

Детектирование поверхностных электронных состояний в топологических изоляторах $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ с помощью лазерного терагерцового излучения

А. В. Галеева^{1,*}, С. Г. Егорова¹, В. И. Черничкин¹, В. В. Румянцева², С. В. Морозов²,
М. Е. Тамм³, Л. В. Яшина³, С. Н. Данилов⁴, Л. И. Рябова³, Д. Р. Хохлов^{1,5}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики и физики конденсированного состояния
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики микроструктур РАН
Россия, 607680, Нижний Новгород, ул. Академическая, д. 7

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

⁴Университет Регенсбурга, Регенсбург, D-93053, Германия

⁵Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

На примере твердых растворов $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ в диапазоне составов, соответствующих как топологической ($x < 0.05$), так и тривиальной ($x > 0.06$) фазе продемонстрировано, что использование комбинированного воздействия терагерцового лазерного излучения и магнитного поля может оказаться эффективным методом детектирования поверхностных состояний в топологических изоляторах. Обнаружено, что в топологической фазе амплитуда фотоэлектромагнитного эффекта определяется числом падающих квантов, тогда как в тривиальном полупроводнике — мощностью падающего излучения.

PACS: 71.20.Nr

УДК: 537.312.5, 537.311.322

Ключевые слова: топологический изолятор, терагерцовое излучение, транспорт, фотоэлектромагнитный эффект.

Топологические изоляторы (ТИ) представляют собой материалы, электронный энергетический спектр которых в объеме характеризуется наличием запрещенной зоны, тогда как в спектре носителей на поверхности энергетическая щель отсутствует, состояния описываются линейным законом дисперсии и оказываются поляризованными по спину. Экспериментальное обнаружение таких топологических состояний в узкощелевом полупроводнике Bi_2Se_3 повлекло за собой многочисленные исследования транспортных свойств, связанных с существованием топологического слоя на поверхности. Для обоснованного отождествления наблюдаемых особенностей транспорта с проявлением вклада дираковских состояний представляется целесообразным сопоставить экспериментальные результаты, соответствующие топологической и тривиальной фазам. Настоящая работа посвящена исследованию твердых растворов $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$, в которых переход из фазы ТИ с инверсным энергетическим спектром в тривиальное состояние с прямым спектром происходит в диапазоне составов $x = 0.03 - 0.07$ [1, 2].

Монокристаллы $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ ($0 \leq x \leq 0.18$) были синтезированы методом Бриджмена. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что образцы обладают кристаллической структурой тетрадимита. Состав твердых растворов уточнен методом рентгенофлуоресцентного

анализа. С помощью спектроскопии фотолюминесценции были уточнены детали перестройки энергетического спектра и определен состав $x = 0.055$, соответствующий бесщелевому состоянию. Холловские измерения показали, что все образцы являются вырожденными узкощелевыми полупроводниками n -типа с концентрацией свободных электронов $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Столь высокая концентрация носителей в объеме требует применения методик, не чувствительных к явлениям переноса в объеме образца и позволяющих зарегистрировать транспорт на поверхности. Для детектирования поверхностных состояний в работе используется метод, основанный на фотоэлектромагнитном (ФЭМ) эффекте [3]. Суть эффекта заключается в возникновении разности потенциалов вследствие диффузии в магнитном поле неравновесных носителей, возбуждаемых терагерцовым лазерным импульсом в приповерхностном слое образца. Исследование ФЭМ эффекта проводилось в области температур 4.2–20 К в магнитных полях до 7 Тл. Длины волн лазерного излучения λ составляли 90 мкм, 148 мкм и 280 мкм. Мощность излучения, падающего на образец, варьировалась с помощью аттенуаторов и не превышала 10 кВт.

ФЭМ эффект наблюдался при $T < 14 \text{ К}$ во всех исследованных образцах при всех трех значениях λ . Сигнал ФЭМ эффекта не задержанный, повторяет форму лазерного импульса и изменяет знак при коммутации магнитного поля. В слабых магнитных полях $B < \sim 1.5 \text{ Т}$ амплитуда ФЭМ эффекта $U_{\text{ФЭМ}}$ линей-

*E-mail: galeeva@physics.msu.ru

но зависит от индукции магнитного поля (рис. 1). При дальнейшем увеличении магнитного поля зависимость $U_{\text{ФЭМ}}(B)$ насыщается. По знаку эдс установлено, что результирующий поток частиц направлен от поверхности в объем образца.

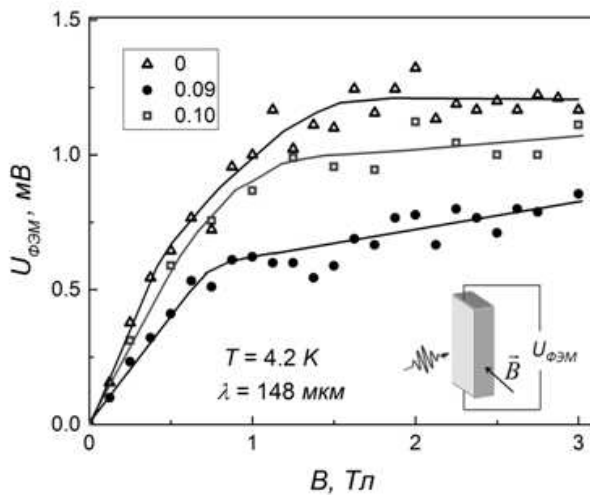


Рис. 1: Зависимость амплитуды ФЭМ эффекта от индукции магнитного поля для составов $x = 0$; 0.09 ; 0.10 . На вставке показана схема эксперимента

Фотопроводимость в исследованных образцах не обнаружена. Так как энергия кванта терагерцового излучения (~ 10 мэВ) значительно меньше энергии Ферми в исследуемых твердых растворах (~ 130 мэВ), то генерация носителей маловероятна. Возникающий ненулевой поток электронов может быть обусловлен разогревом электронного газа в приповерхностном слое толщиной ~ 1 мкм (толщина скин-слоя) и градиентом

подвижности. Поскольку при $T < 14$ К подвижность в исследуемых твердых растворах лишь незначительно падает с ростом температуры, то регистрируемый поток электронов в направлении от поверхности обусловлен существованием высокоподвижных носителей на поверхности образца. Важно, что поверхностные носители с повышенной подвижностью наблюдаются как в ТИ, так и в тривиальном полупроводнике.

Результаты исследования ФЭМ эффекта в условиях варьируемой мощности падающего излучения, проведенного для составов $x = 0$ (инверсный энергетический спектр, ТИ) и $x = 0.12$ (прямой спектр, тривиальная фаза), указывают на качественно различный характер процессов в этих образцах. В образце с $x = 0.12$ регистрируемая эдс является однозначной функцией мощности излучения. Фотоэдс в образце Bi_2Se_3 оказывается одинаковой в пересчете на мгновенное значение числа падающих фотонов. Наблюдаемые особенности мощностных зависимостей ФЭМ эффекта, вероятно, связаны с фундаментальным отличием свойств поверхностных носителей в тривиальном и топологическом состоянии. В тривиальной фазе электронная температура поверхностных носителей устанавливается сравнительно быстро ($t \sim 100$ фс), и напряжение $U_{\text{ФЭМ}}$ определяется градиентом электронной температуры, которая зависит от мощности падающего излучения. Принципиально квантовая природа ФЭМ эффекта в ТИ может быть связана с замедленной термализацией электронного газа и определяющей ролью диффузии нетермализованных носителей. Можно предположить, что уменьшение времени термализации обусловлено эффективным подавлением электрон-электронного взаимодействия вследствие спиновой поляризации носителей в топологическом слое.

[1] Brahlek M. et al. Phys. Rev. Lett. **109**, 186403. (2012).
[2] Wu L. et al. Nat. Phys. **9**, P. 410. (2013).

[3] Кикоин И. К., Лазарев С. Д. УФН. **124**, P. 597. (1978).

Detection of surface electron states in topological insulators $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ using laser terahertz radiation

A.V. Galeeva^{1, a}, S.G. Egorova¹, V.I. Chernichkin¹, V.V. Rumyantsev², S.V. Morozov², M.E. Tamm³, L.V. Yashina³, S.N. Danilov⁴, L.I. Ryabova³, D.R. Khokhlov^{1,5}

¹Faculty of Physics,

M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Institute for Physics of Microstructures RAS, Moscow, Russia

³Faculty of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

⁴Regensburg University, Germany

⁵P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: ^agaleeva@physics.msu.ru

In this work, we show that the use of terahertz laser radiation combined with magnetic field may be an effective tool for detection of topological surface states which is demonstrated for the case of $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ solid solutions being either in topological

($x < 0.05$) or trivial ($x > 0.06$) phase. It is revealed that for the topological phase, the photoelectromagnetic effect amplitude is defined by the number of incident radiation quanta, whereas for the trivial phase, it depends on the power of a laser pulse irrespective of its wavelength.

PACS: : 71.20.Nr

Keywords: topological insulators, terahertz radiation, transport, photoelectromagnetic effect.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Галеева Александра Викторовна — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-11-51, e-mail: galeeva@physics.msu.ru.
2. Егорова Светлана Германовна — аспирантка; тел. (495) 939-11-51, e-mail: egorovasve@mail.ru
3. Черничкин Владимир Игоревич — мл. науч. сотрудник; тел. (495) 939-11-51, e-mail: chernichkin@physics.msu.ru
4. Тамм Марина Евгеньевна — канд. хим. наук, доцент; тел.: (495) 939-46-65, e-mail: tamm@inorg.chem.msu.ru.
5. Яшина Лада Валерьевна — докт. хим. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-46-65, e-mail: yashina@inorg.chem.msu.ru.
6. Румянцев Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 417-94-982, e-mail: rummyantsev@ipm.sci-nnov.ru.
7. Морозов Сергей Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (831) 438-50-37, e-mail: more@ipm.sci-nnov.ru.
8. Данилов Сергей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: +49 (941) 943-20-50, e-mail: danilov@physik.uni-regensburg.de.
9. Рябова Людмила Ивановна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел. (495) 939-11-51, e-mail: mila@mig.phys.msu.ru.
10. Хохлов Дмитрий Ремович — член-корр. РАН, профессор, заведующий кафедрой; тел. (495) 939-11-51, e-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru.