

Autoreferat

Wpływ spinu i oddziaływania spinowo-orbitalnego
na własności transportowe silnie skorelowanych
złożonych tlenków oraz topologicznych izolatorów
krystalicznych

Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk
&
Międzynarodowe Centrum Badawcze MagTop,
Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk



Krzysztof Dybko

Warszawa, 19 kwietnia 2019

K.D.

Spis treści

1	Wykształcenie i stopnie naukowe	3
2	Historia zatrudnienia	3
3	Osiągnięcie naukowe będące podstawą procedury habilitacyjnej	4
3.1	Autorzy, tytuły publikacji, czasopismo, rok opublikowania	4
3.2	Opis osiągnięcia naukowego	5
4	Pozostała aktywność naukowa	13

1 Wykształcenie i stopnie naukowe

- 1985, magister fizyki, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki
praca magisterska: *Emisja Landau'owska w półprzewodnikach z wąską przerwą energetyczną* Promotor: prof. dr hab. Marian Grynberg, kopromotor: mgr Wojciech Knap
- 1996, doktor nauk fizycznych, Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk, Warszawa
rozprawa doktorska: *Własności transportu elektronowego w półprzewodnikach półmagnetycznych na bazie żelaza* Promotor: prof. dr hab. Andrzej Mycielski

2 Historia zatrudnienia

09/1985 – do chwili obecnej: Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk, Warszawa
(wyłączywszy okres: 11/1998 - 06/2000, współpracownik naukowy, kontrakt w ramach projektu TMR Wspólnoty Europejskiej, Leoben University, Austria)

3 Osiągnięcie naukowe będące podstawą procedury habilitacyjnej

Osiągnięciem naukowym, zgodnie z art. 16 paragraf 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych (Dz. U. nr. 65, pozycja 595, ze zmianami), jest cykl prac o wspólnej tematyce zatytułowany:

Wpływ spinu i oddziaływania spinowo-orbitalnego na własności transportowe silnie skorelowanych złożonych tlenków oraz topologicznych izolatorów krystalicznych

3.1 Autorzy, tytuły publikacji, czasopismo, rok opublikowania

- [H1] **K. Dybko**, P. Aleshkevych, M. Sawicki, and P. Przyslupski. Magnetic and magnetotransport characterization of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBCO}/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBCO}$ spin valve. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 373:48, 2015.
- [H2] **K. Dybko**, P. Aleshkevych, M. Sawicki, W. Paszkowicz, and P. Przyslupski. The onset of ferromagnetism and superconductivity in $[\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (n u.c.)/ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-2\delta}$ (2 u.c.)] $_{20}$ superlattices. *Journal of Physics - Condensed Matter*, 25:376001, 2013.
- [H3] P. Aleshkevych, **K. Dybko**, P. Dłuzewski, E. Dynowska, L. Gładczuk, K. Lasek, and P. Przyslupski. Magnetic and magnetotransport properties of epitaxial $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ spin valves. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 51:385002, 2018.
- [H4] **K. Dybko**, P. Pfeffer, M. Szot, A. Szczerbakow, A. Reszka, T. Story, and W. Zawadzki. Nernst-Ettingshausen effect at the trivial-nontrivial band ordering in topological crystalline insulator $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$. *New Journal of Physics*, 18:013047, 2016.
- [H5] **K. Dybko**, M. Szot, A. Szczerbakow, M. U. Gutowska, T. Zajarniuk, J. Z. Domagała, A. Szewczyk, T. Story, and W. Zawadzki. Experimental evidence for topological surface states wrapping around a bulk SnTe crystal. *Physical Review B*, 96:205129, 2017.

3.2 Opis osiągnięcia naukowego

W początkach lat dwutysięcznych byłem jednym z wykonawców projektu Wspólnoty Europejskiej "Centrum Doskonałości dla Niskowymiarowych Struktur" - CELDIS oraz projektu badawczego zamawianego "Elektronika Spinowa". Aktywnie poszukiwaliśmy struktur, skonstruowanych wyłącznie z półprzewodników, które wykazywać będą nowe optyczne i transportowe efekty wywołane przez ferromagnetyczny składnik heterozłącza w strukturach PbS/EuS/PbS. Magnetoopór tunelowy w takich strukturach powinien silnie zależeć od temperatury, ponieważ poniżej temperatury Curie przejścia ferromagnetycznego w EuS duże rozszczepienie wymienne pasma przewodnictwa będzie wpływać na barierę tunelową dla tunelujących elektronów. Aby sprostać tak postawionemu problemowi, zbudowałem czuły układ mostkowy, który umożliwiał pomiary różniczkowe dI/dV czy też dV/dI w funkcji napięcia stałego lub prądu. W wyniku przeprowadzonych prac stwierdziliśmy pasożytnicze mikrozwarcia w barierze EuS, które skutecznie uniemożliwiały obserwację szukanych efektów [Z1]. W sytuacji gdy badania magnetooporu tunelowego i efektów filtra spinowego były niedostępne, postanowiłem zwrócić swoją uwagę w stronę materiałów silnie skorelowanych (tlenków o strukturze perowskitu), w skład których wchodziły zarówno silne metaliczne ferromagnetyki (manganity) oraz nadprzewodniki (miedziowce). Materiały te mają intrygujące własności fizyczne, gdyż występuje w nich jednocześnie wiele oddziaływań włączając oddziaływania ładunkowe, spinowe, spinowo – orbitalne i odkształcenia sieci krystalicznej. Są one odpowiedzialne za takie własności jak kolosalny magnetoopór[1], nadprzewodnictwo [2], ferroelektryczność i multiferroiczność [3], ferromagnetyzm [4], przejście metal-izolator [5], nie wspominając o szerokim zakresie przerw energetycznych predystynujących je do zastosowań w fotowoltaice [6].

Heterostrukтуры złożone z manganitu $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) oraz wysokotemperaturowego nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) były rutynowo hodowane w laboratorium kierowanym przez prof. dr hab. Piotra Przysługę. LSMO jest półmetalicznym związkiem wykazującym w niskich temperaturach prawie 100% polaryzację spinową i był używany w naszych strukturach jako elektroda ferromagnetyczna (F). Natomiast YBCO stanowiło nadprzewodzącą warstwę oddzielającą (S). Badania złożonych heterostruktur F/S bazujących na perowskitach są ważne z punktu widzenia badań podstawowych ze względu na wzajemnie konkurujące ze sobą porządki ferromagnetyczny i nadprzewodzący. Ponadto takie heterostrukтуры mogą być

rozpatrywane jako nadprzewodnik magnetyczny tak jak to zaproponowano w pracy [7]. Przyjmując inny punkt widzenia, w pracy [8] rozważano teoretycznie w heterostrukturach F/S/F możliwość sprzężenia wymiennego między warstwami F bez niszczenia nadprzewodnictwa w warstwie S. Jeszcze wcześniejsze sugestie Tagirova [9] dotyczyły wielowarstw o strukturze podobnej do zaworu spinowego (antyferromagnetyk/ferromagnetyk/nadprzewodnik/ferromagnetyk), a nazwanej nadprzewodzącym przełącznikiem spinowym, gdyż umożliwiały przełączanie prądu poprzez rotację namagnesowania w górnej (swobodnej) warstwie magnetycznej. Istniejące obserwacje w warstwach metalicznych wskazywały na zmiany temperatury krytycznej rzędu dziesiątek miliKelwinów, pomiędzy antyrównoległym i równoległym ułożeniem momentów magnetycznych. W roku 2008 udało nam się dokonać analogicznej obserwacji w naszych pierwszych próbkach wspomnianego typu (F1/S/F2) bazujących na LSMO oraz YBCO. Największy wzrost temperatury przejścia odniesionej do zerowego pola magnetycznego wyniósł 1.6 K [Z2]. W tej pracy, pośród innych możliwych wyjaśnień, zasygnalizowaliśmy po raz pierwszy możliwość, iż to faza trypletowego nadprzewodnictwa jest odpowiedzialna za zwiększanie się temperatury krytycznej wraz ze wzrostem pola magnetycznego. Hipoteza ta opierała się na pracy teoretycznej Kirkpatrick'a i innych [10].

W następnej pracy [Z3] dokładnie zbadaliśmy podobną próbkę typu F1/S/F2, LSMO(16nm)/YBCO(21nm)/LSMO(22nm). Potwierdziliśmy wzrost temperatury krytycznej struktury, lecz tym razem badaliśmy obie geometrie pomiarowe: prąd w płaszczyźnie (CIP) i prąd prostopadły do płaszczyzny (CPP). Było to możliwe dzięki wychodowaniu próbki "schodkowej" z dolną ferromagnetyczną warstwą odsłoniętą w celu zrobienia kontaktu elektrycznego. Poprzez wykonanie pomiarów dynamicznej konduktancji w różnych temperaturach oraz w szerokim zakresie pól magnetycznych, otrzymaliśmy informację dotyczącą symetrii parametru porządku w stanie nadprzewodzącym a także o spinowo zależnym transporcie podprzerwowym. W obu konfiguracjach obserwowaliśmy maksimum dla zerowego przyłożonego napięcia DC. W konfiguracji CIP był on bardzo ostry, zaś w konfiguracji CPP, mniej wyraźny i bardzo szeroki. Okazało się, że dokładnie takie zachowanie zostało przewidziane w pracy teoretycznej Tanaka i Kashiwaya odpowiednio dla nadprzewodnika o parowaniu trypletowym (o symetrii typu p) oraz YBCO (o symetrii typu d) [11]. Zatem dzięki spektroskopii konduktancji dynamicznej otrzymaliśmy dodatkowe potwierdzenie możliwości zaist-

nienia fazy spin trypletowej w naszych trójwarstwach F1/S/F2. W tej sytuacji nawet tak zatytułowaliśmy pracę "Possible spin-triplet superconducting phase in the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ trilayer". Temat ten był bardzo aktualny, ponieważ w tym samym czasie grupa z Madrytu potwierdziła nasze wnioski o istnieniu nadprzewodnictwa trypletowego w heterostrukturach manganit/miedziowiec za pomocą pomiarów zależności kątowych magnetooporu [12].

Kolejna praca [H1], także poświęcona była badaniom możliwości zaistnienia nadprzewodnictwa trypletowego, lecz tym razem w strukturze zaworu spinowego F1/F2/S zrealizowanej w próbce $\text{LSMO}(13.5\text{nm})/\text{YBCO}(3.6\text{nm})/\text{LSMO}(27\text{nm})/\text{YBCO}(42\text{nm})$. Warstwa YBCO o grubości 3.6nm nie była nadprzewodząca z powodu efektów transferu ładunku i miała jedynie spełniać rolę warstwy izolacyjnej separującej dwie warstwy ferromagnetyczne z LSMO. Ponieważ obie warstwy LSMO miały różne grubości to ich momenty magnetyczne, jak i pola koercji też były różne. Efektywnie nasza struktura jest analogiczna do struktury F1/F2/S rozważanej w pracy [13]. Przeprowadzone pomiary rezonansu ferromagnetycznego wykazały dwie linie, potwierdzając tym samym istnienie struktury dwuskładnikowej (F1 oraz F2). Struktura jako całość wykazała ostre maksima magnetooporu (MR) w polach odpowiadających polu koercji, potwierdzając w ten sposób istnienie zaworu spinowego. Dodatkowo okazało się, że wielkość pików MR zależy od orientacji pola magnetycznego przykładanego w płaszczyźnie próbki. Badania kątowej zależności temperatury krytycznej (zdefiniowanej jako spadek oporu o trzy rzędy wielkości) w ustalonym polu magnetycznym $H=450$ Oe pokazały jej niemonotoniczność i asymetrię względem 90 stopni. Fakt ten znów jest w zgodności do przewidywań teoretycznych dotyczących generacji nadprzewodzącej fazy długozasięgowej o składowej trypletowej w układach, gdzie minimalna temperatura krytyczna odpowiada niekolearnemu ułożeniu momentów magnetycznych F1/F2 [13].

Praca [H2] jest poświęcona zagadnieniu bardziej podstawowemu/praktycznemu: pytaliśmy jakie warunki muszą być spełnione by pojawiło się oddziaływanie ferromagnetyczne oraz nadprzewodzące w układach skonstruowanych z ultra cienkich warstw LSMO oraz YBCO. Próbkę hodowane były na orientowanym podłożu (100) LaAlO_3 w postaci supersieci ze zmienną liczbą warstw manganitu n , $[\text{LSMO } n \text{ u.c.}/\text{YBCO } 2 \text{ u.c.}]_{20}$. W pierwszym podejściu wyhodowana była supersieć z pojedynczymi warstwami $[\text{LSMO } 1 \text{ u.c.}/\text{YBCO } 1 \text{ u.c.}]_{20}$, ale niestety nie nadprzewodziła. Dlatego w następnych próbkach ustaliliśmy grubość YBCO na dwie monowarstwy zmieniając liczbę warstw

LSMO od 1 do 4 u.c.. Zachowanie nadprzewodzące w zależności temperaturowej oporu wykazały tylko próbki z $n=1$ lub 2 u.c. Z kolei ferromagnetyzm pojawił się dla supersieci z $n=4$. Zachowanie paramagnetyczne supersieci z $n \leq 3$ jest wywołane transferem nośników z YBCO do LSMO, tak jak to wcześniej potwierdziliśmy w badaniach jądrowego rezonansu magnetycznego w trójwarstwach [Z3].

W kolejnej pracy [H3] połączyliśmy dwa perowskity, jeden dobrze znany ferromagnetyczny LSMO o stuprocentowej polaryzacji spinowej i drugi SrIrO_3 będący paramagnetycznym metalem posiadającym elektrony $5d$ z silnym oddziaływaniem spinowo-orbitalnym. Naszym zamiarem było zbadanie wpływu SrIrO_3 na własności transportowe zaworów spinowych bazujących na tym materiale i materiale LSMO. Grubość warstw LSMO ustaliliśmy na 19nm i 12nm podczas gdy zmienialiśmy grubość wewnętrznej warstwy SrIrO_3 w granicach od 0.4 nm do 2.4 nm. Widma rezonansu ferromagnetycznego pokazały wzajemnie prostopadłe ułożenie momentów magnetycznych górnej i dolnej warstwy LSMO w epitaksjalnych trójwarstwach LSMO/ SrIrO_3 /LSMO. Pomiar magnetotransportu wykazały zachowanie zarówno standardowego jak i odwrotnego zaworu spinowego, uzależnione od wzajemnej orientacji prądu i zewnętrznego pola magnetycznego. Takie zachowanie może być wynikiem filtrowania spinowego w warstwie separującej SrIrO_3 . Jednakże należy zaznaczyć, że całkowita zmiana obserwowanej magnetooporności jest niezwykle mała (rzędu dziesiątek ppm).

Równolegle do innych badań, byłem też włączony w odkrycie pierwszych topologicznych izolatorów krystalicznych (TCI) powstałych na bazie związków IV-VI [Z4]. W przeciwieństwie do izolatorów topologicznych opartych na związkach bizmutu, te nowe stany materii topologicznej są topologicznie chronione przez konkretną symetrię krystaliczną. W przypadku TCI jest to symetria zwierciadlana komórki elementarnej [14, 15]. W konsekwencji tej unikalnej ochrony, topologiczne stany powierzchniowe znajdują się jedynie na ściśle wybranych płaszczyznach: (001), (110), (111). Dlatego wszystkie eksperymenty na TCI powinny być przeprowadzane na próbkach wylupanych wzdłuż wymienionych płaszczyzn. W naszej pracy [Z4] wszystkie pomiary transportowe zostały umieszczone w suplemencie z powodu braku silnej ewidencji topologicznych stanów powierzchniowych w wysokopolewym magnetotransporcie. Zaobserwowane kwantowe oscylacje Shubnikova – de Haasa w temperaturach helowych nie pokazały żadnej zależności kątowej, co wskazuje na ich trójwymiarowe pochodzenie. Zostało to potwierdzone poprzez wyznaczenie koncentracji elektronów z niskopolewego efektu Halla, który to

wynik był w zgodności z koncentracją wyznaczoną z okresu oscylacji Shubnikova – de Haasa (po uwzględnieniu czterokrotnej degeneracji dolinowej).

Mając powyższe na uwadze, nie oczekiwaliśmy przejawów topologicznych stanów powierzchniowych w pomiarach termoelektrycznego efektu Nernsta-Ettingshausena w kryształach TCI $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ [H4]. Raczej inspiracją była praca [16], gdzie autorzy przypisali zmianę znaku efektu Nernsta-Ettingshausena zaobserwowaną w funkcji temperatury do punktu gdzie pasma energetyczne zmieniają swą symetrię na przeciwną. To znaczy, gdzie przerwa energetyczna jest zero i struktura pasmowa zmienia się z trywialnej w nietrywialną (odwroconą) strukturę pasmową. Zaobserwowano to tylko dla jednej próbki ($\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, $x=0.23$). W naszej pracy [H4] natomiast zmierzaliśmy wartości współczynników N-E w całym zakresie rozpuszczalności dla przypadku nietrywialnego: $x=0.25$, 0.277 , 0.325 , 0.39 oraz dla PbSe jako przypadku trywialnego. Nasza praca jednoznacznie wykazuje, że współczynnik N-E osiąga maksimum w miejscu gdzie następuje przejście do fazy topologicznej. Probka trywialna PbSe nie pokazuje żadnej zależności temperaturowej współczynnika N-E. Ponadto, nasze wyniki eksperymentalne potwierdziliśmy w prostym modelu teoretycznym, który opisuje je w sposób niemalże ilościowy.

Obserwacja transportowa topologicznych stanów powierzchniowych w trójwymiarowym prototypowym TCI takim jak SnTe może wydawać się bardzo mało prawdopodobna z powodu wysokiej koncentracji dziur, która jest rzędu 10^{20} cm^{-3} . Jest to prawdą, dopóki nie zaobserwuje się obu wkładów, to znaczy trywialnego – objętościowego oraz topologicznego – powierzchniowego. Pokazaliśmy, że to się udało osiągnąć w naszych próbkach SnTe o wyjątkowej jakości krystalicznej, wyhodowanych metodą samo-selekcjonującego się wzrostu z fazy pary [H5]. Badaliśmy kwantowy transport niskotemperaturowy. Pomiary dotyczyły zjawiska Shubnikova – de Haasa, de Haasa – van Alphen oraz przejawów zjawiska kwantowego Halla. Badania zależności kątowej umożliwiły nam odróżnienie wkładów dwuwymiarowych i trójwymiarowego – objętościowego. Dzięki precyzyjnemu wyznaczeniu fazy Berry’ego równej π , dowiedliśmy, że zaobserwowany gaz dwuwymiarowy jest tożsamy z topologicznymi stanami powierzchniowymi. Ponadto, wykazaliśmy, że prostopadłościenna próbka o ścianach równoległych płaszczyznom (001) jest jakby owinięta przez topologiczne stany powierzchniowe. Dane oscylacyjnego namagnesowania (efekt de Haasa – van Alphen) opisaliśmy w modelu teoretycznym. Założeniem modelu było jedynie, iż objętościowy rezerwuuar no-

śników w SnTe "przypina" poziom Fermiego w całym układzie [17].

Podsumowanie najważniejszych wyników

- Nowy dowód na istnienie długozasięgowego nadprzewodnictwa trypletowego, jednego z najważniejszych zagadnień fizyki materii skondensowanej. Potwierdziliśmy doświadczalnie przewidywania teoretyczne dotyczące spin trypletowego zaworu spinowego z niekolinearnie zorientowanymi momentami magnetycznymi poprzez obserwację niemonotonicznej zależności temperatury przejścia nadprzewodzącego w funkcji kąta obrotu próbki w równoległym polu magnetycznym [H1].
- Użyliśmy supersieci zbudowanych z ultra-cienkich warstw manganitów i miedziowców (o grubości do kilku komórek elementarnych – u.c.) w celu określenia warunków zaistnienia dwóch konkurencyjnych porządków ferromagnetycznego i nadprzewodzącego [H2].
- Zademonstrowaliśmy eksperymentalnie normalny zawór spinowy oraz odwrotny zawór spinowy w układzie zbudowanym z manganitów i SrIrO_3 nowego materiału z dużym oddziaływaniem spinowo-orbitalnym [H3].
- Dowiedliśmy eksperymentalnie i teoretycznie, że termoelektryczny efekt Nernsta-Ettingshausena może być użyty do określenia topologicznych własności materii. Nasze badania wykazują, że topologiczne przejście fazowe wywołane przez odwrócenie struktury pasmowej pojawia się gdy współczynnik Nernsta-Ettingshausena osiąga maksimum [H4].
- Pierwsza konsystentna eksperymentalnie ewidencja transportowa na istnienie topologicznych stanów powierzchniowych owijających objętościowy kryształ SnTe. Oba wkłady, objętościowy i topologiczny były w naturalny sposób rozdzielone w kwantowych zjawiskach oscylacyjnych: Shubnikova – de Haasa i de Haasa – van

Alphena. Drugi z efektów opisaliśmy teoretycznie przyjmując zaczepienie energii Fermiego poprzez silnie zdegenerowany rezerwuuar nośników objętościowych w SnTe [H5].

Publikacje związane z habilitacją lecz nie włączone w główne osiągnięcie

- [Z1] S. Wrotek, K. Dybko, A. Morawski, A. Makosa, T. Wosiński, T. Figielski, Z. Tkaczyk, E. Łusakowska, T. Story, A. Yu. Sipatov, A. Szczerbakow, K. Graszka, J. Wróbel, and W. Palosz. Vertical electron transport through PbS-EuS structures. *Acta Phys. Pol. A*, 103(6), 2003.
- [Z2] K. Dybko, K. Werner-Malento, M. Sawicki, and P. Przyslupski. Enhancement of the superconducting transition temperature by an external magnetic field parallel to the plane of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ trilayers. *EPL (Europhysics Lett.)*, 85:57010, 2009.
- [Z3] K. Dybko, K. Werner-Malento, P. Aleshkevych, M. Wojcik, M. Sawicki, and P. Przyslupski. Possible spin-triplet superconducting phase in the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ trilayer. *Phys. Rev. B*, 80:144504, 2009.
- [Z4] P. Dziawa, B. J. Kowalski, K. Dybko, R. Buczko, A. Szczerbakow, M. Szot, E. Łusakowska, T. Balasubramanian, B. M. Wojek, M. H. Berntsen, O. Tjernberg, and T. Story. Topological crystalline insulator states in $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$. *Nat. Mater.*, 11:1023–1027, 2012.

Literatura

- [1] R. von Helmolt, J. Wecker, B. Holzapfel, L. Schultz, and K. Samwer. Giant negative magnetoresistance in perovskitelike $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_x$. *Phys. Rev. Lett.*, 71(14):2331–2333, 1993.
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Phys. B Condens. Matter*, 64(2):189–193, 1986.
- [3] H Béa, M Gajek, M Bibes, and A Barthélémy. Spintronics with multiferroics. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(43):434221, 2008.

- [4] Fumihiko Fukunaga and Nobuo Tsuda. On the Magnetism and Electronic Conduction of Itinerant Magnetic System $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$. *J. Phys. Soc. Japan*, 63(10):3798–3807, 1994.
- [5] Masatoshi Imada, Atsushi Fujimori, and Yoshinori Tokura. Metal-insulator transitions. *Rev. Mod. Phys.*, 70:1039–1263, 1998.
- [6] Olga Malinkiewicz, Aswani Yella, Yong Hui Lee, Guillermo Mínguez Espallargas, Michael Graetzel, Mohammad K. Nazeeruddin, and Henk J. Bolink. Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers. *Nat. Photonics*, 8(2):128–132, 2014.
- [7] H.-U. Habermeier, G. Cristiani, R.K. Kremer, O. Lebedev, and G. van Tendeloo. Cuprate/manganite superlattices: A model system for a bulk ferromagnetic superconductor. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 364-365:298 – 304, 2001.
- [8] C.A.R. Sá de Melo. Interplay of magnetism and superconductivity at the nanometer scale: the case of complex oxide heterostructures. *Physica C: Superconductivity*, 387:17 – 25, 2003.
- [9] L. R. Tagirov. Low-field superconducting spin switch based on a superconductor/ferromagnet multilayer. *Phys. Rev. Lett.*, 83:2058–2061, 1999.
- [10] T. R. Kirkpatrick, D. Belitz, Thomas Vojta, and R. Narayanan. Strong enhancement of superconducting T_c in ferromagnetic phases. *Phys. Rev. Lett.*, 87:127003, 2001.
- [11] Y. Tanaka and S. Kashiwaya. Anomalous charge transport in triplet superconductor junctions. *Phys. Rev. B*, 70:012507, 2004.
- [12] T. Hu, H. Xiao, C. Visani, Z. Sefrioui, J. Santamaria, and C. C. Almasan. Evidence from magnetoresistance measurements for an induced triplet superconducting state in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ multilayers. *Phys. Rev. B*, 80:060506, 2009.
- [13] Ya. V. Fominov, A. A. Golubov, T. Yu. Karinskaya, M. Yu. Kupriyanov, R. G. Deminov, and L. R. Tagirov. Superconducting triplet spin valve. *JETP Lett.*, 91:308–313, 2010.
- [14] Liang Fu. Topological Crystalline Insulators. *Phys. Rev. Lett.*, 106:106802, 2011.
- [15] Timothy H Hsieh, Hsin Lin, Junwei Liu, Wenhui Duan, Arun Bansil, and Liang Fu. Topological crystalline insulators in the SnTe material class. *Nat. Commun.*, 3:982, 2012.

K.D.

- [16] Tian Liang, Quinn Gibson, Jun Xiong, Max Hirschberger, Sunanda P. Koduvayur, R. J. Cava, and N. P. Ong. Evidence for massive bulk Dirac fermions in $\text{Pb}(1-x)\text{Sn}x\text{Se}$ from Nernst and thermopower experiments. *Nat. Commun.*, 4:3696, 2013.
- [17] W. Zawadzki, A. Raymond, and Kubisa M. Reservoir model for two-dimensional electron gases in quantizing magnetic fields: A review. *Phys. Status Solidi.*, 251:247–262, 2014.

4 Pozostała aktywność naukowa

Podczas mojego pobytu badawczego w Austrii (1998/2000 projekt TMR Wspólnoty Europejskiej) miałem unikalną możliwość badać heterostruktury GaAs/AlGaAs z dwuwymiarowym gazem elektronowym o wysokiej ruchliwości. Badane próbki były w reżimie całkowitego kwantowego efektu Halla w niskich temperaturach. Już wtedy było wiadomo, że przejścia plateau-plateau w kwantowym efekcie Halla mogą być z teoretycznego punktu widzenia traktowane jako zerotemperaturowe przejścia fazowe. Naszym zadaniem było wyznaczenie rozmaitych wykładników krytycznych związanych z rozmiarem systemu, temperaturą czy też częstotliwością [A1-A4]. Wykonywałem pomiary szerokości przejścia plateau-plateau metodą stałoprądową oraz zmiennoprądową w zakresie fal milimetrowych (20–60 GHz). Wspólna publikacja z grupą Profesora Haug'a z Hannoveru była kulminacją dwuletnich badań [A5].

- (A1) R Meisels, F Kuchar, and K Dybko. Temperature and frequency scaling of the quantum Hall effect. *ANNALEN DER PHYSIK*, 8:609, 1999.
- (A2) F Kuchar, R Meisels, K Dybko, and B Kramer. DC- and AC-scaling of the integer quantum Hall effect in the presence of interactions. *EUROPHYSICS LETTERS*, 49:480, 2000.
- (A3) K Dybko, R Meisels, F Kuchar, G Hein, and K Pierz. Dynamic scaling of the IQHE: evidence from millimeter wave experiments. In Miura, N and Ando, T, editor, *PROCEEDINGS OF THE 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF SEMICONDUCTORS, PTS I AND II*, volume 87 of *SPRINGER PROCEEDINGS IN PHYSICS*, pages 915. 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), OSAKA, JAPAN, SEP 17-22, 2000.
- (A4) R Meisels, K Dybko, F Ziouzia, F Kuchar, R Deutschmann, G Abstreiter, G Hein, and K Pierz. Millimeter wave and DC investigations of spin effects in the 2DES of AlGaAs/GaAs. *PHYSICA E*, 10:57, 2001.

- (A5) F Hohls, U Zeitler, RJ Haug, R Meisels, K Dybko, and F Kuchar. Dynamical scaling of the quantum Hall plateau transition. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 89, 276801, 2002.
- (A6) F Hohls, U Zeitler, RJ Haug, R Meisels, K Dybko, and F Kuchar. A generalized treatment of the dynamical scaling of the quantum Hall plateau transition. PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES, 16:10, 2003.

Od momentu powstania rozpocząłem współpracę z grupą MBE w Instytucie Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk kierowaną przez prof. dr. hab. Czesława Skierbiszewskiego. Mój obszar zainteresowań obejmuje badania własności gazu dwuwymiarowego w heterostrukturach GaN/AlGa_N metodami transportu klasycznego i kwantowego. W pierwszej wspólnej publikacji [B1] osiągnęliśmy (i utrzymaliśmy przez około dwa miesiące) światowy rekord wysokiej ruchliwości elektronów w heterostrukturze GaN/AlGa_N ($110\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ w temperaturze ciekłego helu). Próbką ta także wykazywała bardzo wyraźny kwantowy efekt Halla w temperaturze 0.3 K. Ta i inne próbki o podobnie wysokiej jakości zostały użyte przez nas do pomiarów aktywacyjnych w reżimie kwantowego efektu Halla. Pomiaru takie dostarczają informacji o renormalizacji masy efektywnej i efektywnego g-czynnika wywołane oddziaływaniem elektron-elektron [B4]. W pracy [B3] znalazłem wytłumaczenie dla rezonansów obserwowanych w standardowej spektroskopii ESR, jako będących wywołanymi przez sprzężone mody plasmonowo – cyklotronowe. Pokazaliśmy również, że fakt ten dostarcza łatwej bezkontaktowej metody do charakteryzacji systemów dwuwymiarowych. Inne prace wynikające z tej współpracy wymieniam poniżej:

- (B1) C Skierbiszewski, K Dybko, W Knap, M Siekacz, W Krupczynski, G Nowak, M Bockowski, J Lusakowski, ZR Wasilewski, D Maude, T Suski, and S Porowski. High mobility two-dimensional electron gas in AlGa_N/Ga_N heterostructures grown on bulk Ga_N by plasma assisted molecular beam epitaxy. APPLIED PHYSICS LETTERS, 86, 102106, 2005.
- (B2) W Knap, C Skierbiszewski, K Dybko, J Lusakowski, M Siekacz, I Grzegory, and S Porowski. Influence of dislocation and ionized impurity scattering on the electron mobility in Ga_N/AlGa_N heterostructures. JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, 281, 194, 2005.
- (B3) Agnieszka Wolos, Wolfgang Jantsch, Krzysztof Dybko, Zbysław Wilamowski, and Czesław Skierbiszewski. Plasmon-cyclotron resonance in two-dimensional electron gas confined at the Ga_N/Al_xGa_{1-x}N interface. PHYSICAL REVIEW B 76, 045301, 2007.

- (B4) M. Siekacz, K. Dybko, D. Maude, M. Potemski, W. Knap, and C. Skierbiszewski. Electron-electron interaction effects in quantum hall regime of GaN/AlGaIn heterostructures. ACTA PHYSICA POLONICA A, 112, 269, 2007.
- (B5) K. Dybko, M. Siekacz, and C. Skierbiszewski. Zero Field Spin Splitting in GaN/AlGaIn Heterostructures Probed by the Weak Antilocalization. ACTA PHYSICA POLONICA A, 114, 1109, 2008.
- (B6) M. Czapkiewicz, G. Cywinski, K. Dybko, M. Siekacz, P. Wolny, S. Gieraltowska, E. Guziewicz, C. Skierbiszewski, and J. Wrobel. Electrostatic Gates for GaN/AlGaIn Quantum Point Contacts. ACTA PHYSICA POLONICA A, 122, 1026, 2012.
- (B7) Henryk Turski, Grzegorz Muziol, Marcin Siekacz, Pawel Wolny, Krzesimir Szkularek, Anna Feduniewicz-Zmuda, Krzysztof Dybko, and Czeslaw Skierbiszewski. Growth rate independence of Mg doping in GaN grown by plasma-assisted MBE. JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, 482, 56, 2018.

Inny rodzaj mojej aktywności badawczej związany jest z własnościami termoelektrycznymi materii skondensowanej. Opracowałem i zbudowałem niezbędny układ doświadczalny potrzebny do określania skuteczności termoelektrycznej konwersji energii cieplnej w elektryczną, ZT. Zasada działania polega na pomiarach oporu metodą stałoprądową i zmiennoprądową w ustalonej temperaturze przy poprawnym uwzględnieniu strat przez promieniowanie. W literaturze metoda jest znana pod nazwiskiem Harmana [C1]. W naszej grupie używaliśmy tej metody w badaniach materiałów p-n (Pb,Mn)Te oraz (Pb,Cd)Te. Były to podstawowe zadania realizowane w projekcie POIG "Nowoczesne Materiały i Innowacyjne Metody dla Przetwarzania i Monitorowania Energii" w latach 2009-2014. Wspomniane układy eksperymentalne będą służyć jako podstawowe narzędzia charakterystyczne w nowym projekcie otrzymanym przez Instytut Fizyki PAN w roku 2019 z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

- (C1) K. Dybko, M. Szot, A. Mycielski, A. Szczerbakow, P. Dziawa, M. Guziewicz, W. Knoff, E. Lusakowska, and T. Story. Efficient thermoelectric energy conversion in $\text{Pb}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Te}$ p-n couple. APPLIED PHYSICS LETTERS, 108, 133902, 2016.
- (C2) Michal Szot, Krzysztof Dybko, Piotr Dziawa, Leszek Kowalczyk, Viktor Domukhovski, Badri Taliashvili, Anna Reszka, Bogdan Kowalski, Piotr Dłuzewski, Maciej Wiater, Tomasz Wojtowicz, and Tomasz Story. Electric and thermoelectric properties of CdTe/PbTe epitaxial nanocomposite. FUNCTIONAL MATERIALS LETTERS, 7, 1440007, 2014.

- (C3) Michal Szot, Krzysztof Dybko, Piotr Dziawa, Leszek Kowalczyk, Ewa Smajek, Viktor Domukhovski, Badri Taliashvili, Piotr Dłuzewski, Anna Reszka, Bogdan J. Kowalski, Maciej Wiater, Tomasz Wojtowicz, and Tomasz Story. Epitaxial Zinc-Blende CdTe Antidots in Rock-Salt PbTe Semiconductor Thermoelectric Matrix. CRYSTAL GROWTH & DESIGN, 11, 4794, 2011.
- (C4) V Osinniy, A Jedrzejczak, W Domuchowski, K Dybko, B Witkowska, and T Story. $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals as a new thermoelectric material. ACTA PHYSICA POLONICA A, 108, 809, 2005.
- (C5) P Lazarczyk, MV Radchenko, GV Lashkarev, T Story, K Dybko, and RR Galazka. Determination of the band structure of $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_y\text{Mn}_x\text{Te}$ semimagnetic semiconductors from thermoelectric power studies. SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 13, 989, 1998.

K. Dybko