

Prof. dr hab. Bogdan Kowalski

Warszawa, 7.03.2025

Instytut Fizyki PAN

Aleja Lotników 32/46

02-668 Warszawa

### ***Recenzja rozprawy doktorskiej***

***mgr. Tomasza Sobola***

***pt.: Effect of transition metal cap layer on the electronic structure of topological insulator  $Bi_2Te_3$ .***

Praca została wykonana w Instytucie Fizyki im. Augusta Chełkowskiego Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Promotorem pracy jest dr hab. Jerzy Michał Kubacki. Promotorem pomocniczym jest dr Katarzyna Balin.

Niniejsza recenzja została wykonana na mocy Uchwały Rady Naukowej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach z dnia 26 listopada 2024 r. powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. Tomasza Sobola. Recenzję wykonałem zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami.

Według publikacji „Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik” wydanej przez Radę Doskonałości Naukowej w 2022 roku, opinia o rozprawie doktorskiej powinna zawierać ocenę, z uzasadnieniem, czy:

- rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta,
- rozprawa wykazuje umiejętność doktoranta samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Niniejsza recenzja zawiera trzy wymienione elementy oceny, stanowiące podstawę ostatecznej konkluzji.

Rozprawa doktorska mgr. Tomasza Sobola poświęcona jest badaniom początkowych stadiów tworzenia się warstwy metalu przejściowego – żelaza lub kobaltu - na powierzchni izolatora topologicznego  $Bi_2Te_3$ . Celem jej było określenie wpływu ultra cienkich warstw tych metali, osadzanych, w ilościach odpowiadających ułamkom monowarstwy, na eksfoliowanych kryształach  $Bi_2Te_3$ , na strukturę pasmową  $Bi_2Te_3$ , szczególnie na topologicznie chronione stany powierzchniowe. Zastosowanymi metodami badawczymi były przede wszystkim różne techniki spektroskopii fotoelektronów: kątowno rozdzielcza spektroskopia fotoemisyjna (ARPES), ARPES z wykorzystaniem dichroizmu kołowego (CD-ARPES), rentgenowska spektroskopia fotoelektronów XPS, a także rentgenowska spektroskopia absorpcyjna (XAS). Wszystkie te techniki były stosowane z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego w NCPS SOLARIS w Krakowie.

Podjęcie tego tematu oznaczało wkroczenie na bardzo ciekawe ale też trudne i konkurencyjne pole badań zmierzających do powiązania magnetyzmu z materiałami topologicznymi. Wśród technologicznych metod mających doprowadzić do tego celu rozważa się domieszkowanie materiałów topologicznych pierwiastkami magnetycznymi, ale też indukowanie magnetyzmu za pośrednictwem efektu bliskości z nałożoną na materiał topologiczny warstwą magnetyczną. Wybrane przez Doktoranta pole badań jest zatem w pełni

uzasadnione. Dokładne zbadanie i opanowanie procesu osadzania warstwy metalu przejściowego na materiale topologicznym, od najwcześniejszych etapów, z obserwacją zmian indukowanych w materiale topologicznym, jest warunkiem skutecznego tworzenia układu, w którym możemy oczekiwać efektu bliskości. Osadzanie warstw na „kanonicznym” dobrze zbadanym izolatorze topologicznym  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  również jest sensowne, ponieważ istnieje obfity zbiór danych doświadczalnych, z którym można skonfrontować wyniki otrzymane dla czystej powierzchni i mieć pewność co do właściwości układu początkowego, który następnie modyfikujemy. Ponadto, pokrewne układy typu  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  lub heterostruktury  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$  są intensywnie badanymi magnetycznymi izolatorami magnetycznymi lub kandydatami na nie, przy aktywnym poszukiwaniu eksperymentalnego dowodu ostatecznie weryfikującego istnienie i ewentualny rozmiar przerwy w topologicznych stanach powierzchniowych. Zatem nadzieja na wyindukowanie w tym izolatorze topologicznym efektów związanych z magnetyzmem nie jest fantazją, nawet jeśli trudno tego oczekiwać już w przeprowadzonych przez doktoranta badaniach, przy ułamkowych pokryciach izolatora topologicznego metalem przejściowym.

Zadanie podjęte przez Doktoranta nie było łatwe. Łączy się w nim konsekwentne obserwowanie, z wymaganą rozdzielczością kątową i energetyczną, topologicznych stanów powierzchniowych, ze spektrum zjawisk pojawiających się na tworzącej się międzywierzchni, takich jak narastający nieporządek, zmieniające się powierzchniowe wygięcie pasm, oddziaływanie z resztkową atmosferą w spektrometrze, wpływ strumienia wysokoenergetycznych fotonów itp. Doktorant, stosując wymienione powyżej metody eksperymentalne, z pełną świadomością ich zalet i ograniczeń, uzyskał informacje o wpływie osadzanych warstw metalicznych na strukturę pasmową stanów powierzchniowych i objętościowych oraz na fizykochemiczną strukturę międzywierzchni.

Szczegóły przeprowadzonych badań i ich wyniki przedstawiono w rozprawie składającej się ze spisu treści, streszczenia, pięciu rozdziałów zawierających kolejno: wstęp, wprowadzenie do teoretycznych i doświadczalnych aspektów badań izolatorów topologicznych, warunki przeprowadzonych badań doświadczalnych, osiągnięte wyniki i ich dyskusję oraz podsumowanie. Pracę opatrzono też dwoma załącznikami, spisem rysunków i bibliografią zawierającą 122 pozycje literaturowe. Praca napisana jest w języku angielskim, załączono wymagane w takim przypadku streszczenie w języku polskim.

Rozdział pierwszy - *Introduction* - zawiera krótki, jednostronicowy opis koncepcji izolatorów topologicznych, perspektyw ich zastosowania, następnie wprowadza czytelnika w problematykę magnetycznych izolatorów topologicznych oraz przedstawia zakres i cele pracy składające się na problem naukowy do rozwiązania.

Rozdział drugi - *Theoretical and experimental aspects of topological insulators* – zawiera kilkunastostronicowe wprowadzenie do tematu rozprawy oraz badanych materiałów, począwszy od standardowej prezentacji koncepcji rozróżnialności obiektów ze względu na ich właściwości topologiczne (w tym przypadku za pomocą kubka i precli), przez skrótowe omówienie teorii izolatorów topologicznych, do prezentacji zbioru ważnych wyników badań izolatorów topologicznych opublikowanych w literaturze. W szczególności zaprezentowano istotne wyniki dotyczące  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , struktury krystalicznej i pasmowej struktury elektronowej tego materiału. Ten rozdział, wraz z wyborem literatury, na którą autor się powołuje, bez wątplenia świadczy o opanowaniu przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej na temat fizyki materiałów topologicznych, w zakresie niezbędnym do sensownego zaplanowania i przeprowadzenia opisanych w rozprawie badań doświadczalnych. Myślą przewodnią opisu teorii izolatorów topologicznych jest chronologicznie przedstawiony procesu wprowadzania topologii do opisu obserwowanych w ciele stałym zjawisk kwantowych, począwszy od kwantowego zjawiska Halla do etapu zidentyfikowania i opisanie izolatorów topologicznych charakteryzowanych niezmiennikiem topologicznym  $\mathbb{Z}_2$ , do których należy też  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

Merytorycznie pozytywną opinię o tym rozdziale zaburzają wymienione poniżej nieścisłe bądź niezręczne sformułowania oraz formalne usterki, jak brak źródła w podpisach niektórych rysunków zaczerpniętych z literatury (oczywiście pojawia się ono w tekście).

- W opisie twierdzenia Noether stwierdzono „...objects, systems, or even the entire universe obey symmetries...” choć same obiekty nie muszą spełniać rozważanych symetrii, a raczej ich prawa ruchu, ewentualnie *działanie*. (str. 5)
- Stwierdzenie “...in insulators, mainly covalent bonds are present...” pomija typowe jonowe izolatory, jak sól kamienna (str. 7)
- Wzór 2.5 opisano jako definicję krzywizny Berryego, a jest to faza Berryego. Właściwa formuła dla krzywizny Berryego podana jest w kolejnej linii. (str. 8)
- Na str. 9 napisano “One of the main consequences of applying topology ... is the existence of gapless conducting state...”. Recenzent jest przekonany, że bezprzerwowe stany elektronowe istnieją niezależnie od tego czy topologia zostanie zastosowana do ich opisu czy nie.
- Przywołanie w tym miejscu rozprawy (na str.10) pracy Volkova i Pankratowa (Ref. 14) jako przykładu wizualizacji powierzchniowych stanów topologicznych w materiałach z symetrią inwersyjną jest niezbyt uzasadnione, skoro nie ma tam kontekstu topologicznego, a w kolejnej przywołanej referencji [15] (L. Fu, C.L. Kane, Phys. Rev. B 76, 045302 2007) autorzy wskazują na różnice w liczbie punktów Diraca ze zmianą znaku masy w strefie Brillouina dla stanów analizowanych przez Volkova i Pankratowa i dla typowych stanów topologicznych. Powierzchniowe stany w materiałach IV-VI zostały zidentyfikowane jako topologiczne, opisane w sposób ścisły teoretycznie, dopiero gdy zidentyfikowano niektóre z tych materiałów jako krystaliczne izolatory topologiczne [L. Fu, *Topological crystalline insulators*. Phys. Rev. Lett. 106, 106802 (2011), T.H. Hsieh et al. *Topological crystalline insulators in the SnTe material class*. Nature Commun. 3, 982 (2012)].
- Nie podano źródła Tabeli I. Bez wyjaśnień w tekście sens podawania tej tabeli jest wątpliwy. (str. 13)
- Jak należy rozumieć stwierdzenie „...surface states do not vanish in the direction perpendicular to the surface...” i w jaki sposób to ma pomagać w identyfikacji stanów powierzchniowych w eksperymencie ARPES? (str. 14)
- Opisywanie  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  jako „...compound with a very wide energy gap of 0.3 eV”, przynajmniej bez kontekstu, jest sprzeczne z ogólnie przyjętą kategoryzacją, według której materiały z przerwą poniżej 0.7 eV (a czasem nawet 1.1 eV) uważa się za materiały wąskoprzerwowe, (str. 14)
- Str. 15 Tabela III, Sb zwykle uważa się za półmetal, a nie półprzewodnik; nie rozwinięto skrótowca TCI (str. 15)
- W podpisach rys. 9 (str.19) i rys. 10 (str.21) brak podanych źródeł.

Rozdział trzeci - *Experimental details* - to opis warunków przeprowadzanych badań, zastosowanych metod pomiarowych jak i technologicznych (przy nakładaniu warstw Fe i Co). Najwięcej miejsca poświęcono opisowi zastosowanych technik spektroskopii fotoemisyjnej, dzięki którym otrzymano większość prezentowanych wyników. Rozdział dopełnia krótkie wprowadzenie do fizyki promieniowania synchrotronowego i opis wykorzystanych w badaniach Doktoranta stacji eksperymentalnych na liniach PHELIX i URANOS w NCPS SOLARIS. Prezentacja podstaw fizycznych zastosowanych technik pomiarowych jest bardziej szczegółowa niż wprowadzenie teoretyczne w rozdziale drugim, co jest uzasadnione doświadczalnym charakterem pracy. Ten rozdział potwierdza wiedzę i kompetencje Doktoranta w zakresie zastosowanych technik badawczych oraz przemyślany sposób ich doboru i wykorzystania. Kilka poniższych uwag nie podważa tego przekonania.

- Na str. 31, w wyprowadzeniu Złotej Reguły Fermiego przyjmuje się  $\text{div } A$  i  $\phi$  równe zero (tak jak napisano wzorami) a nie „...the vector and scalar potentials are zero...”. Z jakiego źródła zaczerpnięto przedstawione wyprowadzenie?
- Na tej samej stronie, nie jest dla mnie jasny sens zdania zaczynającego się “Fermi statistic provides information about the transition of the excited electron...”.
- Na str. 39 w opisie powstawania widm XAS nie wspomniano, że modulacje współczynnika absorpcji związane są z rozpraszaniem fotoelektronów na sąsiednich atomach w sieci krystalicznej, dzięki czemu widma XAS niosą informacje o konfiguracji otoczenia krystalicznego wybranych (pobudzanych) atomów. Sądzę, że zdanie „Together with the delta factor (density of state),  $\Delta$  induces a modulation of the absorption coefficient, creating the X-ray absorption fine structure (XAFS).” tego nie wyjaśnia. Ponadto czynnik  $\delta(E_f - E_i - \hbar\nu)$  we wzorze 3.8, którego zdanie to dotyczy, zapewnia spełnienie zasady zachowania energii (co Doktorant sam zauważył na str. 31), a nie opisuje gęstości stanów.
- Referencja [80] to praca z 1947 roku więc historia promieniowania synchrotronowego zaczęła się w latach czterdziestych, a nie pięćdziesiątych, jak napisano na stronie 43.
- Cząstki naładowane, w szczególności relatywistyczne, wypromieniowują energię gdy poruszają z przyspieszeniem (opóźnieniem). Oddziaływanie z polem magnetycznym jest sposobem nadania im przyspieszenia dośrodkowego w synchrotronie. Dlatego zdanie ze str.43 „...very fast charged particles lose energy when they interact with an external magnetic field.” wydaje mi się zbytnim skrótem myślowym.

Rozdział czwarty - *Results and Discussion* – to zasadnicza część rozprawy zawierająca zgromadzone dane eksperymentalne, ich analizę i interpretacje. Wyniki badań zostały przedstawione kolejno: dla czystego  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , dla powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  z osadzonym stopniowo żelazem i dla  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  z osadzonym kobaltem. Badania opisano w każdym przypadku według tego samego schematu: badania metodą XPS, badania metodą ARPES, badania metodą CD-ARPES. W przypadku osadzania żelaza przeprowadzono też eksperyment CD-XAS.

Eksperymenty zostały przeprowadzone systematycznie i, co warto podkreślić, ze świadomością zjawisk, które mogą wpłynąć na obserwowane wielkości parametrów istotnych dla badanych układów, zwłaszcza na energię wiązania stanów elektronowych czy proporcje maksimów fotoemisji ze stanów rdzeniowych. Eksperymentalnie analizowany jest wpływ na badaną powierzchnię absorpcji molekuł z reszkowej atmosfery w spektrometrze, ewentualnie wzmacniany oddziaływaniem promieniowania rentgenowskiego, a także zjawisko elektrycznego ładowania się próbki pod wpływem silnej wiązki fotonów, nawet jeśli mamy do czynienia z wąskoprzerwowym materiałem. Przeprowadzono test wiązania węgla na próbce oświetlonej promieniowaniem rentgenowskim. Czy był przeprowadzany też podobny test na próbce nieoświetlonej? Czy próbowano zweryfikować znaczenie ładowania się próbek pod wpływem wiązki rentgenowskiej za pomocą zmiany natężenia wiązki lub zastosowania źródła niskoenergetycznych elektronów („flood gun”)?

Analiza wyników XPS została wykorzystana do weryfikacji czystości powierzchni kryształu  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  jak też do obserwacji zmian składu powierzchni próbek pokrywanych Fe lub Co, do oszacowania głębokościowego rozkładu osadzanych atomów. W tym celu wykorzystano zależność głębokości ucieczki fotoelektronów od ich energii kinetycznej. Zbierając widma stanów rdzeniowych osadzanych pierwiastków przy wykorzystaniu fotonów od 100 do 850 lub 1000 eV dokonano oszacowania głębokości na której wkład metalu przejściowego jest najsilniejszy, po kolejnych osadzaniach. Byłoby ciekawe zweryfikowanie tych wyników innymi metodami pomiarowymi, dedykowanymi do badania głębokościowych rozkładów pierwiastków.

Istotną częścią analizy XPS jest identyfikacja wkładów do widm pierwiastków składowych badanego układu związanych chemicznie z różnymi sąsiadami. Doktorant posługuje się tą

metodą by zidentyfikować zmiany wiązań chemicznych zachodzące w przypowierzchniowej warstwie próbki pod wpływem osadzanego metalu przejściowego. Autor posługuje się z reguły wartościami energii wiązania analizowanych maksimów, bardzo oszczędnie pokazując wyniki rozkładu maksimów na składowe. Rozkład pokazano na rys. 24 i w Załączniku I. Podano tylko rodzaj dopasowywanych profili (Gaussian/Lorentz albo Doniach-Sunjic) bez parametrów czy informacji o metodzie oszacowania tła w analizowanym widmie.

Demonstracja rozkładów byłaby przydatna szczególnie przy słabych efektach, do których Autor się odwołuje, np. do asymetrii maksimów Te 4d na rys. 25 (wskazywanej jako dowód na nadmiar Te w próbce (str. 54)), na rys. 42, czy też w przypadku dodatkowego wkładu do Te4d, nie uwzględnionego na rys. 24, który jest przywoływany na str. 62 także jako dowód istnienia w próbce nadmiarowych atomów Te.

Wnioski z analizy XPS dla  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  z żelazem zostały podsumowane na stronie 83 rysunkiem 46 i komentarzem do niego. Jaka jest, w istocie, różnica między warstwą „zieloną”, w której atomy Bi są zastępowane atomami Fe w wiązaniach z Te, a „żółtą”, w której zachodzi reakcja między Fe i Te dzięki czemu powstaje FeTe? Czy byłoby możliwe podanie skali grubości dla tego schematu, nawet biorąc pod uwagę ograniczoną głębokościową zdolność rozdzielczą zastosowanej metody?

Analiza XPS układu Co/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  przyniosła podobne wnioski wskazujące na reakcję chemiczną metalu przejściowego z podłożem w jego przypowierzchniowej warstwie.

Zastanawiające, w tym zestawie danych jest wyraźne przesunięcie widma dla stanów Bi 5d i Te 4d mierzonego dla 1000 eV w stosunku do krzywych zmierzonych przy niższych energiach (na rys. 59, dla kryształu pokrytego warstwą 1 Å Co), zupełnie nieobecne dla stanu Bi 4f (rys. 60) zmierzonego w tych samych warunkach. Na str. 80 Autor zastrzega, że weryfikacja skali energetycznej widm rejestrowanych przy 850 eV (rys. 42-44) jest niepewna ze względu na warunki eksperymentu. Czy jest sens dodawania widma dla 850 eV skoro obserwowane jego przysunięcie jest wyraźnie anomalne, niespójnie z położeniem lub przesunięciami poprzednich widm?

Badania przeprowadzone metodą ARPES dla czystego  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pokazały, strukturę pasmową znaną z wyników literaturowych, jakość zarejestrowanych widm jest porównywalna z danymi literaturowymi, co potwierdza dobrą jakość kryształów i właściwy dobór warunków prowadzenia pomiarów. Dane zebrane dla czystej powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  stanowią bazę odniesienia do analizy wyników otrzymanych dla powierzchni pokrywanych metalami przejściowymi.

Nakładanie warstw Fe manifestuje się przesunięciem poziomu Fermiego w kierunku pasma przewodnictwa, wiązanym z wygięciem pasm elektronowych przy powierzchni, co powoduje, że punkt Diraca, przesuwając się względem poziomu Fermiego, w stosunku do obserwacji na czystej powierzchni, o ok. 275 meV (istotnie więcej niż raportowano np. w Ref. 64). Nie jest obserwowane otwarcie przerwy w stanach powierzchniowych. Natomiast rosnące wygięcie pasm powoduje pojawienie się rozszczepionych stanów w paśmie przewodnictwa (bardzo dobrze widoczne przy energii fotonów 20 eV) i walencyjnym (znacznie słabiej widoczne na przedstawionych rysunkach). Doktorant interpretuje je na podstawie literaturowych koncepcji jako skwantowane stany w studni pojawiającej się przy silnym przypowierzchniowym wygięciu pasm lub przejaw pasm pojawiających przy modyfikacji przerwy van der Waalsa w warstwowej strukturze  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  z powodu wnikania tam osadzanych atomów. Efekt ten jest nieco słabszy w przypadku osadzania Co, niemniej widoczny w paśmie przewodnictwa. Doktorant optymalnie dobrał energie fotonów by obserwować zarówno stany diracowskie jak i pasma objętościowe. Wartość 55 eV konsekwentnie stosowana przy eksperymentach ARPES jest odnoszona do energii wiązania stanu Fe 3p. Czy należy rozumieć, że podjęto próbę obserwacji fotoemisji rezonansowej związanej ze wzbudzeniem Fe 3p-3d?

Wyniki eksperymentów CD-ARPES dla  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pokazały zależność znaku dichroizmu poszczególnych pasm od energii fotonów spójną z dostępnymi w literaturze wynikami zebranymi dla tej rodziny materiałów. Jak słusznie Doktorant zauważył, zinterpretowanie wyników pomiarów CD-ARPES wymaga starannego uwzględnienia symetrii stanów początkowych i końcowych, w tym przypadku układu z silnym oddziaływaniem spin-orbita, elementów macierzowych przejść między nimi, w sposób uwzględniającym konfigurację eksperymentu, w tym polaryzację promieniowania pobudzającego. Teoretyczne odtworzenie wyniku eksperymentu CD-ARPES, i określenie na tej podstawie orbitalnego momentu pędu badanych stanów, w szczególności dla materiału topologicznego, wymaga zawansowanej pracy teoretycznej, jest zatem całkowicie uzasadnione, że Doktorant posłużył się tymi wynikami raczej do weryfikowania ewentualnych różnic spowodowanych osadzeniem metali przejściowych.

W sumie, zebrano konsystentny zbiór danych obrazujących procesy chemiczne i elektronowe zachodzące na powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pod wpływem osadzania bardzo cienkich, subangstromowych warstw Fe lub Co, prześlędzono zmiany stanu chemicznego pierwiastków obecnych na powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , wykazano, że takie modyfikacje powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  nie niszczą diracowskiej struktury topologicznie chronionych stanów powierzchniowych, zmierzono zmiany wygięcia pasm i przesunięcie poziomu Fermiego, którego położenie jest istotne ze względu na ewentualne zastosowania badanych struktur, zaobserwowano stany, które można interpretować jako rezultat skwantowania w przypowierzchniowej studni potencjału. Są to istotne osiągnięcia poszerzające naszą wiedzę o tworzeniu się złącza  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -metal przejściowy. Stanowią przydatny krok ku stworzeniu struktury, w której będzie możliwe wykreowanie magnetycznego izolatora topologicznego.

Co prawda nie zaobserwowano oczekiwanego przez Doktoranta otwarcia przerwy w diracowskich stanach powierzchniowych, jednak należałoby, jak sądzę, ten aspekt potraktować jako „plan maksimum”, trudny do osiągnięcia przy tak małych pokryciach powierzchni (czy Autor szacował jakiemu pokryciu powierzchni odpowiadają zastosowane „grubości” warstw?). Sam magnetyczny charakter osadzonej warstwy, przy zapewne wyspowym wzroście, wymagałby oddzielnej analizy i weryfikacji.

Co też ważne, Doktorant wykazał doświadczalnie jaki jest zakres wpływu warunków eksperymentu na otrzymywane wyniki. Mimo że eksperyment prowadzono w optymalnych warunkach, w wysokiej klasy układzie ultra wysokiej próżni, z dostępem do promieniowania synchrotronowego, sam proces pomiaru wpływał na badany układ. Znaczenie tego wpływu Doktorant zauważył i starał się uwzględnić.

Autor wspomniał, że podobne badania analogicznego układu ( $\text{Fe}/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) były raportowane w Ref. 64, szkoda, że nie dokonał szerszego porównania swoich wyników z przedstawionymi w Ref.[64], co pokazałoby istotne poszerzenie zakresu badań w recenzowanej rozprawie w porównaniu z Ref. 64, szczególnie szerszy zakres zastosowanych energii fotonów, powiązanie wyników ARPES z XPS oraz istotnie większy zakres obserwowanej zmiany położenia poziomu Fermiego.

Pracę zamyka rozdział piąty - *Summary and perspectives* – zawierający podsumowanie zebranych wyników, wniosków z ich analizy, osiągniętych celów badań oraz sugestii rozszerzenia badań stanowiących podstawę tej dysertacji. Doktorant wskazuje na potrzebę optymalizacji procesu tworzenia struktury, kontroli jej jakości strukturalnej oraz wsparcia analizy wyników bardziej zawansowaną analizą teoretyczną. Są to z pewnością rozsądne propozycje. Sugerowałbym dołączyć do nich rozwinięcie analizy wyników ARPES metodami numerycznymi, tak by wyciągnąć z nich więcej szczegółów, na przykład analiza skwantowanych poziomów z rys. 61 byłaby skuteczniejsza.

Z recenzenckiego obowiązku muszę jeszcze wymienić kilka przykładów niedociągnięć, głównie o charakterze technicznym, które zapewne Autor usunąłby w kolejnym czytaniu swojej rozprawy:

STM to Scanning Tunneling Microscopy a nie Scanning Transmission Microscopy (str. 3)

MOS oznacza *metal-oxide-semiconductor* a nie *metal-semiconductor* (str. 25)

Na str. 44 we wzorze 3.42. **B** jest napisane jak wektor zaś  $v$  i  $E$  jak skalary.

Na str. 45. Użyto wątpliwej frazy "...the accelerated electron is bent..."

Na str. 64 w podpisie rys.31 opis paneli jest nieprawidłowy:  $a$  i  $b$  dotyczą świeżo odkrytej powierzchni a nie  $a$  i  $c$ .

Na str. 79 w podpisie rys. 42 brak informacji o ilości osadzonego Fe.

Czy na str. 95 nie powinno być odwołania do *Figure 56* a nie *49*?

Na str. 87 nie podano źródła wzoru 4.6

Spis referencji również zawiera usterki, na przykład:

Ref. 1 – brak „adresu” pracy

Ref. 3 -brak nazwiska autora (A.H. Wilson)

Ref. 77 – brak „adresu” pracy

Ref. 81 – brak nazwisk redaktorów książki.

Podsumowując, stwierdzam że przedłożona mi do recenzji rozprawa mgr. Tomasza Sobola zatytułowana *Effect of transition metal cap layer on the electronic structure of topological insulator  $Bi_2Te_3$*  spełnia warunki postawione rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami.

- Zarówno rozdziały I i II rozprawy, analiza zgromadzonych danych, jak i wnioski wyciągnięte na jej podstawie dowodzą, że Doktorant opanował ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie rozwiązywanych problemów fizycznych i zastosowanych metod badawczych oraz skutecznie przedstawił ją w rozprawie w stopniu korespondującym z zakresem i charakterem zaplanowanych i przeprowadzonych badań.
- Przedstawione w rozprawie badania, zaplanowane zgodnie z zadeklarowanymi celami pracy i konsekwentnie zrealizowane, dobór metod eksperymentalnych, przy świadomości ich ograniczeń, oraz analiza osiągniętych wyników, na tle wiedzy dostępnej w literaturze, a także obiektywne skonfrontowanie osiągniętych rezultatów z założonymi planami, ze wskazaniem możliwości kontynuowania prac, świadczą o umiejętności doktoranta samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- Problemem naukowym, z którym Doktorant postanowił się zmierzyć było opisanie pierwszych stadiów tworzenia się złącza  $Bi_2Te_3$  z Fe albo Co, zaobserwowanie zmiany struktury topologicznych stanów powierzchniowych, stwierdzenie czy następuje w nich otwarcie przerwy, zaobserwowanie procesów fizykochemicznych na międzywierzchni Fe/ $Bi_2Te_3$  i Co/  $Bi_2Te_3$ . Na podstawie zgromadzonych oryginalnych danych eksperymentalnych, problem został rozwiązany w stopniu istotnie poszerzającym naszą wiedzę o tworzeniu się badanych struktur i wskazującym kierunki dalszych, potencjalnie obiecujących badań. Zatem recenzowana rozprawa spełnia także warunek stanowienia oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr. Tomasza Sobola do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



PODPIS ZAUFANY

BOGDAN JERZY  
KOWALSKI

07.03.2025 11:53:31 [GMT+1]

Dokument podpisany elektronicznie  
podpisem zaufanym



## Raport weryfikacji

Wynik

Wynik przetwarzania

Komunikat błędu

Skrót pliku z podpisem

Nazwa pliku z podpisem

Identyfikator weryfikacji

**WAŻNY/PRAWIDŁOWY**

Zakończono

Podpis elektroniczny nie został złożony za pomocą kwalifikowanego urządzenia do składania podpisu (QSCD)

350787448e23a766f1c64acc703d2e603e57d47c

Recenzja\_Tomasz\_Sobol-B\_Kowalski\_podpis.pdf

3B1627DD21508D1D161DE45466DF2151E3564E65

## Lista podpisów

Status weryfikacji podpisu

Data i czas wykonania podpisu

Data i czas weryfikacji podpisu

Format podpisu

Poziom podpisu

Certyfikat podpisującego

**WAŻNY/PRAWIDŁOWY**

2025-03-07 11:53:31 GMT+01:00

2025-03-07 14:41:52 GMT+01:00

PAdES

BES (Podpis w postaci podstawowej)

kwalifikowany

## Osoba podpisująca (profil zaufany ePUAP)

Imię i nazwisko

BOGDAN JERZY KOWALSKI

## Ścieżka certyfikacji

### Certyfikat podpisującego

Walidacja certyfikatu

Status certyfikatu

Wystawiony dla

Wystawiony przez

Ważny od

Ważny do

Data wystawienia CRL/OCSP

Numer seryjny

**WAŻNY/PRAWIDŁOWY**

**WAŻNY**

CN=Minister do spraw informatyzacji - pieczęć podpisu zaufanego,

O=Ministerstwo Cyfryzacji, C=PL

CN=Centrum Kwalifikowane EuroCert, O=EuroCert Sp. z o.o., C=PL,

2024-02-13 10:27:09 GMT+01:00

2027-02-12 10:27:09 GMT+01:00

2025-03-07 10:00:58 GMT+01:00

efd46f5b31b845d08071c5eed94d4eb9d37d

### Certyfikat wystawcy

Walidacja certyfikatu

Status certyfikatu

Wystawiony dla

Wystawiony przez

Ważny od

Ważny do

Numer seryjny

**WAŻNY/PRAWIDŁOWY**

**WAŻNY**

CN=Centrum Kwalifikowane EuroCert, O=EuroCert Sp. z o.o., C=PL,

CN=Narodowe Centrum Certyfikacji, O=Narodowy Bank Polski, C=PL

2017-02-14 13:26:19 GMT+01:00

2028-02-15 00:59:59 GMT+01:00

1a5734b0d472d251e1d37cfe3d796ac117102490