

## STRESZCZENIE

Prace nad magnetycznymi izolatorami topologicznymi stanowią dziedzinę badań łączącą kwantowy transport spinu, intensywnie rozwijany w ostatnich dekadach w kontekście rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych, ze stosunkowo niedawno wprowadzonym podejściem do transportu kwantowego opartym na koncepcji topologii. W materiałach tych występują kanały przewodnictwa odporne na rozpraszanie, co czyni je atrakcyjnymi do zastosowania w technologiach kwantowych. Główne wyzwanie stanowi uzyskanie kontrolowanego dostępu do stanów elektronowych odpowiedzialnych za bezdyssypacyjny transport, co wymaga dogłębnego zrozumienia magnetyzmu w badanym magnetycznym izolatorze topologicznym.

Niniejsza rozprawa poświęcona jest magnesom topologicznym opartym na związku  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  domieszkowanym Mn zawierającym samorganizowane warstwy septetowe  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  w matrycy  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Badano dwa aspekty wpływające na właściwości magnetyczne i magnetotransportowe tych układów: rolę nieporządku w strukturze krystalicznej oraz rolę położenia poziomu Fermiego.

Przy użyciu mikroskopii elektronowej zidentyfikowano planarne porządkowanie się Mn w formie  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  w matrycy  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  i towarzyszące temu zaburzenia struktury krystalicznej, związane z rozmieszczeniem manganu: domieszkowanie Mn do warstw kwintetowych oraz deficyt Mn w warstwach septetowych (w stosunku do idealnej formuły  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ). Zaburzenia te mają istotne znaczenie dla magnetyzmu układów  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ .

Pomiary rezonansu ferromagnetycznego wykazały, że obecność Mn w warstwach  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  umożliwia sprzęganie się warstw  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  i jest niezbędna do ferromagnetycznej stabilizacji układu w trzech wymiarach. Ujawniły również istotny wpływ termicznych fluktuacji spinów na międzypowierzchniach na międzylarstwową energię wymiany.

Z kolei, deficyt Mn w warstwach septetowych obniża temperaturę Curie poniżej wartości charakterystycznej dla pojedynczej, ale idealnej, warstwy  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ . Nieporządek ten również istotnie modyfikuje powierzchniową strukturę pasmową układu  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$  w stosunku do jego niezaburzonej formy, co zostało zbadane z użyciem kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej i porównane z wynikami obliczeń w ramach teorii funkcjonału gęstości.

Do oceny wpływu zmian poziomu Fermiego na właściwości magnetyczne izolatorów topologicznych z warstwami  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ , przeprowadzono pomiary rezonansu ferromagnetycznego. Położenie poziomu Fermiego zmieniano poprzez niskotemperaturowe

naświetlanie wiązką elektronów, a następnie realizując odpowiednie etapy wygrzewania na tej samej próbce. Stwierdzono, że magnetyzm objętościowy jest niezależny od położenia poziomu Fermiego, wykluczając tym samym rolę swobodnych nośników w uporządkowaniu ferromagnetycznym w magnetycznych izolatorach topologicznych z warstwami  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ .

Ponadto pomiary magnetotransportowe przeprowadzone na próbkach przed i po naświetlaniu sugerują dominujący wpływ mechanizmu krzywizny Berry'ego na objętościowy anomalny efekt Halla. Zaobserwowano, że wielkość anomального efektu Halla zmienia się niemonotonicznie w zależności od położenia poziomu Fermiego. Jest to zgodne z teoretycznymi oczekiwaniami stwierdzającymi, że nieskwantowana anomalna przewodność Halla dąży do zera, gdy poziom Fermiego przesuwają się w głąb pasma walencyjnego (lub pasma przewodnictwa). Wynika to z właściwości krzywizny Berry'ego, która jest skoncentrowana w obszarach struktury pasmowej określanych jako „*avoided crossings*”. Uzyskane rezultaty pokazują, że wielkość anomального efektu Halla można efektywnie wzmacniać lub tłumić poprzez precyzyjne manipulowanie położeniem poziomu Fermiego.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki znacząco przyczyniają się do zrozumienia właściwości magnetycznych, magnetotransportowych oraz powierzchniowej struktury pasmowej magnetycznych izolatorów topologicznych z warstwami  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ . Jednocześnie przybliżają one do osiągnięcia kontrolowanego dostępu do efektów magnetotopologicznych, w tym kwantowego anomального efektu Halla, w tych materiałach.

## ABSTRACT

Research into magnetic topological insulators bridges the realms of quantum spin transport, vigorously pursued in recent decades within the framework of diluted magnetic semiconductors, and the relatively novel approach to quantum transport grounded in topological concepts. These materials exhibit conduction channels that are immune to scattering, marking them as promising candidates for quantum technologies. The main challenge remains gaining controlled access to the electronic states responsible for dissipationless transport. Achieving this hinges on a profound comprehension of the magnetism within the investigated magnetic topological insulator system.

This dissertation is dedicated to topological magnets based on Mn-doped  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  compound, focusing on ferromagnetic materials with self-organized  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  septuple layers in the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  matrix. Two key aspects affecting the magnetic and magnetotransport properties of these systems were analyzed: the role of disorder in the crystalline structure and the role of the Fermi level position.

Using electron microscopy, the planar ordering of Mn in the form of  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layers within the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  matrix was identified, along with accompanying disorders in the crystal structure related to Mn distribution: Mn doping into quintuple layers of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and a Mn deficiency in septuple layers compared to the ideal  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  formula. These defects are crucial for the magnetism of the  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$  systems.

Ferromagnetic resonance measurements showed that the presence of Mn in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  layers facilitates the coupling of  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layers and is necessary for three-dimensional ferromagnetic stabilization of the system. They also revealed the significant influence of thermal spin fluctuations at interfaces on the interlayer exchange energy.

In turn, a deficit of Mn in septuple layers results in a reduction of the Curie temperature below the value characteristic of a single, but ideal,  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layer. This disorder also significantly modifies the surface band structure of the  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$  system relative to the undisturbed one. These changes were explored using angle-resolved photoemission spectroscopy and compared with the density functional theory calculations.

To assess the impact of changes in the Fermi level on the magnetic properties of topological insulators with  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layers, ferromagnetic resonance measurements were carried out. The Fermi level was adjusted by low-temperature electron beam irradiation, followed by appropriate annealing steps on the same sample. It was determined that bulk magnetism is independent of the Fermi level position, thereby excluding the role of free carriers in the ferromagnetic ordering of magnetic topological insulators with  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layers.

Additionally, magnetotransport measurements conducted on samples before and after irradiation suggest a dominant influence of the Berry curvature mechanism on the bulk anomalous Hall effect. It was observed that the magnitude of the anomalous Hall effect, changes non-monotonically depending on the position of the Fermi level. This aligns with theoretical expectations stating that the non-quantized anomalous Hall conductivity tends to zero when the Fermi level moves deep into the valence (or conduction) band. This arises from the property of the Berry curvature, which is concentrated in band structure areas referred to as “*avoided crossings*”. The obtained results demonstrate that the magnitude of the anomalous Hall effect can be effectively amplified or suppressed by precisely manipulating the position of the Fermi level.

The findings presented in this dissertation provide a deeper understanding of the magnetic, magnetotransport, and surface band structure of magnetic topological insulators with  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  layers. Furthermore, they pave the way for achieving controlled access to magnetotopological phenomena, such as the quantum anomalous Hall effect, within these materials.