

УДК 537.9

ЭФФЕКТ ПОЛЯ И СПИН-ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ИЗОЛЯТОРЕ PbSnTe

© А. С. Тарасов¹, В. А. Голяшов¹, Д. В. Ищенко¹, И. О. Ахундов¹,
А. Э. Климов^{1,2}, В. С. Эпов¹, А. К. Кавеев³, С. П. Супрун¹,
В. Н. Шерстякова¹, О. Е. Терещенко¹

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
E-mail: teresh@isp.nsc.ru

Исследованы характеристики структур металл—диэлектрик—проводник на основе изолирующих плёнок PbSnTe:In с составами вблизи инверсии зон, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что ряд их особенностей может быть вызван сегнетоэлектрическим фазовым переходом с температурой Кюри в диапазоне 15–20 К. Получены результаты по инжекции и детектированию спин-поляризованных электронов в PbSnTe:In с использованием ферромагнитных контактов Co и Co₄₀Fe₄₀B₂₀. Обнаружен спин-вентильный эффект при измерении магнетосопротивления в локальной геометрии на удалении ферромагнитных контактов более 30 мкм. Методом фотоэмиссии с угловым и спиновым разрешением показано наличие поверхностного спин-поляризованного состояния с линейным законом дисперсии.

Ключевые слова: твёрдый раствор PbSnTe:In, эффект поля, спин-вентильный эффект.

DOI: 10.15372/AUT20200514

Введение. Кристаллические топологические изоляторы расширяют класс трёхмерных топологических изоляторов (ТИ), чьи экзотические поверхностные состояния защищены кристаллической симметрией, а не симметрией обращения времени. Такие материалы характеризуются уникальной электронной и спиновой структурой: одновременным наличием объёмной запрещённой зоны и дираковским конусом спин-поляризованных поверхностных состояний проводимости, формируемых вследствие сильного спин-орбитального взаимодействия. Для выделения поверхностного транспорта и, как следствие, потенциального применения ТИ в спинтронике важно иметь суммарное удельное сопротивление, величину которого преимущественно определяют топологически защищённые поверхностные состояния. Несмотря на большие усилия сделать материал ТИ на основе Bi₂Se₃ и его сплавов с низкой концентрацией объёмных носителей заряда, не удаётся повысить его объёмное удельное сопротивление выше нескольких Ом·см. Твёрдый раствор Pb_{1-x}Sn_xTe открывает новые возможности для изучения проявления топологических свойств поверхностного состояния в транспортных измерениях. Соединение PbTe ($x = 0$) является тривиальным изолятором, при $x \approx 0,30-0,35$ происходит топологический квантовый фазовый переход, связанный с инверсией зон, и появляется нетривиальное поверхностное состояние. Ширина запрещённой зоны твёрдого раствора Pb_{1-x}Sn_xTe зависит от состава и температуры и лежит в интервале $E_g \approx 0-0,4$ эВ. В настоящее время особый интерес связан с составами

вблизи $x_{inv} \approx 0,35$, где при гелиевых температурах происходит инверсия краёв разрешённых зон, а E_g стремится к нулю. В области инверсии зон $x > x_{inv}$ PbSnTe находится в фазе топологического кристаллического изолятора (ТКИ) [1], а в области $x \approx 0,22-0,3 < x_{inv}$ при добавлении в PbSnTe индия с концентрацией до нескольких ат. % может быть реализовано «изолирующее» состояние PbSnTe:In с крайне низкой проводимостью [2]. Существуют данные, что фаза ТКИ может наблюдаться в плёнках PbSnTe:In даже при $x < 0,35$, а «изолирующее» состояние — в том числе и при $x > 0,3$. Таким образом, имеется потенциальная возможность совместить эти две особенности PbSnTe в одной области $x \approx 0,3-0,35$. Это представляет особый интерес для задач спинтроники, так как в этом случае связанная с дираковскими состояниями поверхностная проводимость не будет «шунтироваться» высокой проводимостью объёма. Помимо этого, известно, что SnTe и PbTe являются нормальными и виртуальными сегнетоэлектриками соответственно, а в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ температура Кюри (T_C) зависит от состава x [3], в частности, при $x > 0,2-0,24$ температура Кюри > 20 К. В этом случае составы исследованных в данной работе плёнок PbSnTe:In таковы, что при гелиевых температурах они должны находиться в сегнетоэлектрической фазе. При этом спонтанная и вынужденная поляризации, а также доменная структура плёнок могут проявляться в ряде особенностей PbSnTe:In структур МДП и, по-видимому, должны учитываться в дальнейшем при анализе свойств, связанных с особенностями ТКИ PbSnTe.

Цель данной работы — изучение эффекта поля и спин-вентильного эффекта в кристаллическом топологическом изоляторе PbSnTe для создания спин-зависимой транзисторной структуры.

Описание эксперимента. В качестве образцов в данной работе использовались плёнки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ состава $x \approx 0,3$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках BaF_2 . В настоящее время нами создана двухкамерная установка молекулярно-лучевой эпитаксии на базе камер «Катунь», позволяющая в первой камере растить буферные слои CaF_2/BaF_2 на подложках Si, а во второй камере — эпитаксиальные слои $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Кроме того, проводятся работы по созданию сверхвысоковакуумной установки молекулярно-лучевой эпитаксии как плёнок буферных слоёв, так и плёнок топологических изоляторов в одной камере. Выращивание ферромагнитных слоёв (Co и CoFeB) проводилось методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на основе эксимерного лазера COMPEX 201 ($\lambda = 248$ нм) [4, 5]. Намагниченность тонких ферромагнитных плёнок измерялась с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОЭК). Измерения магнетосопротивления проводились четырёхконтактным методом на переменном токе 10 мкА с частотой 1 кГц при $T = 4,2$ К. В ряде экспериментов приготавливалась поверхность плёнки $Pb_{1-x}Sn_xTe$, свободная от собственных оксидов [6, 7].

Результаты и обсуждение. В работе исследованы структуры МДП, в которых в качестве диэлектрика использовалась майларовая плёнка толщиной 8 мкм. Схематичное изображение экспериментальной структуры приведено на рис. 1. Исток и сток n^+ -типа проводимости были разделены изолирующим каналом шириной 50 мкм или менее. Монокристаллические плёнки PbSnTe с подвижностью электронов в области температур $T \approx 30-40$ К свыше $3 \cdot 10^4$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Области истока и стока были сформированы вакуумным напылением индия толщиной около 150 нм с последующим диффузионным отжигом. Плёнка из майлара в области канала прижималась механически к поверхности PbSnTe:In металлическим полевым электродом (затвором), поверхность которого со стороны PbSnTe:In была выполнена из «толстого» индия. Такая конструкция позволяла, в частности, проводить дополнительную обработку поверхности PbSnTe:In для выявления её роли в наблюдаемых особенностях структур МДП. Однако эти результаты выходят за рамки представленной работы.

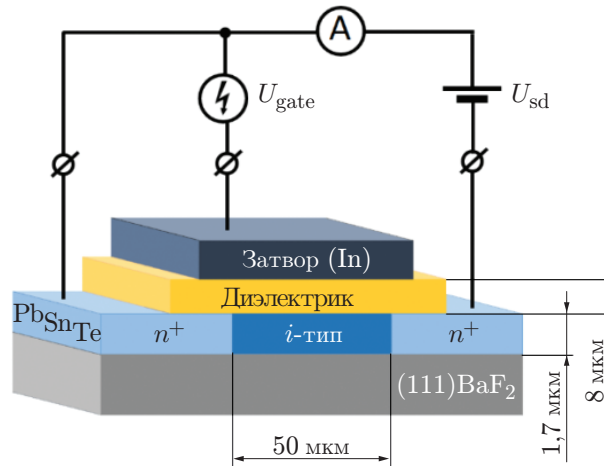


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной структуры МДП

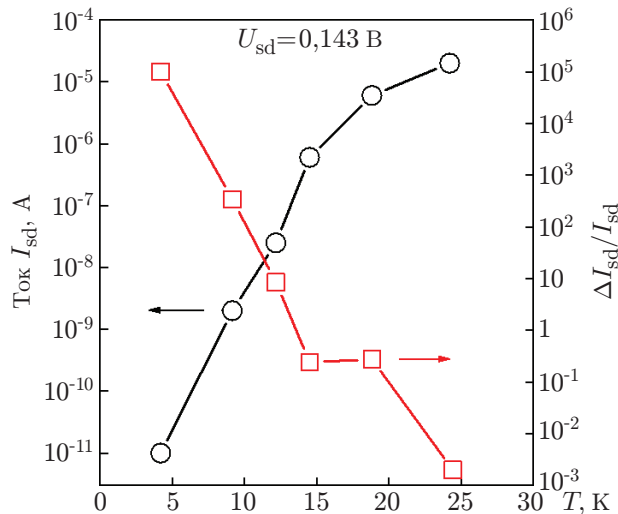


Рис. 2. Температурные зависимости тока исток/сток I_{sd} (круги, левая шкала) и характерного максимального относительного изменения $\Delta I_{sd}/I_{sd}$ (квадраты, правая шкала) при приложении к структуре МДП затворного напряжения $U_{gate} = +1250$ В. Погрешность определения I_{sd} и $\Delta I_{sd}/I_{sd}$ не превышает размеров соответствующих символов по оси ординат

В интервале $T \approx 4,2-30$ К измерялся ток в канале при разных зависимостях затворного напряжения U_{gate} от времени.

На рис. 2 (круги и левая шкала) показана температурная зависимость тока канала I_{sd} при $U_{gate} = 0$ и напряжении исток/сток $U_{sd} = 0,143$ В. Квадраты и правая шкала отображают характерное максимальное изменение тока канала $\Delta I_{sd}/I_{sd}$ при $U_{gate} = +1250$ В. Погрешность определения I_{sd} и $\Delta I_{sd}/I_{sd}$ не превышает размеров соответствующих символов по оси ординат. Видно, что в области $T \approx 15-20$ К, по ряду данных близкой к T_C , для исследованного состава PbSnTe:In наблюдается особенность в виде «излома». На рис. 3 приведена зависимость тока канала структуры МДП от затворного напряжения при более высоком напряжении исток/сток $U_{sd} = 2,46$ В. Скорость изменения напряжения затвора $U'_{gate} = \pm 25$ В/с, $T = 4,2$ К. Гистерезис характеристики обусловлен «медленными» поверхностными состояниями. В областях $U_{gate} \approx -0,41-1,25$ кВ (верхняя ветка) и

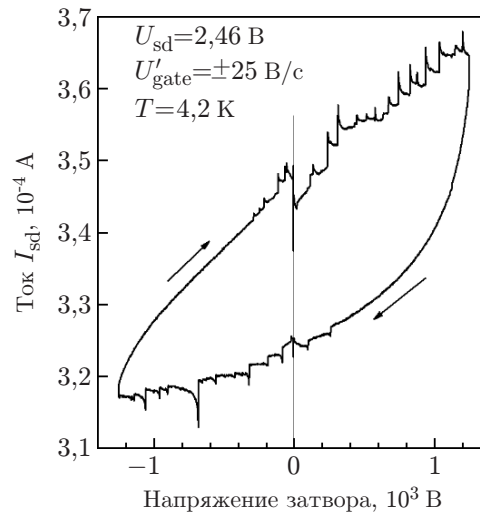


Рис. 3. Зависимость тока канала структуры МДП I_{sd} от напряжения затвора

$U_{gate} \approx -1,25-0,4$ кВ (нижняя ветка) видны «выбросы», которые отсутствуют при уменьшении $|U_{gate}|$ от максимальных до почти нулевых значений. Особенности характеристики согласуются с моделью, учитывающей наличие медленных поверхностных состояний и предполагающей наличие некоторого количества сегнетоэлектрических доменов в канале. Выбросы в этом случае объясняются вынужденной реполяризацией доменов под действием поля затвора, ведущей к резкому изменению распределения электрического поля и величины тока в канале. Области напряжений, в которых такие выбросы наблюдаются или отсутствуют, объясняются тем, что на домены действует суперпозиция внешнего (затворного) электрического поля и поля локализованного поверхностного заряда ловушек, сравнимого по величине с полем затвора.

Измерения, проведённые методом фотоэмиссии с угловым и спиновым разрешением, выявили наличие поверхностного состояния с линейным законом дисперсии дираковского типа, при этом уровень Ферми находится в запрещённой зоне и пересекает поверхностное состояние в точке Дирака [4]. Измерение спиновой поляризации фотоэлектронов, эмитированных из поверхностных состояний, показало наличие геликоидальной спиновой текстуры и значение поляризации свыше 30 %. Более того, состояния в зоне Бриллюэна с большей энергией связи также являются поляризованными по спину.

Для изучения спин-зависимого транспорта были изготовлены структуры с парой ферромагнитных контактов Co и $Co_{40}Fe_{40}B_{20}$, осаждённых через маски на поверхность плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ на различном расстоянии друг от друга, что соответствует геометрии измерения локального спин-вентильного эффекта. Методом МОЭК было установлено, что лёгкая ось намагниченности контактов лежит в плоскости поверхности, магнитные свойства изотропны в ней, а коэрцитивные поля составляют 10 и 5 мТ для контактов Co и CoFeB соответственно. На рис. 4 показана зависимость магнетосопротивления планарной структуры Co/ $Pb_{1-x}Sn_xTe$ /Co $_{40}Fe_{40}B_{20}$ для различных направлений магнитного поля \mathbf{B} в плоскости образца. Для всех ориентаций магнитного поля при его развёртке в магнетосопротивлении наблюдается гистерезис в области полей, который согласуется с коэрцитивными полями ферромагнитных контактов. Направление 90° соответствует перпендикулярной ориентации поля \mathbf{B} относительно направления тока между контактами. Разница значений сопротивлений при параллельном ($R_{пар}$) и антипараллельном ($R_{анти}$) направлениях намагниченности инжекционного и детектирующего контактов $\Delta R/R_{пар}$ составляет около 0,15 %. Величина спин-вентильного эффекта зависит от соотношения межконтактного

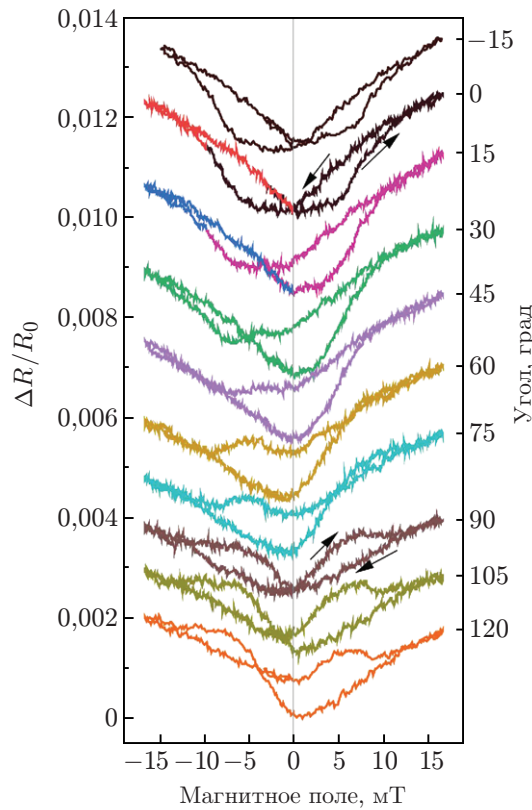


Рис. 4. Зависимость магнетосопротивления между ферромагнитными контактами от магнитного поля при вращении \mathbf{B} в плоскости образца. Ноль градусов соответствует параллельному направлению поля \mathbf{B} и тока. Расстояние между контактами составляло 30 мкм

расстояния и длины спиновой релаксации. Так, например, величина спин-вентильного эффекта $\Delta R/R_{\text{пар}}$ в хорошо изученных InAs квантовых ямах составляет менее 0,029 % при межконтактном расстоянии около 2 мкм [8]. В образцах $\text{Pb}_{0,72}\text{Sn}_{0,28}\text{Te}$ отношение $\Delta R/R_{\text{пар}}$ достигло 0,15 % при расстоянии между контактами 30 мкм и уменьшалось только в 2 раза при разнесении контактов на расстояние до 100 мкм, что указывает на наличие значительной длины спиновой релаксации, оценочно превышающей несколько десятков микрометров. Возможным объяснением столь значительной длины спиновой релаксации является наличие спин-поляризованных поверхностных состояний, обнаруженных нами с помощью метода фотоэмиссии с угловым и спиновым разрешением. В геометрии, когда магнитное поле направлено вдоль направления тока 90° , знак эффекта меняется на противоположный, тогда как при промежуточных направлениях магнитного поля получилась смешанная зависимость магнетосопротивления.

Заключение. Ряд особенностей характеристик структур МДП на основе плёнок PbSnTe:In находит объяснение в рамках модели, предполагающей наличие в них сегнетоэлектрического фазового перехода и «медленных» поверхностных состояний. Это необходимо учитывать при анализе свойств PbSnTe:In с составами, близкими к фазе топологического изолятора, так как в этой же области могут проявляться и сегнетоэлектрические свойства. Показано, что в кристаллическом ТИ PbSnTe проявляется спин-вентильный эффект в локальной геометрии на удалении ферромагнитных контактов более 30 мкм. Ожидается проявление спин-зависимого транспорта в PbSnTe вплоть до комнатной температуры.

Финансирование. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-02-00575) и Российским научным фондом (грант № 17-02-01047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Liang T., Kushwaha S., Kim J. et al.** A pressure-induced topological phase with large Berry curvature in $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ // *Sci. Advances*. 2017. **3**, N 5. P. e1602510.
2. **Волков Б. А., Рябова Л. И., Хохлов Д. Р.** Примеси с переменной валентностью в твёрдых растворах на основе теллурида свинца // *Успехи физических наук*. 2002. **172**, вып. 8. С. 875–906.
3. **Lebedev A. I., Sluchinskaya I. A.** Ferroelectric phase transitions in IV-VI semiconductors associated with off-center ions // *Ferroelectrics*. 1994. **157**, N 1. P. 275–280.
4. **Kaveev A. K., Golyashov V. A., Klimov A. E. et al.** Structure and magneto-electric properties of Co-based ferromagnetic films grown on the $\text{Pb}_{0.71}\text{Sn}_{0.29}\text{Te}$ crystalline topological insulator // *Mater. Chem. and Phys.* 2020. **24**. P. 122134.
5. **Kaveev A. K., Suturin S. M., Sokolov N. S. et al.** A study of the crystal structure of $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ epitaxial films on a Bi_2Te_3 topological insulator // *Technical Phys. Lett.* 2018. **44**, N 3. P. 184–186.
6. **Tarasov A. S., Ishchenko D. V., Akimov A. N. et al.** Modification of the surface properties of $\text{PbSnTe}(\text{In})$ epitaxial layers with composition near band inversion // *Technical Phys.* 2019. **64**, N 11. P. 1704–1708.
7. **Климов А. Э., Акимов А. Н., Ахундов И. О. и др.** Динамика поверхностной проводимости в плёнках $\text{PbSnTe}:\text{In}$ с составом вблизи инверсии зон // *Физика и техника полупроводников*. 2019. **53**, вып. 9. С. 1207–1211.
8. **Коо Н. С., Yi H., Ко J. B. et al.** Electrical spin injection and detection in an InAs quantum well // *Appl. Phys. Lett.* 2007. **90**, N 2. P. 022101.

Поступила в редакцию 29.06.2020

После доработки 22.07.2020

Принята к публикации 27.07.2020
