

Prof. nzw. dr hab. Agata Kamińska

Warszawa, 9.XI. 2016 r.

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46

02-668 Warszawa

&

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych

Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego

ul. Dewajtis 5

01-815 Warszawa

e-mail: kaminska@ifpan.edu.pl

R E C E N Z J A

Pracy doktorskiej **mgr inż. Jana Kopaczka**

p.t. „*Właściwości optyczne struktur półprzewodnikowych grupy III-V rozrzedzanych bizmutem*”

wykonana na zlecenie Rady Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki
Wrocławskiej

1. Charakterystyka rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Jana Kopaczka została wykonana w Katedrze Fizyki Doświadczalnej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej pod opieką promotora prof. dr. hab. Roberta Kudrawca. Rozprawa dotyczy badań własności optycznych materiałów półprzewodnikowych emitujących w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Jako wiodącą technikę badawczą Doktorant zastosował bezkontaktowe elektroodbicie oraz fotoodbicie w połączeniu z pomiarami fotoluminescencji oraz fotoluminescencji czasowo – rozdzielonej z użyciem kamery smugowej. Zastosowanie tych zaawansowanych metod badawczych umożliwiło uzyskanie informacji o strukturze energetycznej i naturze przejść radiacyjnych występujących w badanych materiałach niedostępnych lub trudno dostępnych przy pomocy innych metod.

Tematyka podjęta w rozprawie jest bardzo aktualna, gdyż dotyczy poznania podstawowych parametrów struktury pasmowej oraz zrozumienia procesów rekombinacji promienistej w nowych, bardzo obiecujących, a wciąż stosunkowo słabo przebadanych materiałach: związkach

półprzewodnikowych grupy III-V rozrzedzanych bizmutem, należących do rodziny tzw. związków mocno niedopasowanych (*highly mismatched alloys* - HMAs), w których podstawieniowa domieszka izowalencyjna (w tym przypadku Bi^{3-}) ma promień jonowy i elektroujemność znacznie różniące się od odpowiednich parametrów podstawianego jonu (w rozprawie są to jony As^{3-} , Sb^{3-} oraz P^{3-}). Ich bardzo korzystną własnością jest indukowane domieszką bizmutu zmniejszenie przerwy energetycznej przy równoczesnym zwiększaniu rozszczepienia spin-orbita, co prowadzi do redukcji procesów rekombinacji Augera obniżających wydajność kwantową urządzeń świecących i podwyższających wartości prądu progowego laserów operujących w zakresie podczerwieni. Mogą one zatem być wykorzystane w konstrukcji wydajnych urządzeń optoelektronicznych świecących w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, pełniących ważną rolę w telekomunikacji (przesyłanie informacji w światłowodach), bateriach słonecznych oraz specjalistycznych źródłach i detektorach fal elektromagnetycznych.

Zarówno ciekawe własności fizyczne, jak i potencjalne zastosowania związków półprzewodnikowych grupy III-V rozrzedzanych bizmutem stymulują od kilkunastu lat coraz intensywniejsze prace badawcze. O tym, że jest to bardzo młoda, ale bardzo szybko rozwijająca się dziedzina, świadczy fakt, że pierwsze prace na ten temat zaczęły ukazywać się pod koniec lat 90-tych XX wieku i do roku 2006 ukazywało się rocznie nie więcej niż 10 artykułów poświęconych tej tematyce, które były cytowane poniżej 100 razy w roku, natomiast w samym roku 2015 ukazało się 28 artykułów, a liczba cytowań zwiększyła się do ok. 580 razy (dane z bazy Web of Science z kryterium wyszukiwania „Bi + III-V”).

Rozprawa liczy 123 strony i jest podzielona na dwie części oraz 6 rozdziałów, z których dwa pierwsze, stanowiące część pierwszą, zawierają wprowadzenie i opisy stosowanych metod badawczych, trzy kolejne wchodzące w skład części drugiej poświęcone są omówieniu i analizie uzyskanych wyników, a ostatni rozdział stanowi podsumowanie. Zakończona jest bogatym spisem danych bibliograficznych (112 pozycji, w tym 3 współautorstwa Doktoranta – poz. [46], [70] i [98]) oraz wykazem dorobku naukowego (9 publikacji współautorstwa Doktoranta bezpośrednio związanych z rozprawą, 6 pozostałych publikacji, 3 wystąpienia konferencyjne i 2 plakaty).

W rozdziale 1 mgr inż. Jan Kopaczek podał uzasadnienie wyboru tematyki i cel naukowy pracy, a także zwięźle opisał postawione sobie zadania. Dalsza część pierwszego rozdziału poświęcona jest obszernemu, interesującemu przeglądowi aktualnej literatury naukowej

dotyczącej badań doświadczalnych półprzewodników III-V i związków mieszanych mocno niedopasowanych oraz modeli teoretycznych stosowanych do ich analizy. Następnie Doktorant opisał metody wzrostu struktur półprzewodnikowych. Ten podrozdział, choć w porównaniu z innymi niezbyt długi, uważam jednak za trochę zbyt rozbudowany: Autor opisuje kilka metod wzrostu, po czym informuje, że w jego pracy wszystkie badane materiały wytworzono metodą MBE (*molecular beam epitaxy*). Ponieważ rozprawa dotyczy badań własności optycznych, a nie metod wzrostu, uważam, że wystarczyłoby zwięzłe opisanie samej metody MBE z ewentualnym uwydatnieniem cech różniących ją od innych metod. Podobnie nieco zbyt drobiazgowy wydaje mi się opis metod charakteryzacji strukturalnej, a zwłaszcza XRD (*X-ray diffraction*), których Doktorant sam nie wykonywał, a jedynie powoływał się na wyniki uzyskane w innych laboratoriach.

Rozdział 2 rozprawy, stanowiący ostatnią część wstępu, poświęcony jest opisowi optycznych metod charakteryzacji. W tym ważnym skądinąd rozdziale zbyt rozbudowany wydaje mi się podrozdział dotyczący absorpcji, a zwłaszcza techniki spektroskopii fourierowskiej. Absorpcja obok luminescencji należy do podstawowych technik charakteryzacji własności optycznych materiałów, jednakże w Rozprawie własności te badane są głównie za pomocą komplementarnych i mających również absorpcyjny charakter technik bezkontaktowego elektroodbicia oraz fotoodbicia. Dlatego, podobnie jak w przypadku podrozdziału dotyczącego metod wzrostu struktur półprzewodnikowych, wystarczyłoby dużo bardziej zwięzły opis technik absorpcyjnych i informacji uzyskiwanych za ich pomocą. Za całkowicie uzasadniony i bardzo dobrze ujęty uważam natomiast szczegółowy opis wspomnianych technik bezkontaktowego elektroodbicia oraz fotoodbicia, a także syntetyczne przedstawienie techniki pomiarów fotoluminescencji i fotoluminescencji czasowo-rozdzielonej.

Rozdziały 3-6, to najważniejsza część pracy, gdyż zawierają wyniki własne Doktoranta i ich podsumowanie.

Rozdział 3 poświęcony jest określeniu wpływu obecności jonów bizmutu na strukturę pasmową związków półprzewodnikowych grupy III-V takich, jak:

- wielokrotne studnie kwantowe GaAsBi/GaAs (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 5 próbek ze studniami kwantowymi o grubości od 5,3 do 7,5 nm, o koncentracjach bizmutu od 2,1 do 5,9%),

- warstwy GaSbBi na podłożu GaSb (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 5 próbek z warstwami o grubości 330 nm, o koncentracjach bizmutu od 0,7 do 4,2%),
- warstwy InPBi na podłożu InP (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 4 próbek z warstwami o grubości 430 nm, o koncentracjach bizmutu od 1,6 do 3,4% wg wyników XRD).

Za szczególnie ciekawe w tej części pracy uważam wyniki badań eksperymentalnych wielokrotnych studni kwantowych GaAsBi/GaAs oraz ich analizę teoretyczną przedstawioną w rozdziale 3.1, gdzie korzystając z wyznaczonych za pomocą pomiarów fotoodbiccia energii przejść 11H i 22H i porównując je z wynikami obliczeń teoretycznych przeprowadzonych w funkcji Q_v (*valence band offset*) mgr inż. Jan Kopaczek wyznaczył wielkość Q_v równą około 55%. Oznacza to, że głębokość potencjału wiążącego w tego typu studniach jest wystarczająca dla redukcji ucieczki nośników na skutek ich termicznego wzbudzenia, co jest bardzo korzystną cechą dla uzyskania wydajnych źródeł fal elektromagnetycznych pracujących również w wyższych temperaturach. Uzyskany wynik jest tym bardziej cenny, że w strukturach opartych na antymonku galu, aktualnie stosowanych w laserach podczerwonych, uzyskanie długości fal emisji powyżej 3 μm jest niemożliwe ze względu na zmianę nieciągłości pasm i studni kwantowych z typu I na II. Możliwość wykorzystania domieszki bizmutu w takich strukturach wydaje się tu bardzo obiecująca.

Ponadto na podstawie uzyskanych wyników mgr inż. Jan Kopaczek wykazał, że podstawianie jonów bizmutu za inne jony z grupy V prowadzi do redukcji przerwy energetycznej oraz wzrostu rozszczepienia spin-orbita, którego wielkość w niektórych związkach może przekroczyć wielkość przerwy energetycznej (jak np. w GaSbBi przy wyższych koncentracjach bizmutu), prowadząc do redukcji procesów rekombinacji Augera szkodliwych z punktu widzenia ich potencjalnych aplikacji w emiterach podczerwieni. Za zachowanie to odpowiada zwiększanie energii krawędzi pasma walencyjnego, któremu towarzyszy zmniejszanie energii dna pasma przewodnictwa. Ponadto Doktorant wyznaczył wartości redukcji przerwy energetycznej na procent Bi wprowadzanego do fosforków, arsenków i antymonków indu i galu, a także zauważył, że wielkość, o jaką przerwa wzbroniona ulega zawężeniu na procent Bi zależna jest m.in. od różnicy wartości elektroujemności oraz promieni jonowych pomiędzy bizmutem a atomem, za który jest on podstawiany.

W rozdziale 4 mgr inż. Jan Kopaczek skupił się na określeniu wpływu temperatury na

właściwości optyczne badanych materiałów w celu określenia, w jaki sposób temperatura wpływa na podstawowe wielkości związane ze strukturą pasmową tj. przerwę energetyczną oraz rozszczepienie spin-orbita, a ponadto jaki jest wpływ zawartości bizmutu na poszerzenia obserwowanych przejść optycznych, których wielkość wiąże się z jakością rozważanych struktur.

Realizując wyznaczone sobie zadanie Autor przeprowadził badania zależności temperaturowych energii przejść oraz ich poszerzeń termicznych mierzonych w widmach fotoodbicia dla następujących materiałów:

- warstw GaSbBi na podłożu GaSb (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 4 próbek z warstwami o koncentracjach bizmutu od 0 do 4,2%),
- warstwy GaInSbBi na podłożu GaSb z warstwą buforową GaInSb (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 3 próbek o koncentracjach indu od 1,1 do 5,5% i bizmutu od 2,5 do 1,3%),
- warstwy GaAlSbBi na podłożu GaSb z warstwą buforową GaAlSb (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 2 próbek o koncentracjach aluminium 1,6 i 6,6% i bizmutu 2,0 i 1,4%),
- warstwy $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{AsBi}$ na podłożu InP z warstwą buforową $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 5 próbek o koncentracjach bizmutu od 1,2 do 4,4%),

Badania te wykazały, że dodanie bizmutu powoduje zmniejszenie czułości przerwy energetycznej na temperaturę w zakresie od 15 do 295K, a wielkość temperaturowej redukcji energii jest mniejsza dla przejść E_0 niż dla przejść $E_0 + \Delta_{SO}$. Zauważono również, że większa różnica elektroujemności i wielkości promieni jonowych pomiędzy bizmutem a jonem, za który jest on podstawiany, powoduje większe niejednorodności składu, co objawia się poszerzeniem przejść optycznych (np. szerokość przejść, a zatem i niejednorodności składu w związkach, w których jony bizmutu podstawiane są za jony antymonu jest znacząco mniejsza niż w związkach, w których wprowadza się jony bizmutu za jony arsenu). Ponadto zaobserwowano, że temperatura ma mniejszy wpływ na wzrost poszerzeń przejść optycznych niż efekty związane z niejednorodnościami zawartości.

W rozdziale 5 Doktorant przedstawił wyniki badań właściwości emisyjnych oraz efektów lokalizacji nośników, ocenianych na podstawie temperaturowej zależności położenia piku fotoluminescencji. Jak wiadomo, zależność ta układająca się w kształt litery S (tzw. *S-shape*) świadczy o obecności nośników zlokalizowanych na centrach pułapkowych w pobliżu minimum

pasma przewodnictwa. Podobny efekt został zaobserwowany również w związkach rozrzedzanych bizmutem z tym, że w tym przypadku centra pułapkowe zlokalizowane są w sąsiedztwie maksimum pasma walencyjnego, w związku z tym w momencie, w którym zachodzi termiczna aktywacja spułapkowanych nośników, mogą być widoczne dwa piki w widmie fotoluminescencji.

Obecność nośników zlokalizowanych wpływa również znacząco na dynamikę fotoluminescencji powodując, że czasy zaniku mierzone po stronie mniejszych energii są dłuższe niż czasy zaniku mierzone po stronie większych energii, a więc tam, gdzie większy wkład do emisji dają przejścia pomiędzy nośnikami zdelokalizowanymi.

W celu zbadania powyższych efektów Doktorant przeprowadził pomiary fotoluminescencji w funkcji zawartości bizmutu, temperatury i mocy pobudzania dla następujących struktur:

- warstw GaSbBi na podłożu GaSb (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 6 próbek z warstwami o grubości 330 nm, o koncentracjach bizmutu od 0,7 do 4,2%),
- wielokrotnych studni kwantowych GaAsBi/GaAs (przebadano i przeanalizowano wyniki dla 5 próbek ze studniami kwantowymi o grubości od 5,3 do 7,5 nm, o koncentracjach bizmutu od 2,1 do 5,9%); na tych strukturach przeprowadzono również pomiary czasowo-rozdzielone.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów w warstwach GaSbBi zidentyfikowano dwa przejścia promieniste:

- niskoenergetyczne (oznaczone jako LE), obserwowane w niższych temperaturach i zachodzące z udziałem pasma przewodnictwa oraz akceptorowych stanów defektowych,
- wysokoenergetyczne przejście o charakterze pasmo-pasmo (oznaczone jako HE), obserwowane w wyższych temperaturach.

Analiza intensywności obydwu pików emisyjnych umożliwiła wyznaczenie energii aktywacji procesu termicznego wygaszania emisji LE w warstwach GaSbBi, która wiąże się z energią aktywacji stanów akceptorowych. Zaobserwowano zmniejszanie się tej energii ze wzrostem koncentracji bizmutu, co powiązano z przesuwaniem się krawędzi pasma walencyjnego w kierunku poziomego akceptorowego, którego położenie nie ulega znacznym zmianom przy zwiększaniu zawartości Bi.

Porównanie wyników pomiarów temperaturowych zależności widm fotoodbicia i fotoluminescencji przeprowadzonych na serii studni kwantowych GaAsBi/GaAs umożliwiły określenie charakteru emisji, która podobnie jak w przypadku warstw GaSbBi w niskiej

temperaturze jest wynikiem rekombinacji z udziałem pasma przewodnictwa oraz defektowych stanów akceptorowych, natomiast w wysokiej temperaturze wiąże się z przejściem promienistym 11H. Zaobserwowano silny efekt lokalizacji w temperaturach poniżej 150K, co potwierdziły również pomiary fotoluminescencji oraz fotoluminescencji czasowo-rozdzielonej w funkcji mocy i temperatury.

Krótkie podsumowanie zawarte w rozdziale 6 zamyka część Rozprawy poświęconą analizie wyników pomiarowych. Ogromny materiał doświadczalny zgromadzony w trakcie realizacji pracy doktorskiej jest imponujący, a jego wnikliwa analiza pozwoliła na uzyskanie nowych cennych informacji o tak obiecujących materiałach, jakimi są struktury półprzewodników grupy III-V rozrzedzanych bizmutem. Do pełnego kompletu uzyskanych informacji brakuje mi jedynie choćby komentarza dotyczącego wartości przesunięcia Stokesa, czyli różnic w położeniu energetycznym krawędzi absorpcji (wyznaczanej w tym przypadku za pomocą technik bezkontaktowego elektroodbicia lub fotoodbicia) i maksimum luminescencji. Wartość przesunięcia Stokes'a jest uznaną miarą stopnia lokalizacji w stopach półprzewodnikowych i analiza jej temperaturowej zależności stanowiłaby w mojej opinii dobre dopełnienie opisu badanych materiałów.

Rozprawę kończy krótkie podsumowanie, w którym mgr inż. Jan Kopaczek wyszczególnił publikacje swojego autorstwa i współautorstwa, związane z przedstawionymi wynikami. W kontekście tego wykazu oraz załączonej Bibliografii dziwi mnie, dlaczego Doktorant odwołuje się w tekście tylko do trzech z dziewięciu publikacji (Ref. 46, 70 i 98), których tematyka bezpośrednio wiąże się z Rozprawą.

2. Ocena rozprawy

Zgromadzony i zanalizowany materiał doświadczalny zaprezentowany w niniejszej Rozprawie uważam za bardzo cenny i ważny zarówno z poznawczego punktu widzenia, jak i ze względu na potencjalne aplikacje badanych materiałów. Szczególnie interesujące wydają mi się ilościowe wnioski dotyczące wpływu domieszki bizmutu na zmniejszenie przerw energetycznych badanych materiałów przy jednoczesnym zwiększaniu rozszczepienia spin-orbita, co umożliwia kontrolowanie procesów rekombinacji Augera, zmniejszających efektywność rekombinacji promienistej. Ważnym i obiecującym wynikiem jest również wyznaczenie i możliwość uzyskania odpowiednich głębokości potencjału wiążącego w studniach kwantowych na bazie badanych

związków, którego wielkość jest istotnym parametrem z punktu widzenia potencjalnych zastosowań tego układu materiałowego w laserach i innych wydajnych źródłach promieniowania w zakresie bliskiej oraz średniej podczerwieni. Za jedyną wadę merytoryczną Rozprawy uważam wspomniany brak dyskusji dotyczącej przesunięć Stokesa. Nie zmienia to jednak mojej ogólnie bardzo wysokiej oceny jej wartości merytorycznej.

3. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa jest logiczna i przemyślana. Praca została wykonana bardzo rzetelnie, jest kompletna, zawiera nowe, interesujące i szerokie badania eksperymentalne oraz szczegółową analizę teoretyczną uzyskanych wyników. Wyniki przedstawione w Rozprawie zostały opublikowane w dziewięciu publikacjach. W pięciu z nich mgr inż. Jan Kopaczek jest pierwszym autorem. Na całkowity jego dorobek składa się w sumie 15 publikacji; w sześciu z nich Doktorant jest pierwszym autorem. Wszystkie te publikacje znajdują się w bazie Web of Science. Według danych z tej bazy z dn. 3.XI.2016 r. liczba cytowań tych publikacji była równa 93 (62 bez samocytowań), a indeks Hirscha opublikowanych prac = 7, co bardzo dobrze świadczy o wartości dorobku mgr inż. Jana Kopaczka.

4. Uwagi szczegółowe i uwagi o charakterze redakcyjnym

Rozprawa została napisana w sposób zrozumiały i czytelny, kolejność rozdziałów jest przemyślana i logiczna, jakkolwiek mam drobną uwagę związaną z układem podrozdziałów. Ponieważ własności warstw GaSbBi analizowane są we wszystkich rozdziałach dotyczących uzyskanych wyników, dobrze byłoby, gdyby we wszystkich z nich stanowiły ten sam, np. pierwszy podrozdział, a tymczasem są one opisane w podrozdziałach 3.2, 4.1 oraz 5.1. Podobnie wygląda sytuacja wielokrotnych studni kwantowych GaAsBi/GaAs, które są analizowane w podrozdziałach 3.1 oraz 5.2. Uporządkowanie kolejności przedstawiania wyników wpłynęłoby moim zdaniem pozytywnie na klarowność i łatwość poruszania się w treści Rozprawy.

Mam również zastrzeżenia do edytorskiej strony rozprawy. Jakkolwiek nie wpływają one na jej wartość merytoryczną, jednak utrudniają jej czytanie i nadążanie za prezentowanymi wynikami. Poniżej przedstawiam kilka z nich:

1) Cytowanie rysunków bardzo często umieszczone jest w tekście bez związku z tokiem zdania,

zaburzając w ten sposób sens zdania, jak np. na str. 16: „pasma spin-orbita przesuwa się w mniejszym stopniu rys. 5(b)”. W znakomitej większości przypadków wystarczyłoby wzięcie w nawias takiego odwołania do rysunku, żeby treść stała się bardziej logiczna i zrozumiała.

- 2) Str. 10-11: Doktorant wprowadza w tekście stop $AB_{1-x}C_x$ jako kombinację czystych związków AB oraz AC, co sugeruje, że A oznacza kation, a B i C to aniony. Natomiast we wzorach (3)-(6) używa oznaczeń AC i BC, co sugeruje, że A i B oznaczają kationy, a C to anion. Należałoby odpowiednio uzgodnić te oznaczenia.
- 3) Rozprawa zawiera sporo literówek, błędów gramatycznych lub edytorskich, jak np.:
 - str.10, lin. 14 od góry: zamiast „widzenie” powinno być „widzenia”,
 - str. 12, lin. 3 od góry: zamiast „rozrzedzanymi” powinno być „rozrzedzanych”,
 - na str.9 lin. 2 od dołu: najpierw powinien być cytowany wzór (1), potem (2), a nie odwrotnie, a na str.18, lin. 6 i 3 od dołu: najpierw powinien być cytowany rys. 9, potem 10, a nie odwrotnie,
 - str.14, lin. 2 od góry: macierz Hamiltona ma numer (9), nie (10),
 - str. 40, lin. 4 od góry, str. 68, opis do rys. 3.2.5 i str. 74, lin. 12 od góry: zamiast „Brilluina” powinno być „Brillouina”,
 - str. 7, 16, 49, 76: zamiast „odszczępienie spin-orbita” powinno być „rozszczępienie spin-orbita”,
 - str. 57, lin. 4 od góry: brakuje opisywanego rys.3.1.6, który powimiał przedstawiać wpływ szerokości studni kwantowej na dokładność wyznaczenia Q_V ,
 - niektóre akronimy rozwijane są po kilka razy (np. HMA), natomiast inne wcale, (np. CHSH, BEPR),
 - IVBA to „inter-valence band absorption”, a nie „intern-valence band absortion”.

Te drobne uchybienia i poczynione uwagi nie umniejszają wartości poznawczej całej Rozprawy, którą oceniam wysoko. Uważam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Jana Kopaczka** p.t. **„Właściwości optyczne struktur półprzewodnikowych grupy III-V rozrzedzanych bizmutem”** prezentuje bardzo dobry poziom naukowy i jest oryginalnym oraz cennym osiągnięciem naukowym Doktoranta.

5. Wniosek końcowy

W konkluzji stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr inż. Jana Kopaczka** p.t. **„Właściwości optyczne struktur półprzewodnikowych grupy III-V rozrzedzanych bizmutem”** spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Tekst jednolity Dz. U. nr 0 z 2014, poz. 1852). i mgr inż. Jan Kopaczek powinien zostać dopuszczony do dalszych etapów przewodu doktorskiego. **Biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych badań, ich aktualność potwierdzoną wartościowymi publikacjami i wysoki poziom merytoryczny Rozprawy wnioskuję o jej wyróżnienie.**

Agata Kamińska

Prof. nzw. dr hab. Agata Kamińska