

Prof. dr hab. Tomasz Story  
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa A. Kolwasa**  
pod tytułem „Zjawiska transportu elektronowego w mikrostrukturach PbTe z wieloma kontaktami i w strukturach hybrydowych In/PbTe”.

Praca doktorska mgr. Krzysztofa A. Kolwasa poświęcona jest doświadczalnemu badaniu zjawisk transportu elektronowego w mikrostrukturach elektrycznych wytworzonych z wąskoprzewodowego materiału półprzewodnikowego PbTe, w którym oddziaływania relatywistyczne odgrywają kluczową rolę. Integralną częścią rozprawy jest obszerny program prac technologicznych zrealizowanych nowoczesnymi metodami elektronolitograficznymi w celu wytworzenia mikrostruktur półprzewodnikowych optymalnych do badań przewodnictwa elektrycznego lokalnego i nielokalnego oraz złącz nadprzewodnik/półprzewodnik.

Tematyka tej pracy związana jest z bardzo ważnym kierunkiem współczesnej fizyki ciała stałego jakim jest badanie zjawisk transportu elektronowego w nowej klasie materiałów kwantowych - izolatorów topologicznych. Są to układy elektronowe 2D lub 3D, w których izolujące (półprzewodnikowe) właściwości objętości kryształu stwarzają się z metalicznymi właściwościami powierzchni kryształu. Zjawiska te obserwuje się w na powierzchni granicznej materiałów, w których silne oddziaływania spinowo-orbitalne prowadzą do odwrócenia standardowego układu pasm elektronowych. Są to zwykle półprzewodniki z wąską przerwą energetyczną dobrze znane z zastosowań termoelektrycznych lub optoelektrycznych w zakresie podczerwieni. Do tej klasy materiałów zalicza się także PbTe i całą rodzinę półprzewodników IV-VI. Choć dotychczas były one klasyfikowane jako tzw. słabe izolatory topologiczne to ochrona topologiczna stanów powierzchniowych i możliwość ich fizycznej obserwacji może być zapewniona przez odpowiednią dystorsję kubicznej sieci krystalicznej lub działanie właściwych symetrii krystalicznych na powierzchniach wysokiej symetrii (nowa klasa topologicznych izolatorów krystalicznych).

W swojej pracy doktorskiej K.A. Kolwas podejmuje ambitny plan doświadczalnego zbadania efektów magnetotransportowych w mikrostrukturach PbTe z wieloma kontaktami i bramkami elektrostatycznymi a także transmisji elektronów w hybrydowych złączach półprzewodnik/nadprzewodnik In/PbTe. Jest to zadanie badawcze o dużej randze poznawczej ale także o dużym stopniu trudności technologicznych i eksperymentalnych. Podjęcie tej tematyki badawczej w Środowiskowym Laboratorium SL2 Badań Kriogenicznych i Spintronicznych IF PAN kierowanym przez prof. dr. hab. T. Dietla w sposób naturalny wynika z długofalowych zainteresowań i dotychczasowych osiągnięć tego zespołu badawczego w dziedzinie elektronolitograficznego wytwarzania mikrostruktur półprzewodnikowych oraz badań transportu elektronowego i właściwości magnetycznych szeregu półprzewodników rodzin II-VI, IV-VI i III-V. Realizacja tych ambitnych zamierzeń wymagała podjęcia przez doktoranta programu prac technologicznych z zakresu elektronolitografii oraz badań właściwości elektrycznych (przewodnictwo elektryczne,

magnetoopór, efekt Halla) szeregu warstw, heterostruktur kwantowych i układów hybrydowych z masywnymi kryształami PbTe. Zasadnicze pomiary magnetotransportowe oraz ich analizę doktorant wykonał samodzielnie w IF PAN w swoim macierzystym laboratorium SL2 pod kierownictwem promotora prof. nzw. dr. hab. Grzegorza Grabeckiego. Wyjściowe półprzewodnikowe układy warstwowe zostały wytworzone metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) na Uniwersytecie J. Keplera w Linzu.

Poza wprowadzeniem rozprawa zawiera cztery rozdziały, podsumowanie, siedem dodatków i bibliografię (198 pozycji).

W rozdziale 1 omówiono zjawiska i modele fizyczne istotne dla analizy właściwości elektrycznych półprzewodnikowych warstw i heterostruktur na bazie PbTe. Zasadniczą częścią rozdziału stanowi syntetyczne omówienie elektronowych właściwości izolatorów topologicznych, a w szczególności porównanie prądów krawędziowych w układach kwantowego efektu Halla i kwantowego spinowego efektu Halla (dwuwymiarowego izolatora topologicznego). Autor przedstawił także krótki opis podstawowych właściwości tellurku ołowiu - kluczowego dla tej rozprawy doktorskiej materiału półprzewodnikowego. W końcowej części rozdziału przypomniano mechanizmy transportu elektronowego w strukturach złączowych półprzewodnik/nadprzewodnik (tunelowanie, odbicie Andreeva i efekt bliskości) i omówiono dane literaturowe na temat kontaktów In/PbTe.

Częściowo informacje podane w rozdziale 1 mają charakter podręcznikowy, w dużej części jednak rozdział ten stanowi użyteczne przypomnienie efektów fizycznych ważnych dla zrozumienia dalszych badań doświadczalnych i ich interpretacji przez Autora. Szczególnie cenne jest krytyczne omówienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie magnetotransportowych obserwacji prądów krawędziowych w dwuwymiarowych izolatorach topologicznych HgTe/CdHgTe.

Autor nie ustrzegł się w tym rozdziale drobnych pomyłek: np. na str. 43, rys. 1.7.1b ilustruje raczej zagięcie pasm w sytuacji akumulacji ładunku przy powierzchni ( $p \rightarrow p^+$ ) a nie inwersji typu przewodnictwa jak sugeruje podpis.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu metod wytwarzania oraz charakteryzacji elektrycznej i chemicznej badanych układów.

1. Cienkich warstw PbTe na podłożu BaF<sub>2</sub> ścienianych metodą trawienia chemicznego w celu uzyskania warstw o grubości od 3 do 0.1  $\mu\text{m}$ .
2. Heterostruktur ze studniami kwantowymi PbTe o grubości 12 nm z barierami elektronowymi Pb<sub>0,92</sub>Eu<sub>0,08</sub>Te domieszkowanymi modulacyjnie bizmutem.
3. Hybrydowych złącz nadprzewodnik/półprzewodnik na bazie heterostruktur PbTe/Pb<sub>0,92</sub>Eu<sub>0,08</sub>Te z kontaktami z In.
4. Hybrydowych złącz In/PbTe wytworzonych na powierzchni kryształów masywnych n-PbTe o bardzo wysokiej ruchliwości nośników.

Podane informacje są bardzo użyteczne i jasno określają badane przez doktoranta próbki. Widać także bardzo duży wysiłek technologiczny w celu uzyskania dobrej jakości różnorodnych mikrostruktur elektrycznych z PbTe. Przy omawianiu heterostruktur ze studniami kwantowymi Autor podaje szczegółowy układ warstw w heterostrukturze, zwracając uwagę na dodatkowe warstwy Pb<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Te lub PbSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> także pełniące funkcję barier elektronowych. O ile nie budzi to wątpliwości dla kryształów mieszanych ze strontem, o tyle bariera zawierająca selen wymaga komentarza ze względu na bardzo małą przerwę energetyczną PbSe i jej nietrywialną zależność od składu chemicznego w stopach PbSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub>.

Wyniki własnych pomiarów elektrycznych Autor przedstawił w rozdziale 3. Rozdział 3.1 poświęcony jest pomiarom cienkich warstw PbTe na podłożu BaF<sub>2</sub> i zawiera bardzo ważną obserwację doświadczalną o praktycznym braku nielokalnego oporu elektrycznego w warstwach grubych (3-mikronowych) i pojawieniu się tego efektu w warstwach ścienianych poniżej 1 mikrona. Interpretacja tego efektu (wpływ transportu równoległego) podana jest w rozdziale 4.

W rozdziale 3.2 przedstawione są bardzo ciekawe wyniki pomiarów temperaturowej i polowej zależności magnetooporu lokalnego i nielokalnego w heterostrukturach ze studniami kwantowymi PbTe i barierami Pb<sub>0.92</sub>Eu<sub>0.08</sub>Te. Wskazują one na istnienie zarówno dodatniego jak i ujemnego magnetooporu oraz pewnej anomalii dla pola zerowego (rys. 3.2.1 i 3.2.2). Szkoda, że Autor nie przedstawił szerszego omówienia możliwych mechanizmów fizycznych takich efektów i nie podjął próby jakościowego opisu obserwowanych zależności.

Rozdział 3.3 dotyczy realistycznej struktury złącza (model podany w rozdziale 4) oraz temperaturowych charakterystyk oporu elektrycznego R(T) różnorodnych złącz In/PbTe. Na podstawie obserwowanych na krzywych doświadczalnych R(T) przejść do stanu nadprzewodzącego oraz pomiarów oporu elektrycznego próbek referencyjnych wyznaczono szereg ważnych parametrów takich złącz, demonstrując w szczególności ich wysoką transmisję.

W rozdziale 4 doktorant bardzo zwięźle przedstawia kluczowe koncepcje w zakresie interpretacji i dyskusji wyników swoich oryginalnych badań. Dla zrozumienia właściwości elektrycznych niektórych badanych struktur warstwowych Autor zaproponował i szczegółowo zbadał model transportu elektronowego uwzględniający równoległe przewodnictwo zdefektowanej warstwy p+ na międzywierzchni podłoża BaF<sub>2</sub> – warstwa PbTe. Dla złącz In/PbTe Autor postuluje, że kluczowe znaczenie ma wewnętrzna struktura krystaliczno-chemiczna obszaru kontaktu indowego i proponuje model stopowego złącza nadprzewodnik(1) - półprzewodnik – nadprzewodnik(2), z drugą fazą nadprzewodzącą zaindukowaną we wnętrzu półprzewodnika.

W umieszczonych na końcu rozprawy siedmiu dodatkach Autor podał informacje na temat: wykonanych komputerowych symulacji obwodów elektrycznych, procedury wytwarzania elektrycznych kontaktów indowych do PbTe (niezwykle szczegółowy opis, str. 104), testowych pomiarów elektrycznych mikrostruktur i bramek elektrostatycznych, szczegółów opracowanych procesów elektronolitograficznych wraz z dokumentacją graficzną (obrazy z mikroskopu AFM) oraz wykorzystanych w pracach doświadczalnych programów komputerowych napisanych przez Autora w środowisku programistycznym LabView.

W mojej ocenie, najważniejsze osiągnięcia badawcze pracy doktorskiej Krzysztofa A. Kolwasa można podsumować następująco.

1. Opracowanie metodyki i wytworzenie techniką elektronolitografii szeregu półprzewodnikowych mikrostruktur z PbTe przeznaczonych do badań właściwości elektrycznych cienkich warstw i studni kwantowych PbTe z barierami elektronowymi Pb<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>Te:Bi oraz hybrydowych kontaktów półprzewodnik/nadprzewodnik PbTe/In.
2. Doświadczalne zbadanie temperaturowej i polowej zależności oporu lokalnego i nielokalnego w warstwach PbTe oraz w modulacyjnie domieszkowanych heterostrukturach Pb<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>Te/PbTe osadzonych na podłożu BaF<sub>2</sub>. Wyjaśnienie, przez uwzględnienie kanału równoległego przewodnictwa poprzez warstwę defektową p<sup>+</sup>, wcześniejszych obserwacji doświadczalnych przypisywanych efektom nielokalnym w warstwach PbTe/BaF<sub>2</sub>. Potwierdzenie aktualnych przewidywań teoretycznych,

zgodnie z którymi kubiczny PbTe jest trywialnym izolatorem pasmowym oraz podanie górnego oszacowania wielkości spinowego efektu Halla w PbTe.

3. Doświadczalne zbadanie właściwości elektrycznych złącz hybrydowych półprzewodnik/nadprzewodnik PbTe/In o dużej transmisji wytworzonych przy wykorzystaniu zarówno układów cienkowarstwowych jak i kryształów masywnych n-PbTe. Zaproponowanie mikroskopowego modelu takiego stopowego złącza z uwzględnieniem dyfuzji In do PbTe i reakcji chemicznych na granicach międzyfazowych umożliwiających wytworzenie drugiej fazy nadprzewodzącej wewnątrz półprzewodnika.

Praca napisana jest starannie i przejrzysto graficznie choć zawiera pewną liczbę potknięć edytorsko-językowych, bardziej znaczące pośród których wymieniam poniżej:

1. str. 38, rys. 1.5.1 - powielony za danymi literaturowymi błąd w opisie prawej osi OY oraz niewłaściwy odsyłacz;
2. str. 41 - niefortunne wyrażenie „rozpraszanie spinów na niespolaryzowanym celu” odnosi się do rozpraszania na centrach niemagnetycznych;
3. str. 60, rys. 2.3.1 a) - błędnie podano skład warstwy buforowej oraz barier elektronowych  $Pb_{0.92}Eu_{0.08}Te$ ;
4. str. 103, punkt 4 – chodzi zapewne o kwas mlekowy, a nie jak omyłkowo podano kwas masłowy.

W swojej pracy doktorskiej mgr K.A. Kolwas podjął i zrealizował obszerny program wartościowych prac z zakresu wytwarzania oraz nano charakteryzacji półprzewodnikowych mikrostruktur elektrycznych a także doświadczalnych badań właściwości elektrycznych cienkich warstw PbTe, studni kwantowych PbTe z barierami  $Pb_{1-x}Eu_xTe$  oraz struktur hybrydowych z nadprzewodnikowym kontaktem PbTe/In. Realizacja tych bardzo wymagających technologicznie i doświadczalnie zadań wymagała od doktoranta opanowania szeregu nowych procedur elektronolitograficznych i chemicznych oraz metod pomiarów magnetotransportowych, a także dobrego zrozumienia metodologii badań nielokalnych efektów elektrycznych w układach półprzewodnikowych. Skuteczna realizacja tych zadań świadczy o dobrym, praktycznym opanowaniu przez doktoranta tych metod badawczych. Ta cenna wiedza może być z powodzeniem zastosowana np. do badań topologicznych izolatorów krystalicznych na bazie monokryształów SnTe oraz  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  i  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ . Prace teoretyczne przewidują także nietrywialne właściwości topologiczne dwuwymiarowych układów elektronowych w heterozłączach PbTe/ $Pb_{1-x}Sn_xTe$ /PbTe.

Oryginalne wyniki uzyskane przez doktoranta zostały już przedstawione w dwóch publikacjach w Journal of Applied Physics (2010) oraz Physica Status Solidi B (2013). Autor przedstawił także dużą liczbę (18) prezentacji konferencyjnych i seminaryjnych oraz uzyskał w roku 2009 Mazowieckie Stypendium Doktoranckie.

**Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Krzysztofa A. Kolwasa pt. „Zjawiska transportu elektronowego w mikrostrukturach PbTe z wieloma kontaktami i w strukturach hybrydowych In/PbTe” spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim z fizyki i wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.**



Tomasz Stóry