. Kierując się stabilnością termiczną wytypowane zostały dwa składy PBG-08 (wcześniej używane) oraz tellurowe (TWPN/I/6). W pierwszym przypadku uzyskano lepsze rezultaty, natomiast w soczewki na bazie szkła TWPN/I/6 wykazywały krystalizację powierzchniową. Kontynuując badania zdecydowano się na propozycję zupełnie nowej kompozycji zawierającej 46%mol tlenku bizmutu, która poza założonymi parametrami optycznymi w zakresie formowania soczewki nie ma tendencji do krystalizacji. Ponadto w odróżnieniu od szkła PBG-08 ma niższą temperaturę tworzenia kuli co powinno być korzystne w procesie odciskania soczewek.

Podsumowując, stwierdzam, że zaprezentowane wyniki pracy mają charakter interdyscyplinarny i stanowią wyraźny wkład w obszarze fotoniki. Należy wyraźnie podkreślić, że realizacja pracy była podporządkowana nadrzędnemu celowi dotyczącemu osiągnięcia zaplanowanych właściwości optycznych – włókien umożliwiających generację superkontinuum w środkowej podczerwieni, wzrostu nieliniowości struktury dzięki wykorzystaniu strukturyzowanych rdzeni, transmisji w szerokim zakresie od 0,5  $\mu\text{m}$  do 4,5  $\mu\text{m}$  nowych rodzajów światłowodów i mikrosoczewek. Wymagało to od Autora interdyscyplinarnej wiedzy łączącej zjawiska optyczne (fallowodowe) z technologią struktur fotonicznych oraz umiejętności zaproponowania materiałów szklistych do realizacji postawianych założeń. Efektem pracy są wytworzone konstrukcje światłowodów i struktury fotoniczne oraz po raz pierwszy uzyskane wyniki pomiarów optycznych (p.5, p.6.2) i symulacji numerycznych (p. 5.2.3., p. 5.3.4).

Uważam, że przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione, właściwy dobór metod technologicznych i pomiarowych oraz wnioski wynikające z wykonanej pracy pozwalają stwierdzić, że postawione Autorowi zadanie zostało rozwiązane poprawnie, a cel rozprawy osiągnięty.

### **Osiągnięcia pracy**

Analizując zakres pracy należy stwierdzić, że została ona zaplanowana w celu osiągnięcia konkretnych zastosowań fotonicznych. Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

- wytworzenie dwóch struktur włóknowych będących połączeniem szkieł: borokrzemianowego NC-21A z ołowiowymi F2 i SF6 (rys. 47 i 48) pozwalających na generację supercontinuum;
- dopasowanie współczynników załamania światła szkieł NC-21A i NC-34, pozwalających na realizację metodą „stack and draw” struktur gradientowych o rozmiarach dopasowanych do wielkości rdzenia;
- uzyskanie zgodności parametrów technologicznych i znacznej różnicy współczynników refrakcji ( $0,376 @ \lambda = 1550\text{nm}$ ) pomiędzy szkłem borokrzemianowym (UV-710), a galowo-bismutowo-ołowiowo-krzemianowym;
- opracowanie dopasowanych termicznie i optycznie (tab. 22) szkieł SPB-N12 - PBG81 w zakresie  $2,8\text{--}4,5\mu\text{m}$  (50% transmisji  $@4,5\mu\text{m}$ ) o zmniejszonej absorpcji jonów  $\text{OH}^-$  w zakresie  $2,8\text{--}3,5\mu\text{m}$ ;
- analiza porównawcza nieliniowego współczynnika załamania światła 15 różnych szkieł, wraz z dyskusją zaobserwowanych zmian i doniesień literaturowych;
- wytworzenie i scharakteryzowanie ponad 60 składów szkieł (nie licząc syntez), w tym wykonanie trójkąta Gibbsa, wraz z pogłębioną dyskusją wyników i logicznie wyjaśnionymi kierunkami wprowadzanych zmian;
- pierwsze próby w Polsce związane z wytwarzaniem soczewek ze szkieł o transmisji w zakresie środkowej podczerwieni.

### ***Uwagi wynikające z lektury rozprawy***

Oceniając rozprawę doktorską mgra Jarosława Cimka stwierdzam, że nie posiada ona błędów merytorycznych i została zrealizowana poprawnie. Do nielicznych uwag zaliczam:

1. Proszę wyjaśnić co Pan rozumie pisząc na stronie 69 „Taki schemat jest charakterystyczny dla powolnego tworzenia się kryształów...”, w szczególności odnośnie kwestii powolnej krystalizacji.
2. Na rys. 37 znajdują się efekty egzotermiczne zlokalizowane ok.  $490\text{ C}$  (SPB-63) i ok.  $660\text{ C}$  (SPB-54) – wyjaśnienie wydaje się potrzebne szczególnie w kwestii wygrzewania przy lepkości  $6\text{ dPas}$ ,
3. Tabela 8 na jakiej podstawie określono parametr „podatność na krystalizację”?
4. Pomiar niewielkich zmian składów szkieł nie jest łatwy – pogłębiona analiza możliwa jest poprzez wykonanie komplementarnych badań (XRF, SEM/EDS, FTIR, Raman)- sugestia.

5. Różnica współczynników refrakcji szkieł SPB-N12 - PBG81 jest stosunkowo duża (0,086 @ $\lambda = 1550\text{nm}$ , ok.  $NA=0,5$ ), czy sama modyfikacja składu PBG81 lub SPB-N12 nie byłaby wystarczająca do uzyskania pary szkła o małej różnicy współczynnika refrakcji?
6. porównanie krzywych DSC dla szkieł PBG81 i SPB-N12 byłoby interesujące, pomimo braku zaobserwowanej tendencji do krystalizacji w trakcie wygrzewania (4h) w temp. 630C.
7. Autor opisując obrazy polaryzacyjne testu połączenia szkieł typu „sandwich” używa ogólnych stwierdzeń typu „różnica kolorów jest niewielka”, o ile jest to dosyć przyjęta konwencja dobrze by było zamieścić obraz porównawczy połączenia testowego.
8. Drobne uchybienia gramatyczne – głównie wynikające prawdopodobnie z korekty procesora tekstu.

Uwagi te podnoszę z racji obowiązku recenzenta, w tym także dla wskazania kierunków dalszych badań nad tematem podjętym w tej pracy. Nie wpływają one na wysoką wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej.

### **Konkluzja**

Reasumując stwierdzam, że Pan mgr Jarosław Cimek rozwiązał postawiony w pracy problem naukowo-badawczy wymagający zarówno szerokiego zasobu wiedzy teoretycznej związanej z fotoniką oraz umiejętności technologicznych w zakresie technologii szkieł i struktur falowodowych, a także ich metrologii.

Dopełnieniem wizerunku jest Jego dorobek naukowy, składający się z 13 współautorskich publikacji zarejestrowanych w bazie Web of Science (WoS), w tym 10 z listy JCR (Journal Citation Reports). Jego dane bibliometryczne to 30 cytowań artykułów dotyczących rozprawy doktorskiej (bez autocytowań) i indeks Hirscha wynoszący 5 (WoS, 5.01.2018).

**Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgra Jarosława Cimka pozwalają mi stwierdzić, że zgodnie z „Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki”, z dnia 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami, spełnia ona wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Ponadto, na podstawie wskazanych w recenzji osiągnięć oraz dorobku naukowego, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

Kraków, 06.01.2018r.

*Dominik Dorosz*