

Dr hab. Katarzyna Małgorzata Rećko, prof. UWB
Katedra Fizyki Materii Skondensowanej

Białystok, dn. 18.11.2024 r.

Recenzja pracy doktorskiej p. mgr Rafała Kuny pt.:

„Dynamika sieci kryształów (Pb, Cd)Te i PbSe”

Praca o wyżej wymienionym tytule, finalizująca Studium Doktoranckie, została wykonana w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w Oddziale Fizyki Półprzewodników pod kierunkiem prof. dr hab. Wojciecha Szuszkiewicza.

Badania zrealizowano częściowo z funduszy pozyskanych w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego oraz z grantów NCN nr 2012/05/N/NZ1/00022 i 2014/13/B/ST3/04393, a także projektu NCBR TERMOT nr TechMatStrateg2/408569/5/NCBR/201.

Strona merytoryczna

Autor zaprezentował w pracy wyniki oraz wnioski płynące z badań nad dynamiką sieci kryształów PbTe, PbSe oraz kryształów mieszanych (Pb, Cd)Te z wykorzystaniem metod nieelastycznego rozpraszania neutronów zimnych, termicznych i gorących (INS) oraz promieniowania synchrotronowego (IXS). Badania te pozwoliły zweryfikować szereg połączonych wniosków wywiedzionych na bazie bardzo zaawansowanych metod obliczeniowych dedykowanych modom fononowym. Posłużyły temu badania widm fononów akustycznych i optycznych rejestrowane w temperaturze pokojowej. Analizowano fonony optyczne TO oraz fonony akustyczne głównie LA w kierunku [100] i [110] strefy Brillouina w poszukiwaniu osobliwego ‘ugięcia’ gałęzi LA. Niezależnie od badania modu LA w temperaturze pokojowej w przypadku PbTe przeanalizowano gałąź TO w niskich temperaturach. Minimalizacja kosztów oraz optymalizacja dobroci termoelektrycznej (ZT) i odporności mechanicznej zmotywowały doktoranta do badań nad dynamiką sieci kryształu PbSe oraz kryształów mieszanych (Pb, Cd)Te o nie przekraczających 9% zawartościach CdTe, prowadzonych w temperaturze pokojowej.

Wstęp, wołany w pracy jako rozdział I, pozwala prześledzić motywację i jednocześnie wyjaśnia scenariusz podejmowanych badań w tym etap podjętych badań niskotemperaturowych nad układem mieszanym (Pb, Cd)Te o niewielkiej zawartości CdTe uzasadnianych możliwością detekcji przejścia fazowego na podobieństwo innego układu mieszanego, mianowicie (Pb, Ge)Te. Rozdział II dotyczy charakterystyki strukturalnej i własności półprzewodnikowych materiałów różnych typów, a mianowicie PbTe i PbSe ($A^{IV} - B^{VI}$), CdTe ($A^{II} - B^{VI}$) i mieszanych (Pb, Cd)Te. Odwołania do różnych modeli obliczeniowych, takich jak teoria funkcjonału gęstości w przypadku PbTe czy model półempiryczny zaadoptowany do CdTe skłoniły autora do przeanalizowania ograniczeń każdego z nich, czemu został poświęcony rozdział III. Na uwagę zasługuje prezentowany w pracy diagram fazowy (Pb, Cd)Te (Rysunek 4), jako istotny ze względu na wykazanie ograniczeń wzrostu monokryształu z fazy ciekłej (metoda Bridgmana). Autor porzucił ją na rzecz metody SSVG – wzrostu monokryształu z fazy gazowej, a w pełnym brzmieniu: modyfikowanej metody samo-selekcjonującego wzrostu z fazy pary. Stan wiedzy

o dynamice sieci badanych półprzewodników, któremu w zasadzie poświęcony został rozdział III, a który został zaprezentowany bardzo skrupulatnie, pozwala prześledzić obserwowane w pomiarach INS osobliwości krzywych fononowych PbTe. Krzywe te rejestrowane były w temperaturze pokojowej na wybranych kierunkach wysokiej symetrii BZ, tj. [100] i [110] oraz niezależnie [111] w 4 K i 300 K. Dyskutowana jest istotność efektu przecinania się gałęzi LA i TO w pobliżu centrum BZ oraz mięknący mod TO. Ten drugi efekt, czyli silny wzrost z temperaturą częstości modu TO i niewielkie zmiany modu LO w punkcie Γ BZ, później silne oddziaływania s-o, uwzględniane były w kolejnych modelach obliczeniowych ab-initio. Z kolei pomiary neutronowe z analizą czasu przelotu (TOF) wsparte o obliczenia ab-initio wskazywały na obecność dwóch fononów, obserwowano też 'ugięcie' gałęzi LA w kierunku [100] (Rysunek 7). Próby wyjaśnienia tych osobliwości bez powodzenia opierano na przybliżeniach quasi-harmonicznych (QHA) później temperaturowo zależnym potencjale efektywnym (TDEP) czy na zaawansowanych obliczeniach ab-initio metodą dynamiki molekularnej (AIMD). Autor przytacza rezultaty kilku ostatnich prac teoretycznych, w których rozpatrywano wpływ anharmonizmu na własności termoelektryczne PbTe w tym prezentowano symulacje ilustrujące duży wkład gałęzi optycznych (TO, LO) do procesu transportu ciepła. Co więcej, model obliczeniowy zaniebując rozpraszanie pomiędzy gałęziami optycznymi a akustycznymi prowadził do 5. krotnego wzrostu transportu ciepła w materiale, zaś dominujący wkład do transportu ciepła związanego z fononami przypisywany był modom TO i LA. Kolejne prace teoretyczne z pierwszych zasad pokazywały, że wzajemne rozpraszanie fononów optycznych i akustycznych prowadzi do niskiej przewodności cieplnej i wysokiej wartości ZT w PbTe i PbSe. Nieskuteczne okazało się wyjaśnienie mechanizmu niskiej przewodności cieplnej PbTe, które miały przynieść rozważania procesów rozpraszania w PbTe oparte na analizie efektywnych stałych siłowych (IFC). Z kolei analiza procesów trójfononowych wykazywała, że silny anharmonizm fononów PbTe nie jest związany z punktem Γ BZ ale z okolicą połowy strefy Brillouina.

Warto dodać, że model łączący wysoką symetrię globalną sieci krystalicznej z lokalnym obniżeniem symetrii tej sieci powstał dzięki analizie dyfraktogramów neutronowych i funkcji rozkładu par (PDF). Analizowano wpływ przesunięć jonów Pb w kierunku [100] w sąsiednich komórkach elementarnych na rozkład gęstości zlokalizowanych elektronów w kryształ i wpływ tej gęstości na tworzenie się dipoli. Korelacje dipoli obserwowano na odległościach ok. 3 nm. Fluktuacje lokalnych dipoli mogły wpływać na rozpraszanie fononów w PbTe, jak również na dobroć termoelektryczną ZT półprzewodnika. Rozważano dyspersję fononów PbTe w kierunku [100] wspartą o obliczenia DFT dla temperatury 0 K oraz funkcję spektralną ($S(Q, E)$) wykorzystywaną do symulacji eksperymentów z wykorzystaniem rozpraszania neutronów w temperaturze 300 K. Niezależne rachunki wskazywały jednoznacznie na pojawienie się optycznego modu z akustyczną częstością drgań, co miało prowadzić do sprzężenia z fononem LA.

Półprzewodnikowe układy mieszane o objętości około 1 cm³ i zrelaksowanej strukturze krystalicznej otrzymane zostały z fazy gazowej z wykorzystaniem modyfikowanej metody samo-selekcjonującego wzrostu z fazy pary (SSVG), o czym czytamy w rozdziale IV. W świetle badań profili głębokościowych układu (Pb, Cd)Te o zawartości 2% CdTe z wykorzystaniem spektroskopii mas jonów wtórnych z analizą czasu przelotu (TOF-SIMS, podrozdział IV.3.) przy powierzchni kryształu występowały zanieczyszczenia sięgające ponad 8 nm, podczas gdy jednorodność chemiczną potwierdzono w zakresie głębokości 20 – 100 nm. Warto nadmienić, że bardzo efektywny okazał się zabieg wytrawiania powierzchni kryształu kwasem HCl.

Skrupulatność doświadczalna jak i dobór opisanych w rozdziale V technik spektroskopowych INS w geometrii TAS z wykorzystaniem zimnych, termicznych i gorących neutronów,

podobnie jak optymalny scenariusz pomiarowy z wyborem modu pomiarowego $Q - \text{const.}$ oraz orientacją kryształów zgodną z projekcją strefy Brillouina prezentowaną na Rysunku 15 nie budzą zastrzeżeń. Jednym z jasno nakreślonych celów jakie postawił sobie doktorant była weryfikacja osobliwego 'odpychania' gałęzi fononowych TO i LA na kierunku $[100]$ w obszarze $q = 0.5$ r.l.u. BZ. Łatwo też zauważyć w pracy skupienie pomiarów dynamiki sieci na badaniach akustycznego fononu LA w tym kierunku w półprzewodnikach mieszanych w temperaturze pokojowej. Jednocześnie autor miał świadomość, że poszukiwanie systematycznych efektów utrudnia istotnie różna jakość kryształów wykazana w pomiarach z wykorzystaniem zimnych neutronów (spektrometr G4-3, LLB). Mapowano przestrzeń odwrotną wokół węzła (200) sieci krystalicznych monokryształów o kompozycji (Pb, Cd)Te z 5% i 9% zawartością CdTe. Kluczowe okazały się uzyskane w pracy krzywe dyspersyjne gałęzi LA referencyjnego i jak dotąd najlepiej rozpoznanego układu półprzewodzącego PbTe (Rysunki 21, 22), które położyły kres spekulacjom o 'uginaniu się' modu LA w obszarze $0,075 < q < 0,25$. Zupełnie niezależnym chociaż konsekwentnym potwierdzeniem tej obserwacji jest brak 'ugięcia' gałęzi LA na kierunku $[100]$ w analizowanych dalej w pracy kryształach mieszanych z 5% i 9% zawartością CdTe (str. 53). Klasyfikacyjnych wniosków dostarczają również wyniki pomiarów dyspersji LA i TO wzdłuż kierunku $[100]$ otrzymane w pracy metodą INS dla PbTe, które ostatecznie rozstrzygają problem wzajemnego położenia obu gałęzi fononowych w tym kryształ w temperaturze pokojowej. Eksperymentalne krzywe dyspersji przecinają się w okolicach $q = 0,5$ r.l.u. BZ (a dokładniej $q = 0,4$ i $0,6$ r.l.u.) (Rysunek 23). Jednocześnie oczywista staje się słaba zgodność zaawansowanej metody obliczeń ab-initio z uwzględnieniem silnego anharmonizmu z doświadczalnymi krzywymi dyspersji TO (Rysunki 25, 26).

Badania INS w geometrii TAS fononu TO układu PbTe podjęte w 27 K poza charakterem ferroelektrycznym kryształu, czyli mięknącym modem TO oraz szacowaną z interpolacji temperaturą przejścia fazowego (-147 K), w 300 K ujawniły jego silny anharmonizm i asymetrię (podwójną strukturę energetyczną – Rysunek 31). Dla porównania badania dynamiki sieci krystalicznej PbSe w kierunku $[100]$ BZ (podrozdział V.6.) zrealizowane przy użyciu spektrometru z zimnym (G4-3: TO, LO, $0 \leq q \leq 0,5$) i termicznym źródłem neutronów (2T: LO, TA, LA, $0,6 \leq q \leq 1$) ujawniły silne tłumienie modu LA w przedziale $0,4 \leq q \leq 0,7$ na skutek rozpraszania przez inne fonony, tu prawdopodobnie poprzeczny mod TO (niestety nie prezentowany w pracy). Niemniej pomiary zestawione na Rysunku 35 wskazują na 'stykanie się' krzywych dyspersji TO i LA w połowie BZ. Obserwacja ta uzgadnia się z teoretycznie przewidywanym 'splątaniem' w punkcie $q = 0,5$ wg liczonej dla PbSe funkcji spektralnej $S(\vec{Q}, E)$ (str.61).

Warto zauważyć, że PbSe jest kryształem silnie anharmonicznym i jak dotąd jedynym kandydatem, dla którego warto było rozpatrywać fenomen tworzenia się zlokalizowanego modu optycznego w obszarze częstości akustycznych – ILM. Pamiętając, że natura gałęzi ILM ma charakter dyskretny i występuje w kryształach o bardzo silnym anharmonizmie dynamiki sieci krystalicznej, do tego jak wynika z obliczeń mod ILM pojawiając się w obszarze częstości modów akustycznych prowadzi do silnego rozpraszania fononów LA, wyłania się interpretacja spójna z obserwacjami eksperymentalnymi. Wyniki przedstawione w tej pracy jednoznacznie wskazują na 'stykanie się' tych dwóch gałęzi w punkcie $q = 0,5$ wzdłuż kierunku $[100]$. Istnienie fizycznej interakcji między fononami TO i LA ma wpływ na silny anharmonizm gałęzi LA jak również gałęzi TO i ogranicza swobodną propagację tych fononów w sieci krystalicznej na skutek krótszej drogi swobodnej. Konkludując ten wątek badań, PbSe jest jedynym związkiem z grupy halogenków ołowiu, dla którego zaobserwowano mod zlokalizowany ILM.

Rozdział VI pracy, który poświęcony został badaniom z wykorzystaniem nieelastycznego rozpraszania synchrotronowego IXS traktuje o subtelnych efektach tj. na granicy energetycznej zdolności rozdzielczej. Kształty refleksów zarejestrowanych w widmach IXS kryształu PbTe z uzasadnionych powodów opisane zostały rozkładem Lorentza (Rysunek 38). Oprócz symetrycznych względem $E = 0$ meV pików stokesowskiego i antystokesowskiego, obserwowany jest jeszcze wkład od zanieczyszczeń powierzchniowych. Niemniej, zmiany FWHM fononu LA w kierunku [100] pozostają dyskusyjne. FWHM fononu TA w kierunku [100] wyraźnie utrzymuje się na stałym poziomie co wskazuje na zaniedbywalny udział procesów rozpraszania. Ewidentnie wąskie i symetryczne piki fononowe TA i TO rejestrowano w połowie BZ dla kierunku [100] (Rysunek 42). Co więcej, stałe zachowanie FWHM jest też cechą modu TA w obszarze $0,45 \leq q \leq 1$ (Rysunek 44), co świadczy o braku jego interakcji z innymi gałęziami fononowymi w tym obszarze BZ. Zupełnie inaczej zachowuje się mod TO, który wskazuje na silny anharmonizm wzdłuż niemal całego kierunku [100] a ściślej w obszarze $0,1 \leq q \leq 0,7$ (Rysunek 43). Zatem muszą istnieć silne oddziaływania prowadzące do rozpraszania między fononami. W ślad za wskazaniem badań poprzedzających autor upatrywał przyczyn w sprzężeniu TO z LA (krzyżowaniu się tych gałęzi fononowych).

Z pomiarów IXS dyspersji modów akustycznych na kierunku [100] zmierzonych dla (Pb,Cd)Te z 2% CdTe zauważalne różnice w stosunku do analogicznych charakterystyk zebranych dla PbTe dotyczą jedynie modu LA, którego FWHM wyraźnie wzrasta w przedziale $0,3 \leq q \leq 0,8$. Pojawiają się mechanizmy prowadzące do rozpraszania fononów, które autor tłumaczy wprowadzeniem do struktury krystalicznej PbTe jonów kadmu nieregularnie obsadzających pozycje węglowe. Skrócenie drogi swobodnej fononów, spadek efektywnego transportu ciepła i poprawa dobroci termoelektrycznej ZT będą tego naturalnymi konsekwencjami. Podobnie zachowuje się krzywa dyspersji modu TA w kierunku [100], która rośnie do $q = 0,4$ po czym pozostaje stała aż do $q = 1$. Jednocześnie stała wartość FWHM do $q = 0,4$ wskazuje na brak oddziaływań między fononami w tym obszarze. Energie TA nie są czułe na obecność CdTe w kryształach.

Z neutronowych pomiarów dyfrakcyjnych opisanych w rozdziale VII wyłania się obraz motywacji i dobrze przemyślanej metodologii natomiast jest to zdecydowanie najślabiej opisana część badań. Problem, jaki postawił sobie do rozwiązania autor, dotyczył strukturalnego przejścia fazowego kryształu mieszanego (Pb, Cd)Te na podobieństwo zidentyfikowanego w kryształach (Pb, Ge)Te (Rysunek 54). Badania dyfrakcyjne z wykorzystaniem gorących neutronów w niskich temperaturach 5 K – 40 K prowadzone były na kryształach mieszanych (Pb, Cd)Te z zawartością 2,2% CdTe oraz na zadeklarowanym tu po raz pierwszy jako badanym kryształach mieszanym z zawartością 1,7% CdTe. Zgromadzona została pokaźna kolekcja map rozkładu intensywności neutronów rozpraszanych w różnych obszarach sieci odwrotnej kryształu mieszanego z zawartością 2,2% CdTe w temperaturze 6 K. Ostatecznie rejestracja natężeń refleksu (331) w przedziale temperatur 5 K – 39 K (Rysunek 57) pozwala wykluczyć możliwość strukturalnego przejścia fazowego a prawostronna asymetria kształtu piku tłumaczona jest jako wkład pochodzący od przesuniętego z pozycji węzła sieci krystalicznej jonu ołowiu.

Ocenie własności mechanicznych tj. twardości i modułu sprężystości posłużyła metoda nanoindentacji Berkovicha (rozdział VIII). Celem pomiarów nanoindentacji serii półprzewodników mieszanych (Pb,Cd)Te była weryfikacja mikrotwardości i modułu sprężystości monokryształów używanych do badań dyspersji fononów. Kryształy (Pb, Cd)Te o zawartości 0%, 2%, 5% i 9% CdTe badano metodą Berkovicha dla obciążenia wgłębnika skierowanego wzdłuż kierunku [100]. Pomiary nanoindentacji ujawniły mikrotwardość półprzewodników

mieszanych rosnącą z zawartością CdTe w strukturze krystalicznej (PbTe: 894 ± 30 MPa $\rightarrow$ (Pb,Cd)Te z 9% CdTe: 1640 ± 60 MPa) i nieczuły na kompozycję moduł sprężystości ($E \sim 72 \pm 4$ GPa), chociaż pewien wyjątek stanowi tu (Pb,Cd)Te z 5% CdTe (Rysunek 63a).

Podsumowanie (nominalny Rozdział IX) obok krótkiego zestawienia potwierdzonych efektów i własności kryształów mieszanych (Pb, Cd)Te zawiera przepis metodologiczny. Użyte podczas realizacji badań metody eksperymentalne z wykorzystaniem różnych źródeł sondujących w różnym scenariuszu pomiarowym stanowią pewien poradnik testowania przewidywań modeli teoretycznych. Autor prognozuje kierunek dalszych badań z tego obszaru w szczególności konieczność rozstrzygnięcia na gruncie eksperymentalnym relacji fononowych TO – LA.

Uwagi dyskusyjne

- 1) Autor stosuje wymiennie określenia 'kryształy' i 'roztwory stałe'. Proszę to uściślić.
- 2) Na pewno czytelniejsze są skalowane w pracy osie energii dyspersyjnych krzywych fononowych w meV oraz wartości wektora falowego w jednostkach sieci odwrotnej, ale dwójako wołana notacja kierunków wysokiej symetrii BZ wprowadza zamieszanie.
- 3) W rozdziale II łatwiej byłoby porównywać istotnie różne własności półprzewodników, takie jak przerwy energetyczne, oddziaływanie s-o czy koncentracje dziur p oraz ich ruchliwość, a wreszcie masy efektywne zarówno dziur jak i elektronów, gdyby zostały one zestawione w formie tabeli.
- 4) W rozdziale III na Rysunku 4 pokazany jest diagram fazowy (Pb, Cd)Te. Prezentowane są różne metody wzrostu monokryształu. Jest wymieniona w pracy metoda Bridgmana i wydaje się lepsza od niej, modyfikowana metoda samo-selekcjonującego wzrostu z fazy pary, ale brakuje tu dyskusji przyczyn rozbieżności a nie ma w pracy referencyjnego odniesienia do wyników 'Rosenberga 1964'.
- 5) Kierunki wysokiej symetrii na lewym panelu Rysunku 8 str. 28 oraz w opisie zostały błędnie oznaczone.
- 6) W rozdziale IV czytamy, że półprzewodnikowe układy mieszane otrzymane zostały z fazy gazowej metodą SSVG. Zabrakło informacji, ile i jakich kompozycyjnie półprzewodników mieszanych otrzymano do badań prezentowanych w rozprawie.
- 7) Ponieważ sygnalizowane były istotne różnice jakości krystalicznej półprzewodników mieszanych zasadne byłoby pokazanie w pracy rysunków analogicznych do Rysunków 16 i 17 dla kompozycji (Pb, Cd)Te z 9% zawartością CdTe.
- 8) Intensywnie dyskutowany w pracy efekt sprzężenia fononów LA i TO skutkuje zdaniem autora tłumieniem fononów LA. Dowodem na to ostatnie miałyby być gwałtowne zmiany FWHM w wybranych punktach krzywej dyspersji modu LA jednak niefortunnie autor nawiązuje przy tym do Rysunku 19, z którego nic podobnego nie wynika.
- 9) Pomyłone zostały oznaczenia referencyjnych prac. Legenda kłóci się z opisem pod rysunkiem 21, co dodatkowo przeczy komentarzom autorskim.
- 10) Wartościowe zestawienia porównawcze liniowych zmian energii modu LA w funkcji zawartości procentowej CdTe w kryształach mieszanych umożliwiło wyznaczenie prędkości rozchodzenia się dźwięku i te wyniki zostały zamieszczone w Tabeli 2. Prezentowane dane zostały poszerzone o dodatkowe wyniki odnoszące się do innych jeszcze kryształów mieszanych serii pomiarowej (dotąd nieraportowanych). Niefortunnie bądź celowo autor nie zamieścił w tabeli wyników odnoszących się do kryształów mieszanych z zawartością 2,2% i 9% CdTe. Proszę to skomentować.

- 11) W odniesieniu do dyskusji dotyczącej wyników IXS (Rozdział VI) niepokoi fakt, że zgodnie z danymi zamieszczonymi na stronie <https://www.esrf.fr/UsersAndScience/Experiments/DynExtrCond/ID28/BeamlineLayout/OH3/BackscatteringMonochromator> (data dostępu: 17.11.2024), konfiguracja, o której mowa w pracy pozwala na uzyskanie zdolności rozdzielczej 2,2 meV. Proszę to skomentować.
- 12) Rysunek 53, który konfrontuje otrzymane w pracy krzywe dyspersji fononów kryształu PbTe z literaturowymi, w tekście pracy został niestety opisany w sposób niejasny a najprawdopodobniej błędny (str. 77).
- 13) Przekonująca jest zależność intensywności refleksu (331) w funkcji temperatury (Rysunek 60). Zastanawiają wyraźnie przeszacowane błędy prezentowane na Rysunkach 59a, 59b oraz 61 i tu uwaga techniczna - legendy są nieczytelne.
- 14) Opisując scenariusz pomiarowy (str. 90) zamiast 'parametrów pracy CSM' powinien być skrót od polskiej nazwy, czyli 'parametry pracy CPS'.
- 15) Pomiary nanoindentacji pokazały moduł sprężystości jako niezależny od kompozycji z wyjątkiem (Pb,Cd)Te z 5% CdTe (Rysunek 63a). Rodzi się pytanie czy gdyby tu pojawiły się wyniki E pozostałych badanych składów 'nieczułość' mogłaby okazać się pozorna. Proszę wyjaśnić czemu te dane są niekompletne?

Strona redakcyjna

Recenzowana prac zawiera 101 stron z czego na 3 stronach streszczony został dorobek naukowy doktoranta. Struktura rozprawy obejmuje streszczenie, wstęp, osiem właściwych rozdziałów, podsumowanie i spis literatury. Tekst pracy uzupełniają 4 tabele i numerycznie 63 rysunki. Spis literatury obejmuje 106 pozycji. Praca pod względem redakcyjnym napisana jest poprawnie. Do nielicznych niedociągnięć należy zaliczyć:

- brak konsekwentnego zapisu w legendach rysunków Γ (stosowano: Γ , gamma),
- brak listy skrótów: pojawiają się pewne akronimy, np. BZ, IFC (po raz pierwszy wołany w pracy na str. 26 a wyjaśnienie pojawia się na str.29), ILM, czy CSM, dlatego użyteczny byłby wykaz skrótów na początku pracy,
- referencje przytaczane w pracy jako indeksy górne w nawiasach kwadratowych pisanych normalną czcionką, niekonsekwentny zapis pozycji bibliograficznych.

Wnioski końcowe

Materiał zebrany w pracy jest oryginalny i cenny, ponadto opracowany został w sposób jasny i rzetelny. Warto zaznaczyć, że o dyspersji fononów PbSe wiadomo niewiele w tym o dyspersji fononów TO, LA i TA wzdłuż [110] w obszarze niepełnej połówki BZ donosi jedna praca a o dynamice (Pb, Cd)Te traktują jedynie prace składające się na powstałą rozprawę. Klarowność wniosków nie budzi wątpliwości. Od strony metodologicznej prowadzone badania nie budzą żadnych zastrzeżeń. Ponadto, obok żmudnej i dociekliwej analizy eksperymentalnej przemysłony został w pracy praktyczny sposób weryfikacji przewidywań często bardzo skomplikowanych modeli teoretycznych. Reasumując, prezentowane w pracy wartościowe wyniki są rezultatem systematycznych i dobrze przemyślanych badań. Poprawne interpretacje uzyskanych wyników świadczą o dobrej intuicji fizycznej i dowodzą dobrego przygotowania do dalszej pracy naukowej. Podane w recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają pozytywnej merytorycznej oceny pracy.

Dorobek naukowy doktoranta obejmuje 9 czasopism klasyfikowanych w kategorii A. 10. praca recenzowana jest w czasopiśmie również tej rangi. Doktorant był współautorem ogółem 25 wystąpień konferencyjnych. Osobiście referował wyniki z tematu badawczego na prestiżowych konferencjach w tym 4-rotnie w języku angielskim i raz w języku polskim. Wnoszę niniejszym, że jest to wystarczająco obszerny dorobek naukowy, który z całą pewnością uprawnia doktoranta do starań nad uzyskaniem tytułu naukowego w drodze postępowania o nadanie stopnia doktora nauk fizycznych.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pana magistra Rafała Kuny całkowicie spełnia kryteria stawiane kandydatom w Ustawie – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony w celu otrzymania stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.



Katarzyna Rećko