

Prof. dr hab. Radosław Przeniosło
Instytut Fizyki Doświadczalnej,
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Recenzja osiągnięcia naukowego

**pt. „Własności termostrukturalne wybranych półprzewodników i tlenków funkcjonalnych”
dr. Romana Minikayeva oraz o jego działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej**

Autor opisuje badania struktury krystalicznej wybranych trzech grup związków: (i) półprzewodników z rodziny $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, (ii) półprzewodnika $\alpha\text{-MnTe}$ oraz (iii) boranów z rodziny $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$, gdzie ($\text{M}=\text{Al}, \text{Ga}$) ($\text{R}=\text{Y}, \text{Eu}, \text{Tm}$). Związki te cieszą się uznaniem i zainteresowaniem w środowisku badaczy półprzewodników, ich badania stanowią istotną część historii Instytutu Fizyki PAN. Znaczne zainteresowanie tymi materiałami stanowiło motywację do poszukiwania informacji o ich strukturze krystalicznej. Wybrany temat badawczy jest ważny i stanowi ambitne wyzwanie.

Prace będące podstawą recenzowanego osiągnięcia naukowego są poświęcone wyznaczaniu parametrów struktury krystalicznej badanych materiałów w wysokich temperaturach, tj. między 300K a 1100K [H2-H7]. Wyjątek stanowi praca [H1] która przedstawia badania w niskich temperaturach, w zakresie 15K – 300K a także w temperaturze pokojowej w funkcji zewnętrznego ciśnienia 0.1MPa – 4.5GPa. Badania proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej przeprowadzono przy użyciu laboratoryjnego dyfraktometru X’Pert Pro Alpha1, MPD, Panalytical. Badania te były wykonywane w zakresie wysokich temperatur z użyciem kamery High Temperature Oven Chamber firmy Anton Paar [H1-H7]. Rozwinięta w IFPAN baza laboratoryjna z możliwością pomiarów dyfrakcji rentgenowskiej w szerokim zakresie temperatur jest narzędziem badawczym o bardzo dobrych osiągnięciach. Zdaję sobie sprawę, że w obecnej recenzji oceniane jest osiągnięcie naukowe, ale chciałbym podkreślić znaczący wkład dr. Romana Minikayeva w rozwijanie tej bazy laboratoryjnej oraz w pracę nad optymalizacją warunków pracy i ulepszanie precyzji aparaturowej. Wybrane badania, przedstawione w pracach [H1-H3] były wykonane z użyciem promieniowania synchrotronowego przy pomocy linii dyfrakcyjnej B2 przy źródle w ośrodku Hasylab/Desy w Hamburgu. W przypadku badań przeprowadzonych z użyciem promieniowania synchrotronowego należy podkreślić, że nie jest łatwo uzyskać dostęp do dużych infrastruktur badawczych, takich jak np. laboratorium Hasylab/Desy. Wysoko oceniam starania dra Romana Minikayeva, których efektem było uzyskanie dostępu do linii dyfrakcyjnej oraz przeprowadzenie pomiarów. Zaprezentowane wyniki, tj. parametry strukturalne związków

półprzewodnikowych (PbTe oraz $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$), możliwego altermagnetyka ($\alpha\text{-MnTe}$) a także tlenków funkcjonalnych z rodziny $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$, gdzie ($\text{M}=\text{Al}, \text{Ga}$) ($\text{R}=\text{Y}, \text{Eu}, \text{Tm}$) stanowią istotny wkład do wiedzy o tych materiałach. Moja ogólna ocena przedstawionego osiągnięcia naukowego jest zdecydowanie pozytywna, a szczegółowe uzasadnienie oraz pytania i wątpliwości są omówione w następnych akapitach.

Półprzewodniki z rodziny PbTe oraz $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

W badaniach związków $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [H1] przeprowadzono badania dyfrakcyjne i wyznaczono zależność parametrów strukturalnych od temperatury i ciśnienia. Przedstawiono także modelowy opis własności badanych materiałów w oparciu o równanie stanu Birch-Murhaghana drugiego rzędu. W oparciu o wyznaczone eksperymentalnie zależności $V(T)$, $V(p)$ a także tzw. atomowych parametrów przemieszczenia $\langle u^2(T) \rangle$ (ang. atomic displacement parameters) obliczona została temperatura Debye-a. Kilka różnych metod obliczania temperatury Debye-a pokazało znakomitą zgodność. W pracy [H1] wyznaczono także temperaturową zależność parametru Gruneisena uzyskując zadowalającą zgodność z wynikami obliczeń metodą DFT oraz z wynikami uzyskanymi z pomiarów dla ultradźwięków. Tę część rozprawy oceniam bardzo wysoko – ponieważ zawiera zaawansowany modelowy opis własności badanego materiału.

Dalsze badania z prac [H2-H7] były prowadzone w wysokich temperaturach od 300K do 1100K, a w niektórych przypadkach nawet do 1200K. Nasuwa się z związku z tym ogólne pytanie: *czy w prowadzonych pomiarach dyfrakcyjnych widać było efekty wzrostu kryształów i/lub efekty redukcji mikroodkształceń (ang. micro-strains) wywołanych przez wygrzewanie?* W pracach [H2-H7] brakuje informacji o szerokościach linii dyfrakcyjnych.

W pracy [H2] opisano badania dyfrakcyjne związków $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ w wysokich temperaturach. Dla związków o składzie ($x=0$ oraz $x=0.013$) obserwowano liniową zależność stałej sieci (układ regularny) $a(T)$ ze stałym współczynnikiem rozszerzalności termicznej w zakresie 300K – 1100K. Tymczasem związek o składzie ($x=0.056$) ma mocno nieliniowy przebieg $a(T)$, co pokazano na rys. 2 w pracy [H2]. Autorzy [H2] stwierdzili, że w zakresie 500K-700K materiał znacząco zmniejsza swój parametr stechiometryczny osiągając około $x=0.01$. Tego rodzaju rozkład materiału wydaje się możliwy i stanowi rozsądną interpretację wyników – ale co mocno zaskakujące w wyższych temperaturach 900K-1100K – próba odzyskuje skład ok. $x=0.05$. Tego typu odwracalna przemiana jest mocno nietypowa, pojawia się więc kilka pytań: *czy w zakresie między 500K a 1100K obserwowano zmiany szerokości linii dyfrakcyjnych? Czy wyniki te udało się powtórzyć na próbkach o podobnym, lub nieco innym składzie?*

Półprzewodnik i możliwy altermagnetyk $\alpha\text{-MnTe}$

W pracy [H3] opisano badania struktury krystalicznej półprzewodnika $\alpha\text{-MnTe}$ w zakresie temperatur 300K – 1200K. Badania przeprowadzono przy użyciu linii dyfrakcyjnej B2 w

ośrodka Hasylab/Desy w Hamburgu. W pracy [H3] pokazano, że struktura krystaliczna α -MnTe jest opisana przy pomocy heksagonalnej grupy przestrzennej $P6_3/mmc$ (no. 194). Pokazano, że zależność stałych sieci od temperatury: $a(T)$ oraz $c(T)$ jest liniowa. W temperaturach powyżej 500K wytrąciła się nowa faza o składzie $MnTe_2$. Zawartość tej fazy utrzymywała się na stałym poziomie ok. 9%, a powyżej 1000K faza ta zniknęła. Wyniki pracy [H3] są interesujące i mogą pełnić ważną rolę jako punkt odniesienia do opisu własności tego materiału. Prace innych Autorów dotyczące α -MnTe nie obejmowały tak szerokiego zakresu temperatur. Praca [H3] została opublikowana w 2015, tj. na kilka lat przed pierwszymi doniesieniami o zjawisku altermagnetyzmu, a w ostatnich kilku latach pojawiło się wiele doniesień o własnościach altermagnetycznych α -MnTe. Z tego powodu, wyniki pracy [H3] mogłyby zostać ponownie przeanalizowane pod kątem nowych obserwacji. Nie oznacza to w żadnym stopniu negatywnej oceny pracy [H3], ale w kontekście dynamicznie rozwijającej się dziedziny badań, chciałbym zwrócić uwagę na pojawiające się nowe pytania. Badania dyfrakcji neutronów, zacytowane jako [12] w pracy [H3] oraz badania z pracy [N. Kunitomi, Y. Hamaguchi, S. Anzai, J. Phys. (France) 25, 568-574 (1964).] zgodnie stwierdzają, że uporządkowanie magnetyczne α -MnTe ma charakter antyferromagnetyczny z momentami magnetycznymi jonów Mn leżącymi w płaszczyźnie prostopadłej do heksagonalnej osi [001]. Z ogólnych własności heksagonalnych grup przestrzennych opartych o grupę punktową $6/mmm$ wynika, że jedyne dozwolone uporządkowania mogą mieć tylko składowe momentów magnetycznych wzdłuż osi [001]. Co więcej, niedawne badania [S.W. Lovesey, D.D. Khalyavin and G. van der Laan, Phys. Rev. B 108, 174437 (2023)] rozważają dla α -MnTe odejście od symetrii heksagonalnej na rzecz rombowej $Cm'c'm$, $Cmcm$ lub jednoskośnej $C2'/m'$; $P2_1/m$. Tak więc pojawia się istotne pytanie: *czy w obrazach dyfrakcyjnych związku α -MnTe nie pojawiają się poszerzenia linii dyfrakcyjnych które mogłyby świadczyć o odstępstwie od symetrii heksagonalnej?*

Borany z rodziny $RM_3(BO_3)_4$, gdzie (M=Al, Ga oraz R=Y, Eu, Tm)

W pracach [H4-H7] Autor przedstawił wyniki badań boranów z rodziny $RM_3(BO_3)_4$. Prace te zostały wykonane we współpracy z zespołami z Instytutu Fizyki Czeskiej Akademii nauk w Pradze, Politechniki w Kijowie oraz Instytutu Galkina w Doniecku. Borany z tej rodziny krystalizują w strukturze huntytu, która jest opisana przy pomocy trygonalnej grupy przestrzennej $R32$. Dr Roman Minikayev wykonał pomiary dyfrakcyjne dla wielu składów boranów z w/w rodziny w zakresie wysokich temperatur 300K – 1100K [H4-H7]. Wyniki te wnoszą istotny wkład do poznania własności strukturalnych, magnetycznych i optycznych tej rodziny materiałów. Warto dodać, że badane próbki były domieszkowane niewielkimi zawartościami jonów Cr^{3+} , Co^{3+} , Tb^{3+} , Er^{3+} (od 0.1% do 0.2%) aby umożliwić pomiary EPR. Tak niewielkie domieszkowanie nie wpływało istotnie na parametry strukturalne, ale umożliwiało dalsze badanie przez współautorów prac [H4-H7] z instytucji zagranicznych z Pragi, Doniecka i Kijowa współpracujących z dr Romanem Minikayevem. Prace [H4-H7] oceniam dobrze – są wykonane zgodnie z zasadami metodologii i dostarczają istotnych nowych informacji strukturalnych. Najbardziej imponującym i jakże zwięzłym wynikiem jest

pokazanie, że współczynnik termicznej rozszerzalności objętościowej jest taki sam dla wszystkich zbadanych boranów, co pokazano na rys. 15 w Autoreferacie.

Ocena dorobku naukowego (poza osiągnięciem przedstawionym do oceny)

Dr Roman Minikayev prowadził od ok. 20 lat intensywną działalność badawczą. Brał udział w badaniach struktury wielu bardzo różnorodnych materiałów, m. in. półprzewodników, nadprzewodników, stopów, związków międzymetalicznych. Jego prace badawcze oceniam zdecydowanie pozytywnie. Badania wykonywał w oparciu o własne laboratorium rentgenowskie w IF PAN. Uzyskiwał też dostęp do dużych instalacji badawczych jak np. Hasylab, MaxIII, ALBA czy ESRF. Dr Roman Minikayev jest więc bardzo doświadczonym badaczem, współautorem 161 prac (wg bazy Web-of-Science), z których pewna część została opublikowana w renomowanych czasopismach, m.in. Phys Rev. B, Appl. Phys. Lett., J. Phys. Chem C, RSC Advances czy Scientific Reports. Prace te były cytowane 1656 razy (bez autocytowań), co daje średnią 10.3 (obcych) cytowań na pracę. Indeks Hirscha wynosi $H=23$, co jest bardzo dobrym parametrem dla kandydatów do habilitacji w dziedzinie fizyki.

Ocena działalności dydaktycznej i organizacyjnej

Jako pracownik IF PAN dr Roman Minikayev miał ograniczone możliwości prowadzenia pracy dydaktycznej i opieki nad studentami. Mimo to był opiekunem pomocniczym pracy doktorskiej Houri S. Rahimi Mosafer która została obroniona w grudniu 2023 (promotorem był prof. Wojciech Paszkowicz). Brał też udział w opiece nad praktykantami – studentami z Politechniki Warszawskiej oraz nad uczniami liceum - stypendystami Funduszu na rzecz Dzieci. Podczas pobytu na stażu post-doc ośrodka Elettra w Trieście dr Roman Minikayev rozbudowywał warsztat badawczy tamtejszego laboratorium rentgenowskiego. We współpracy z badaczami z ośrodka Elettra w Trieście prowadził też projekt badawczy pt. „In situ high temperature microstructure evolution of (Ga,Mn)As”. Koordynował też wymianę naukowców z Uniwersytetem Tareasa Szewczenki w Kijowie w ramach grantu NAWA. Działalność dydaktyczną i organizacyjną dr Romana Minikayeva oceniam pozytywnie.

Podsumowanie

Po zapoznaniu się z opisem osiągnięcia naukowego oraz całościowego dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego stwierdzam, że dr Roman Minikayev ukazuje się jako dojrzały i ukształtowany badacz. Wykazał się motywacją, konsekwencją i intuicją fizyczną, dzięki którym osiągnął istotne wyniki. W mojej ocenie kandydat spełnia ustawowe i zwyczajowe kryteria wymagane przy habilitacji. Wnoszę o dopuszczenie dr. Romana Minikayeva do dalszych etapów procedury habilitacyjnej.



Radosław Przeniosło