

Динамика поверхностной проводимости в пленках PbSnTe : In с составом вблизи инверсии зон

© А.Э. Климов^{1,2}, А.Н. Акимов¹, И.О. Ахундов¹, В.А. Голяшов^{1,3}, Д.В. Горшков¹, Д.В. Ищенко¹, Г.Ю. Сидоров¹, С.П. Супрун¹, А.С. Тарасов¹, В.С. Эпов¹, О.Е. Терещенко^{1,3}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: klimov@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

При гелиевых температурах изучены особенности переходных процессов в эффекте поля в пленках PbSnTe:In с изменением тока до 10^5 раз, качественно соответствующие модели, в которой на поверхности PbSnTe:In имеется большая концентрация ловушек с различными параметрами. Роль поверхности подтверждается сильным изменением экспериментальных характеристик после химического удаления с поверхности PbSnTe:In собственных оксидов и ее пассивации слоем Al_2O_3 .

Ключевые слова: твердый раствор PbSnTe:In, эффект поля, поверхностная проводимость, МДП-структура.

DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48125.08

1. Введение

В твердых растворах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ при $x > 0.3-0.35$ происходит инверсия валентной зоны и зоны проводимости с переходом в состояние топологического кристаллического изолятора (ТКИ) [1,2] с появлением поверхностных состояний, имеющих дисперсию в виде конуса Дирака. Особый интерес представляют транспортные свойства ТКИ, обусловленные этими поверхностными дираковскими состояниями. Однако данные по исследованию поверхностного транспорта PbSnTe с помощью эффекта поля (ЭП) практически отсутствуют как для ТКИ-составов, так и для PbSnTe с нормальным энергетическим спектром. Использование ЭП существенно затруднено из-за большой статической диэлектрической проницаемости PbSnTe. Для указанных составов при низких температурах $\epsilon_{PbSnTe} > 2000$ [3]. По сравнению с другими полупроводниками такая величина ϵ ведет как к уменьшению напряженности внешнего электрического поля E на границе с PbSnTe до ста и более раз, так и к соответствующему уменьшению экранирующей E поверхностной плотности носителей заряда Δn_s . Так, например, для $E = 1.5 \cdot 10^6$ В/см при $\epsilon_{PbSnTe}/\epsilon_g > 100$, где ϵ_g — диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика в МДП-структуре, $\Delta n_s < 8.3 \cdot 10^8$ см⁻². Даже если плотность локализованных поверхностных состояний будет пренебрежимо мала по сравнению с Δn_s , изменение полной проводимости образцов толщиной 1 мкм окажется всего около 1% при концентрации $n_0 \approx 10^{15}$ см⁻³. Однако известно, что в силу особенностей фазовых диаграмм, электрической активности и

свойств собственных дефектов кристаллической решетки такие значения $n_0(p_0)$ практически не реализуемы ни для каких составов PbSnTe.

Ситуация меняется с добавлением индия в PbSnTe определенного состава. В таком случае при гелиевых температурах может быть реализовано даже изолирующее состояние PbSnTe:In [4]. Однако для ЭП появляется характерная для PbSnTe:In проблема высокой концентрации сравнительно „медленных“ ловушек, в том числе вблизи или на поверхности. В принципе снижение влияния таких ловушек на величину ЭП может быть достигнуто как разработкой соответствующей технологии подготовки и пассивации поверхности, так и за счет достаточно высокой скорости изменения E , при которой значительная часть ловушек не будет успевать перезарядиться. Исследование ЭП в PbSnTe:In в таких условиях и являлось целью настоящей работы.

2. Образцы и методика эксперимента

Исследовались пленки $Pb_{0.71}Sn_{0.29}Te:In$ толщиной 1.7 мкм, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии МЛЭ на подложке (111)BaF₂. Концентрация электронов составила $n_0 < 10^{13}$ см⁻³ при $T < 20$ К, максимальная подвижность $\mu \approx 3 \cdot 10^4$ см² · В⁻¹ · с⁻¹ при $T \approx 40$ К. Схема экспериментальной структуры показана на рис. 1 вместе с принципиальной измерительной схемой. Две контактные области (исток и сток) n^+ -типа проводимости к высокоомной области i -типа были сформированы напылением в вакууме слоя

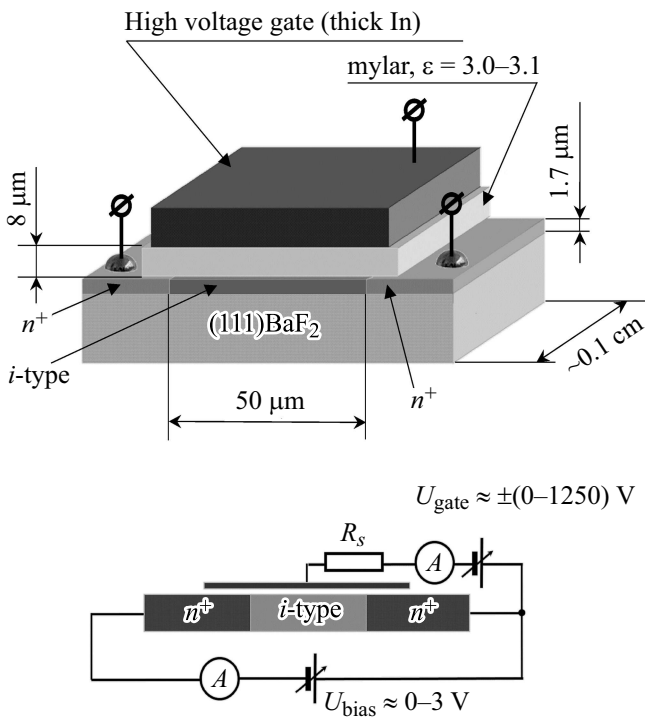


Рис. 1. Схема экспериментальной структуры (вверху) и принципиальная измерительная схема (внизу).

In толщиной ~ 200 нм с последующим диффузионным отжигом. Расстояние между контактами составило 50 мкм, протяженность контактов в зазоре 0.1 см. Как и в работе [5], в качестве изолятора в МДП-структуре была использована майларовая пленка толщиной 8 мкм. Это позволило нам измерить затворные характеристики одного и того же образца до и после обработки поверхности PbSnTe:In, находящейся под затворным майларовым диэлектриком, и сравнить их между собой. На расположенный над i -областью затвор подавалось напряжение $-1250 \text{ В} < U_{\text{gate}} < +1250 \text{ В}$ (электрическое поле $-1.56 \cdot 10^6 \text{ В/см} < E < +1.56 \cdot 10^6 \text{ В/см}$). На рис. 2 приведены температурные зависимости концентрации и подвижности электронов как в области i -типа проводимости, так и в областях n^+ -типа проводимости, рассчитанные из измерений эффекта Холла в магнитном поле $B = 0.2$ Тл. Из рисунка видно, что в области i -типа проводимости при $T = 20 \text{ К}$ концентрация электронов $n_0 < 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а при более низких температурах она становится не измеряемой из-за высокого сопротивления образцов. Высокая подвижность электронов свидетельствует о достаточно хорошем качестве исследованных монокристаллических слоев PbSnTe:In.

Обработка поверхности пленки с целью удаления собственных оксидов проводилась в течение 10 с в растворе $\text{HCl/CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ (HCl-iPA), представляющем собой изопропиловый спирт, выдержанный в парах HCl в течение суток [6], с последующей промывкой в чистом $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$. Время между такой обра-

боткой поверхности и загрузкой образца в вакуумную камеру для нанесения пассивирующего слоя Al_2O_3 толщиной 72 нм методом атомно-слоевого осаждения [7] не превышало 10 мин.

Измерения проводились в металлической камере, экранированной от фонового излучения, расположенной в жидком гелии или в его парах при $T = 4.2 \text{ К}$. В качестве источника освещения использовалась миниатюрная вакуумированная безцокольная лампа накаливания [8].

При температуре жидкого гелия $T = 4.2 \text{ К}$ были исследованы квазистационарные вольт-амперные характеристики экспериментальной структуры при $U_{\text{gate}} = 0$, а также при $U_{\text{gate}} = -1250 \text{ В}$ и $U_{\text{gate}} = +1250 \text{ В}$. Были исследованы временные зависимости тока исток/сток при фиксированных значениях напряжения исток/сток U_{bias} и различных скоростях изменения как положительного, так и отрицательного U_{gate} . Такие измерения были проведены как без освещения, так и при освещении образца в области фундаментального поглощения. Были исследованы временные зависимости тока исток/сток при резком („импульсном“) переключении с $U_{\text{gate}} = -1250 \text{ В}$ на $U_{\text{gate}} = +1250 \text{ В}$ и обратно, затворные характеристики при различных скоростях изменения dU_{gate}/dt при фиксированных значениях U_{bias} . Была исследована трансформация ряда экспериментальных характеристик МДП-структуры при увеличении температуры от $T = 4.2 \text{ К}$ до $T = 25 \text{ К}$. Далее приводятся некоторые из полученных экспериментальных зависимостей и их обсуждение.

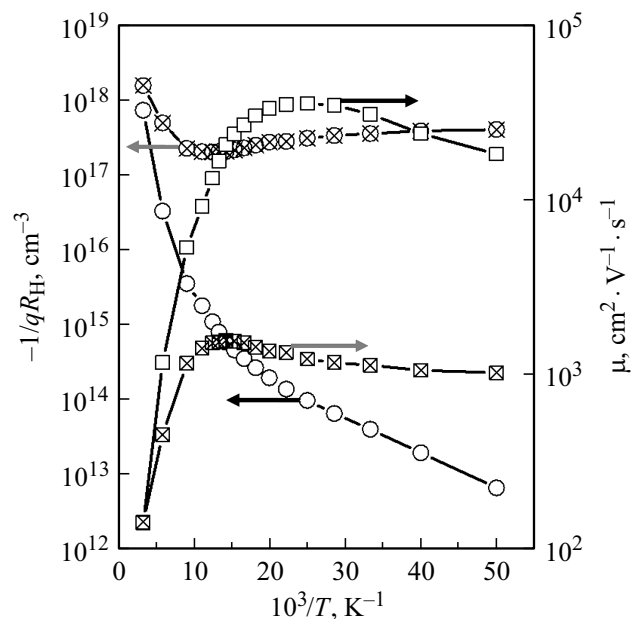


Рис. 2. Температурные зависимости рассчитанных по эффекту Холла концентрации (левая ось ординат) и подвижности (правая ось ординат) электронов в области i -типа проводимости (открытые круги и квадраты) и в областях n^+ -типа проводимости (перечеркнутые круги и квадраты).

3. Результаты и обсуждение

В области $U_{\text{bias}} = 0.02-3.0$ В ток исток/сток менялся в диапазоне $I = 10^{-11}-10^{-3}$ А. Зависимости $I = f(U_{\text{bias}})$ соответствовали режиму токов, ограниченных пространственным зарядом. На рис. 3 в качестве примера влияния на I скорости изменения $U_{\text{gate}}(t)$ показаны затворные характеристики $I = f(U_{\text{gate}})$ для 2 значений dU_{gate}/dt . Помимо сильно отличающейся формы гистерезисных петель, для $dU_{\text{gate}}/dt = 25$ В/с наблюдаются особенности типа “переключений”, начинающиеся (конец стрелок на верхнем рисунке) при $U_{\text{gate}} \approx -500$ В и $U_{\text{gate}} \approx +500$ В. Наблюдавшиеся трансформации ЭП с ростом T дают основания предполагать, что при $T = 4.2$ К образцы находятся в сегнетоэлектрическом состоянии, которое может быть причиной таких “переключений”.

На рис. 4 показаны зависимости тока $I(t)$ для разных полярностей U_{gate} , но одинаковых временных зависимостей $|U_{\text{gate}}(t)|$ и напряжения на источнике освещения $U_{\text{light}}(t)$. Видно, что зависимости отличаются кардинально. Моменты включения и выключения освещения отражены на верхнем рисунке (правая шкала). Например, помимо радикального отличия $I(t)$ для положительного и отрицательного U_{gate} до включения освещения (отличие

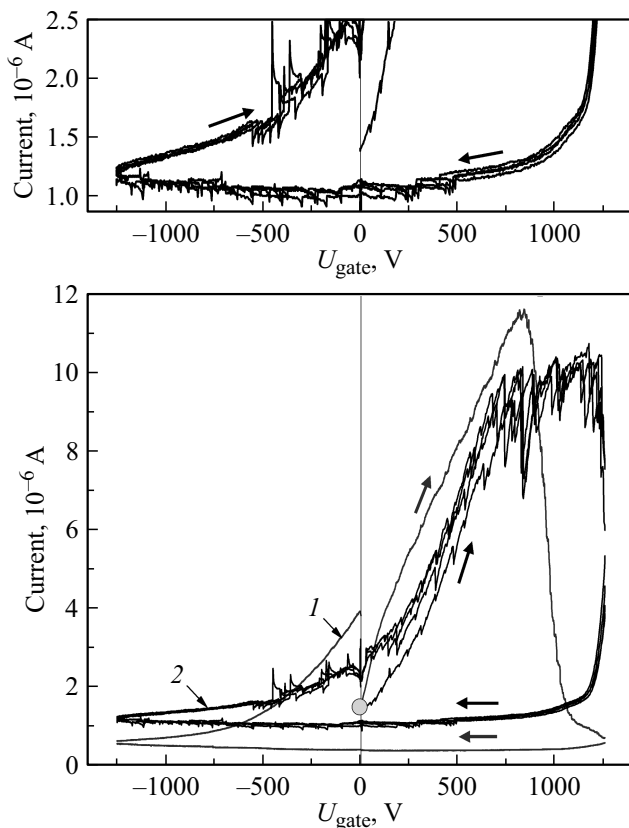


Рис. 3. Внизу — зависимость тока исток/сток от затворного напряжения для dU_{gate}/dt , В/с: 1 — 2.5, 2 — 25 (четыре “прохода”). Вверху — та же зависимость для $dU_{\text{gate}}/dt = 25$ В/с в увеличенном масштабе. Направление изменения U_{gate} показано стрелками. Напряжение исток/сток $U_{\text{bias}} = 0.72$ В.

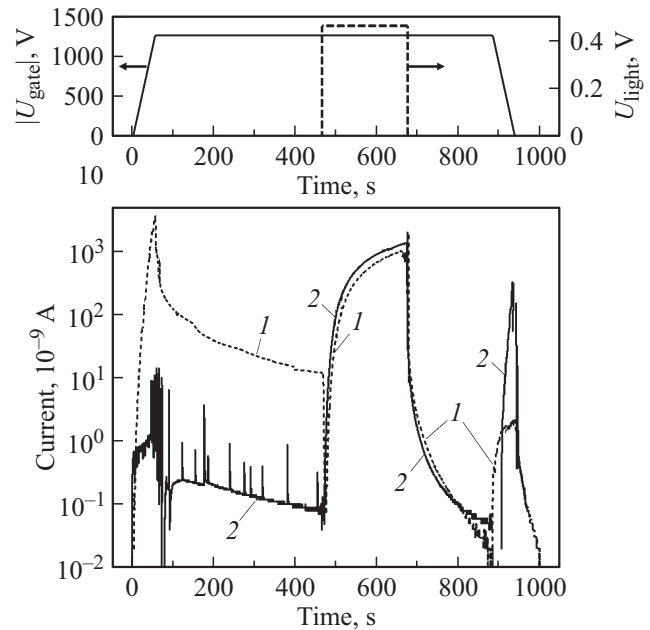


Рис. 4. Зависимость тока исток/сток от времени (внизу) при положительном (1) и отрицательном (2) затворном напряжении U_{gate} и $U_{\text{bias}} = 0.091$ В. Вверху показаны временные зависимости абсолютного значения U_{gate} (левая шкала) и напряжения на источнике освещения образца (правая шкала).

тока до 10^4-10^5 раз), в момент “включения” освещения вблизи $t = 470$ с на верхней кривой ($U_{\text{gate}} > 0$) наблюдается “отрицательная фотопроводимость”, при уменьшении $|U_{\text{gate}}|$ в области $t > 880$ с “всплеск” тока для $U_{\text{gate}} < 0$ примерно в 100 раз больше, чем для $U_{\text{gate}} > 0$. На качественном уровне это соответствует модели, в которой внешнее поле E экранируется как подвижными носителями заряда в объеме, так и носителями, локализованными на поверхности $\text{PbSnTe}:\text{In}$ на ловушках с разными параметрами. Зависящее от условий измерения ЭП заполнение таких ловушек и определяет сложную динамику наблюдаемых эффектов.

На рис. 5 приведены по две затворные характеристики МДП-структуры, измеренные до обработки поверхности в HCl-iPA и после такой обработки с последующим нанесением пассивирующего слоя Al_2O_3 толщиной 72 нм. Видно, что изменение состояния поверхности вследствие указанных воздействий количественно и качественно изменило затворные характеристики. Так, вблизи $U_{\text{gate}} = -1250$ В ток уменьшился на 1.5–2 порядка. При уменьшении затворного напряжения от $U_{\text{gate}} \approx 1000$ В до $U_{\text{gate}} = -1250$ В до обработки ток менялся слабо, в то время как после нее он в этой же области U_{gate} уменьшается до 10 раз. При этом исчезла серия особенностей, хорошо видных на рис. 3 вверху, но появилась ранее не наблюдавшаяся серия “выбросов” тока. Заметно изменилась величина гистерезиса в области положительных значений затворного напряжения. Хорошо видное в этой области до обработки большое число

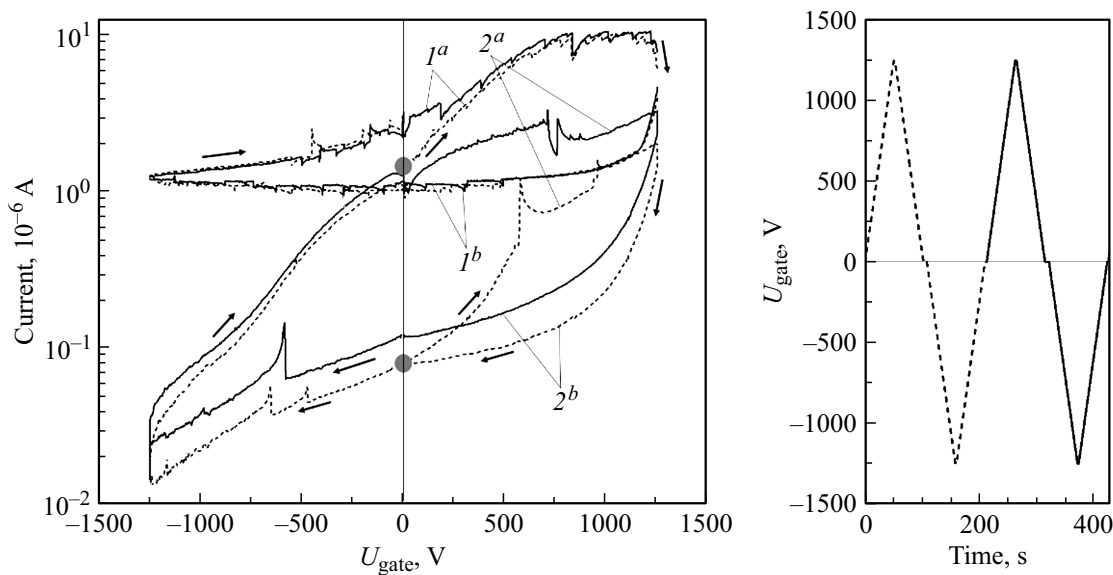


Рис. 5. Слева — зависимости тока исток/сток от затворного напряжения U_{gate} , справа — зависимость U_{gate} от времени. Напряжение исток/сток $U_{\text{bias}} = 0.72$ В. Скорость изменения затворного напряжения $|dU_{\text{gate}}/dt| = 25$ В/с. На левом рисунке: 1 — до обработки поверхности PbSnTe:In, 2 — после удаления окислов и нанесения Al_2O_3 . Направление изменения U_{gate} показано стрелками возле кривых и отображено индексами: *a* — увеличение, *b* — уменьшение U_{gate} . Кругами на левом рисунке при $U_{\text{gate}} = 0$ показаны начальные точки измерений (на правом рисунке соответствует моменту $t = 0$). Пунктирные кривые соответствуют первым циклам измерений (на правом рисунке $t = 0-210$ с), сплошные — вторым ($t = 210-430$ с).

особенностей при росте U_{gate} исчезло после обработки, а вместо него появилось небольшое число характерных „переключений“, не наблюдавшихся до обработки.

Таким образом, видно, что величина и характер изменения тока под действием затворного напряжения сильно зависят от состояния поверхности. При этом сама величина изменения тока исток/сток под действием затворного напряжения достигает нескольких порядков (до 10^5 раз в некоторых режимах). Следовательно, можно считать установленным, что если и не все, то многие специфические релаксационные процессы в исследованной пленке PbSnTe:In определяются состояниями, локализованными на поверхности. Очевидно, что динамика изменения тока исток/сток определяется изменением концентрации свободных носителей заряда, участвующих в экранировке внешнего электрического поля затвора наряду с носителями заряда, локализованными на ловушках на поверхности. В рамках таких упрощенных представлений сильное нарастание тока на рис. 4 при быстром росте положительного затворного напряжения в интервале $t = 0-50$ с связано с тем, что в этом интервале поле затвора экранируется преимущественно свободными электронами, а сравнительно „медленные“ поверхностные локализованные состояния не успевают захватывать электроны. После прекращения роста U_{gate} в течение ~ 450 с происходит перераспределение экранирующего поля электронов в пользу локализованных на ловушках, так что примерно при $t \approx 500$ с ток уменьшается более чем на 2 порядка. Разная динамика фототока для разных полярностей U_{gate} на этом же

рисунке, очевидно, связана с разной заселенностью ловушек, влияющих на величину фототока. Особенности, наблюдаемые после начала уменьшения $|U_{\text{gate}}|$ (вблизи $t \approx 900$ с) находят качественное объяснение, как следствие определяющего влияния на проводимость канала МДП-транзистора после „выключения“ затворного напряжения заряда, локализованного на „медленных“ состояниях на поверхности (VOX charge) [9]. Подчеркнем, что в эксперименте наблюдалось множество эффектов разного типа, включая не затронутые в рамках данной статьи особенности осцилляционного типа и температурные зависимости ЭП. В частности, температурные зависимости ЭП дают основания предполагать, что существенный вклад в наблюдаемые особенности могут давать сегнетоэлектрические свойства PbSnTe:In, а именно доменная структура пленок при гелиевых температурах. Очевидно, что точное количественное описание всего комплекса наблюдаемых особенностей вряд ли возможно. Вместе с тем можно считать доказанным чрезвычайно сильное влияние поверхности на интегральную проводимость изолирующих пленок PbSnTe:In.

4. Заключение

В пленках PbSnTe:In, выращенных МЛЭ, в эффекте поля впервые наблюдалось гигантское (до 10^5 раз) изменение проводимости в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом ТОПЗ со сложной динамикой, определяемой локализованными поверхностными

состояниями со сложным спектром. Обнаружено сильное влияние состояния поверхности на характеристики исследованной МДП-структуры, позволяющее считать, что значительное число релаксационных особенностей в полупрозрачных тонких пленках PbSnTe:In определяется поверхностными состояниями.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ № 17-02-0575а и РФФИ 17-12-01047.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Zhong, X. He, J.A. Schneeloch, C. Zhang, T. Liu, I. Pletikosić, T. Yilmaz, B. Sinkovic, Q. Li, W. Ku, T. Valla, J.M. Tranquada, G. Gu. *Phys. Rev. B*, **91**, 195321 (2015).
- [2] V.V. Volobuev, P.S. Mandal, M. Galicka, O. Caha, J. Sánchez-Barriga, D. Di Sante, A. Varykhalov, A. Khier, S. Picozzi, G. Bauer, P. Kacman, R. Buczko, O. Rader, G. Springholz. *Adv. Mater.*, **29** (3), 1604185 (2017).
- [3] A.E. Klimov, V.N. Sherstyakova, V.N. Shumsky. *Ferroelectrics*, **378**, 101 (2009).
- [4] Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. *УФН*, **172** (8), 875 (2002).
- [5] A.M. Shuvaev, V. Dziom, N.N. Mikhailov, Z.D. Kvon, Y. Shao, D.N. Basov, A. Pimenov. *Phys. Rev. B*, **96**, 155434 (2017).
- [6] O.E. Tereshchenko, S.I. Chikichev, A.S. Terekhov, J. Vac. Sci. Technol. A, **17**, 2655 (1999).
- [7] R. Fu, J. Pattison. *Opt. Engin.*, **51** (10), 104003 (2012).
- [8] А.Н. Акимов, А.Э. Климов, А.М. Самойлов, В.Н. Шумский, В.С. Эпов. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **15** (4), 375 (2013).
- [9] H.J. Novel. *Sol. St. Electron.*, **47** (8), 1311 (2003).

Редактор Г.А. Оганесян

Surface conductivity dynamics in PbSnTe:In films in the vicinity of a band inversion

A.E. Klimov^{1,2}, A.N. Akimov¹, I.O. Akhundov¹, V.A. Golyashov^{1,3}, D.V. Gorshkov¹, D.V. Ishchenko¹, G.Yu. Sidorov¹, S.P. Suprun¹, A.S. Tarasov¹, V.S. Epov¹, O.E. Tereshchenko^{1,3}

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, 630073 Novosibirsk, Russia

³ Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract At helium temperatures, the features of transient processes in the field effect without and under illumination in PbSnTe:In films with current variation up to 105 times are considered. These features qualitatively corresponding to model in which there is a large concentration of traps with different parameters on or near the surface of PbSnTe:In. The role of the surface is confirmed by a strong change in the experimental characteristics after chemical removal of oxides from the PbSnTe:In surface and its passivation with an Al₂O₃ layer.