

Знакопеременная фотопроводимость в пленках PbSnTe:In в режиме тока, ограниченного пространственным зарядом

© А.Н. Акимов¹, И.О. Ахундов¹, Д.В. Ищенко¹, А.Э. Климов^{1,2}, И.Г. Неизвестный^{1,2}, Н.С. Пазин¹, С.П. Супрун¹, А.С. Тарасов¹, О.Е. Терещенко^{1,3,¶}, Е.В. Федосенко¹, В.Н. Шерстякова¹

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: teresh@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.

В режиме тока, ограниченного пространственным зарядом, в пленках PbSnTe:In обнаружена зависимость знака фотопроводимости от напряжения смещения, интенсивности и времени освещения. Рассматривается роль ловушек со сложным энергетическим спектром, включая поверхностные, в наблюдаемых эффектах.

Ключевые слова: фотопроводимость, примесные состояния, поверхностные состояния, PbSnTe.

DOI: 10.21883/FTP.2020.08.49628.04

1. Введение

Кинетике фотопроводимости (ФП) в легированном индием узкозонном твердом растворе $Pb_{1-x}Sn_xTe$ посвящено достаточно много работ. Это относится и к долговременной, и к отрицательной ФП [1–4]. Разные используемые модели предполагают наличие в однородном объеме PbSnTe:In центров локализации носителей заряда с особыми свойствами и не учитывают неомические эффекты. Однако для легированных индием образцов с $x \sim 0.26–0.3$, в которых наблюдается „диэлектрическое“ состояние при $T < 20$ К, ток носит инжекционный характер, и неомичность может оказать существенное влияние на фотопроводимость [5]. Для таких образцов нельзя также исключать влияние на ФП поверхности, в том числе связанное с большой величиной $x \sim 0.3$, близкой к составам PbSnTe, демонстрирующим свойства топологического кристаллического изолятора ($x \sim 0.35$ и более).

В работе представлены результаты экспериментального исследования фототока в структурах PbSnTe:In в зависимости от напряжения смещения на образце, времени и интенсивности освещения.

2. Методика измерений

Пленки PbSnTe:In n -типа проводимости толщиной 1–2 мкм с $x = 0.28$ и концентрацией индия ~ 0.68 ат% были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке (111) BaF_2 . При $T = 4.2$ К их удельное сопротивление превышало 10^6 Ом·см при подвижности электронов $\mu > 3 \cdot 10^4$ см²·В⁻¹·с⁻¹ при $T = 30–40$ К. Контактные области n^+ -типа проводимости были сформированы вакуумным напылением In с последующим

диффузионным отжигом. Расстояние между контактами составляло ~ 50 мкм при длине зазора ~ 370 мкм. Образец размещался в жидком гелии в экранированной от фонового излучения металлической камере. Источником излучения служила вольфрамовая нить миниатюрной лампы накаливания. Стеклообразная вакуумированная колба лампы имела край пропускания вблизи 4.5 мкм. Лампа находилась в держателе с образцом на расстоянии от него примерно ~ 3 см. В таблице приведены характеристики источника излучения, измеренные с использованием ИК-фотодиода (ФД) на основе CdHgTe с краем чувствительности > 10 мкм. При калибровке ФД размещался на месте образца и считалось, что его внешний квантовый выход составляет 50% во всем спектральном диапазоне источника. В таблице показаны только те напряжения питания лампы, которые использовались в данной работе.

Образец охлаждался от комнатной температуры до температуры жидкого гелия при каждом измерении. После проведения измерения временной зависимости

Параметры лампы накаливания, использованной в качестве источника излучения

$U_l, В$	$T_l, К$	$\lambda_{max}, мкм$	$\tau_{lon}, с$	$\tau_{loff}, с$	$\Phi, см^{-2}с^{-1}$
0.3	470	6.2	0.76	0.67	$1.2 \cdot 10^{10}$
0.5	620	4.7	0.48	0.48	$1.1 \cdot 10^{11}$
1.5	1030	2.8	0.06	0.28	$1.2 \cdot 10^{12}$

Примечание. U_l — напряжение питания; T_l — температура нити накаливания; λ_{max} — положение максимума излучения абсолютно черного тела с температурой T_l ; τ_{lon} — характерное время нарастания плотности потока фотонов при включении напряжения питания лампы; τ_{loff} — характерное время спада плотности потока при выключении лампы; Φ — плотность потока фотонов.

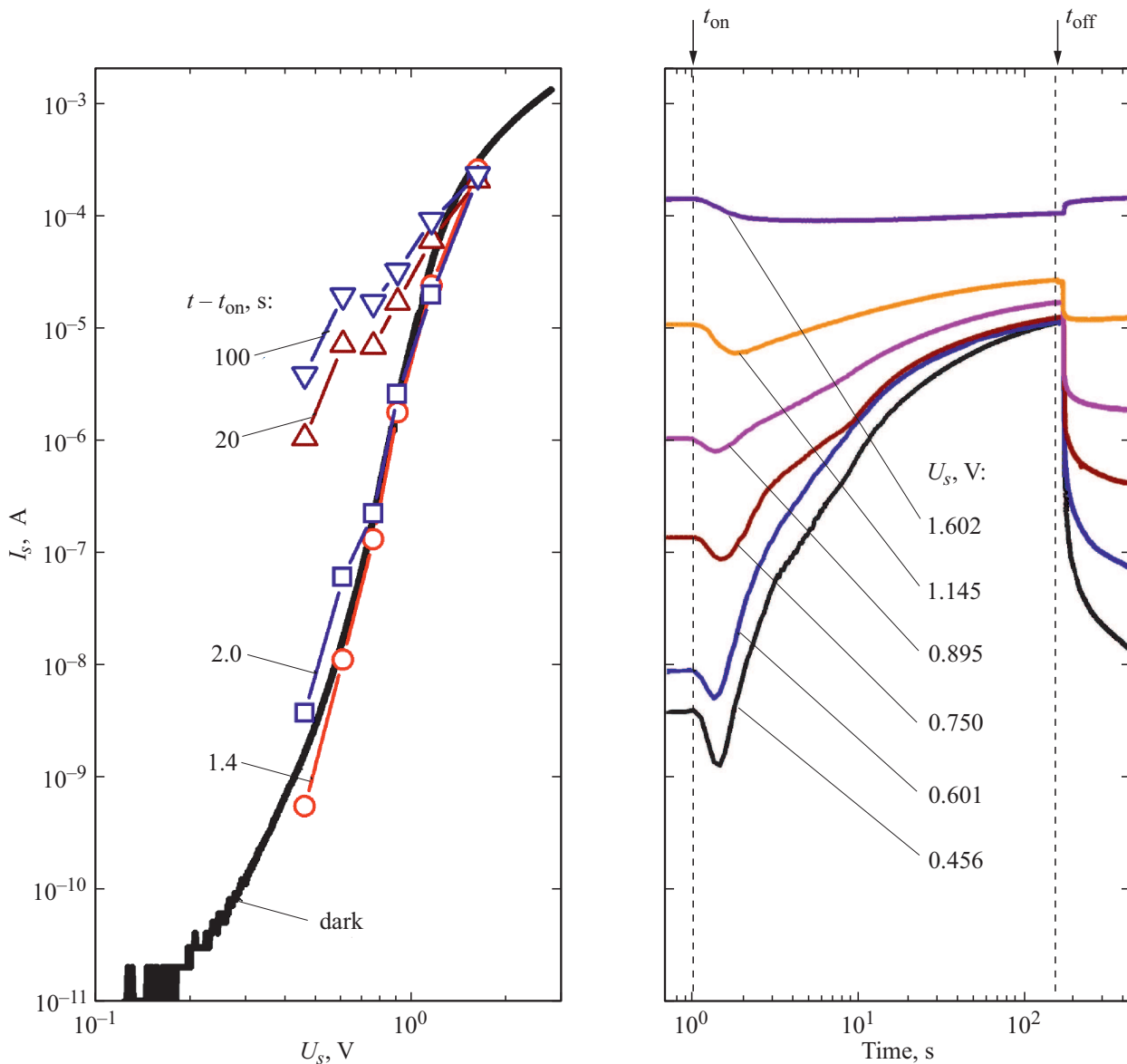


Рис. 1. *a* — вольт-амперная характеристика образца без освещения (сплошная кривая) и после различного времени ($t - t_{on}$) воздействия освещения (символы). Время после освещения приведено на рисунке вблизи соответствующих кривых. *b* — динамика тока при включении и выключении освещения (моменты t_{on} и t_{off} соответственно) при различных напряжениях на образце U_s .

тока в выбранных условиях держатель с образцом нагревался до комнатной температуры и выдерживался при ней определенное время. Это делалось для того, чтобы исключить влияние на повторные измерения долговременных процессов, обусловленных глубокими центрами захвата в PbSnTe:In [4–6]. Экспериментально было установлено, что для этого необходимо выдерживать исследованные в данной работе образцы при комнатной температуре не менее двух часов.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1, *a* показаны вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры без освещения и значения тока

через время $\Delta t = (t - t_{on})$ с после включения лампы для нескольких значений напряжения смещения на образце U_s (символы). Напряжение на лампе $U_l = 1.5$ В. На рис. 1, *b* для того же U_l приведены зависимости тока от времени при включении и выключении источника излучения при разных U_s , значения которого показаны на рисунке возле соответствующих кривых. Моменты включения и выключения освещения отмечены символами t_{on} и t_{off} соответственно. Момент включения $t_{on} = 1$ с и логарифмический масштаб по оси времени были выбраны для того, чтобы были лучше отражены характерные особенности всех кривых и различия между ними.

Видно, что после включения освещения сначала наблюдается отрицательная, а затем положительная фо-

топроводимость (ОФП и ПФП соответственно). Длительность интервалов, на которых наблюдается относительное уменьшение тока под действием излучения (ОФП), меняется с увеличением напряжения в диапазоне $U_s = 0.456-1.145$ В. При $U_s = 1.602$ В наблюдается только ОФП. Для ПФП относительное увеличение тока достигает $\sim 10^3$ при малых U_s . Видно также, что для $U_s = 0.456-0.895$ В при $t = t_{\text{off}}$ значения фототока близки, хотя отличие темновых токов достигает ~ 300 раз. Видно также, что в области ПФП на кривых в области включенного освещения имеется несколько характерных „изломов“, форма которых меняется с увеличением U_s .

На рис. 2 более детально в полулогарифмическом масштабе приведены релаксационные зависимости тока после выключения освещения в момент $t_{\text{off}} = 165$ с для разных значений U_s . Все зависимости носят неэкспоненциальный характер. С ростом U_s наблюдается тенденция к более быстрой релаксации тока к темновому значению, хотя постоянная времени τ_0 на начальных участках релаксации при этом несколько возрастает (значения показаны на рисунке вблизи кривых слева).

При постоянном напряжении смещения $U_s = 0.601$ В были измерены временные зависимости тока при разных напряжениях на лампе, которые соответствовали потокам излучения, отличающимся на порядок (см. таблицу).

На рис. 3 представлены временные зависимости тока при разных напряжениях на лампе. С уменьшением потока фотонов от кривой 1 к кривой 3 наблюдается увеличение интервала времени, в котором наблюдается ОФП (фототок меньше темнового тока), приблизительно

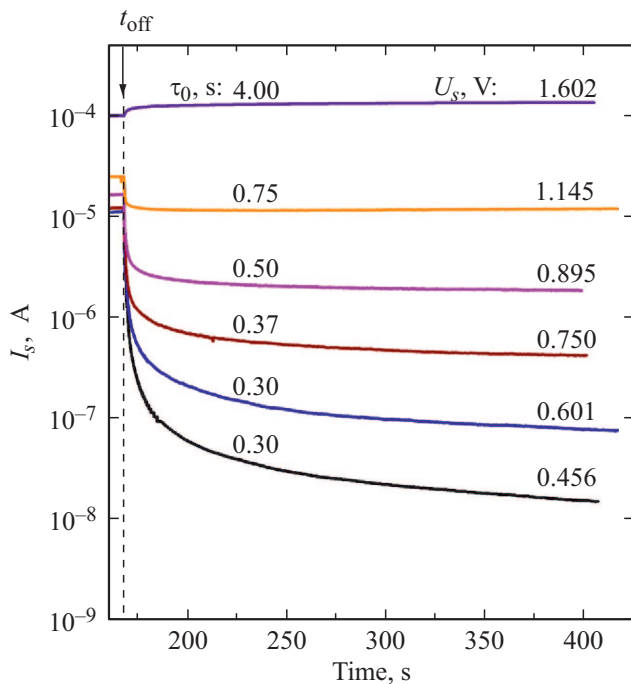


Рис. 2. Релаксация фототока после выключения освещения в момент времени $t = t_{\text{off}}$. Рядом с кривыми справа приведены значения U_s , слева — „мгновенное время жизни“ τ_0 в момент $t = t_{\text{off}}$.

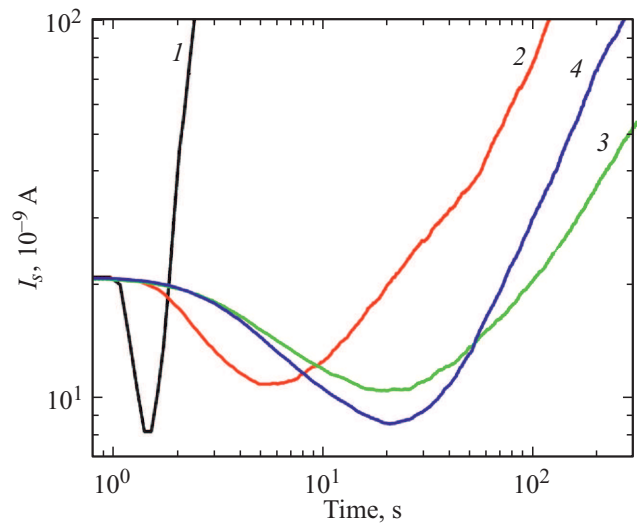


Рис. 3. Временные зависимости тока при разном напряжении на лампе U_l , В: 1 — 1.5, 2 — 0.5, 3 и 4 — 0.3. Кривая 4 измерена после травления поверхности образца с удалением окислов по методике, описанной в [7]. Освещение включено в момент времени $t_{\text{on}} = 1$ с, $U_s = 0.601$ В.

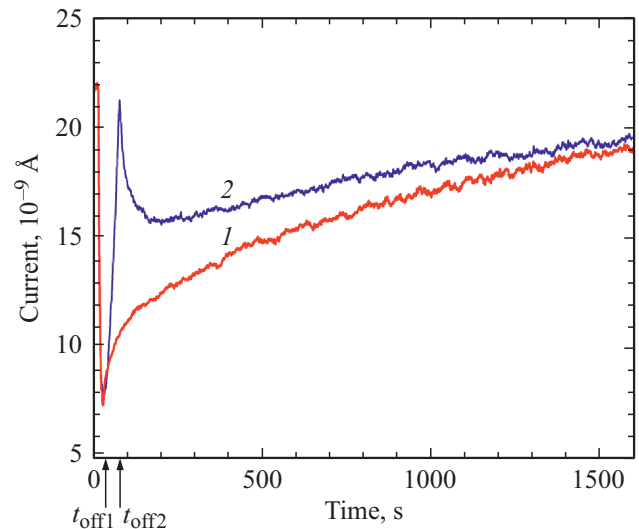


Рис. 4. Временные зависимости тока при выключении освещения в моменты времени $t_{\text{off}1}$ (1) и $t_{\text{off}2}$ (2), отмеченные на рисунке стрелками. $U_s = 0.6$ В, $U_l = 0.3$ В.

но обратно пропорциональное уменьшению потока фотонов. При этом величина минимума фототока в области ОФП меняется незначительно.

Ранее в работе [7] было показано, что при химической обработке пленок $\text{PbSnTe}:\text{In}$ в изопропиловом спирте, насыщенном парами соляной кислоты, удаляются собственные оксиды и происходит модификация поверхностных свойств, оказывающая влияние на транспорт носителей заряда в пленках. Кривая 4 на рисунке была измерена в тех же условиях, что и кривая 3, но после указанной обработки поверхности. Видно, что в области ОФП вплоть до минимумов тока кривые 3 и 4

отличаются не очень сильно, в то время как скорость нарастания тока в области перехода к ПФП увеличилась практически вдвое. Это позволяет предположить, что отвечающие за ОФП центры расположены, скорее всего, не на поверхности, а в объеме пленки, в то время как существенная часть центров, отвечающих за ПФП, расположена на поверхности.

На рис. 4 приведены зависимости тока от времени при выключении освещения в характерные моменты времени t_{off1} и t_{off2} , обозначенные на рисунке стрелками. Освещение было включено при $t = 0$. Вблизи t_{off1} достигается минимум тока (максимальная величина ОФП), а вблизи t_{off2} происходит переход от ОФП к ПФП и величина тока в освещенном образце близка к его темновому значению. Условия измерений те же, что и для кривых 3, 4 на рис. 3. На рисунке для обеих кривых наблюдаются участки быстрой ($t < 200$ с) и медленной ($t > 200$ с) релаксации тока после выключения освещения. При этом в области быстрой релаксации кривой 1 ток возрастает, а кривой 2 — уменьшается. Аппроксимация кривых экспоненциальными зависимостями позволила выделить две характерных постоянных времени на „быстрых“ участках. Для кривой 1 они составили $\tau_1 \sim 17$ с и $\tau_2 \sim 30$ с, для кривой 2 — $\tau_1 \sim 17$ с и $\tau_2 \sim 40$ с, т.е. значения постоянных времени совпадают в пределах ошибки. На „медленных“ участках постоянные времени тоже оказались близкими — около $\tau_3 \sim 1150$ с для обеих кривых.

4. Обсуждение результатов

В различных моделях для объяснения ОФП привлекаются модели, рассматривающие по крайней мере два типа ловушек. Такая модель предложена и в [8] для пленок $\text{PbSnTe}:\text{In}$ при измерениях в режимах, близких к омическому. Как следует из рис. 1, а, в нашем случае реализуется режим токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Сравнительно плавный переход от области напряжений со слабым заполнением ловушек к области их полного заполнения ($I \sim U_2$ в обеих областях) может быть связан со сложным энергетическим спектром ловушек разного типа [6]. Так как каждому значению U_s без освещения соответствует разное заполнение ловушек разного типа, это должно вести и к разной динамике как нарастания, так и спада фототока, если существен захват генерируемых светом неравновесных носителей заряда на эти же ловушки. При этом по мере роста U_s сначала заполняются более глубокие, а потом более мелкие ловушки. Из рис. 1, б видно, что, действительно, с увеличением U_s меняется динамика нарастания фототока. Из рис. 2 следует, что релаксация тока к его темновому значению происходит быстрее при больших значениях U_s , при которых в рамках такой модели незаполненными остаются мелкие и „быстрые“ ловушки, которые и определяют динамику ФП.

Рассмотренный в [8] возможный механизм отрицательной ФП в пленках $\text{PbSnTe}:\text{In}$ предполагает наличие

в образцах неоднородностей с более широкой запрещенной зоной и сравнительно „глубокими“ и „медленными“ ловушками. Как те, так и другие могут в принципе располагаться как в объеме пленки, так и вблизи ее свободной поверхности. При этом необходимо отметить, что геометрия исследованных образцов (толщина пленки много меньше межконтактного расстояния) такова, что на величину токов в режиме ТОПЗ должны влиять не только ловушки в объеме пленок $\text{PbSnTe}:\text{In}$, но и ловушки, расположенные на поверхности или вблизи нее. То, что именно с медленными ловушками связана ОФП, подтверждается релаксационными зависимостями на рис. 4, где постоянные времена для ОФП превышают 1000 с. Помимо этого, „медленный“ характер таких ловушек подтверждается данными, приведенными на рис. 3. Из рисунка следует, что уменьшение на 2 порядка потока фотонов увеличивает интервал, где наблюдается ОФП, также приблизительно в ~ 100 раз — от ~ 0.6 до $\sim 60-100$ с.

Из этого же рисунка следует, что обработка поверхности с удалением окислов не ведет к качественному изменению формы временных зависимостей тока в области ОФП, но в разы увеличивает скорость нарастания тока в области ПФП. Это может быть объяснено тем, что значительная часть более „быстрых“ ловушек, определяющих ПФП, находится на поверхности или вблизи нее.

Поведение релаксационных кривых на рис. 4 на качественном уровне можно объяснить следующим образом. В момент времени t_{off2} существенно заполнены и „медленные“ и „быстрые“ ловушки. После выключения вторые релаксируют к равновесному состоянию быстрее с уменьшением тока, после чего начинает преобладать роль релаксации медленных ловушек с возвратом к исходному состоянию образца. На „быстром“ участке кривой 1 ток нарастает. В рамках рассматриваемой модели это не может быть связано с „медленными“ ловушками, заполнение которых к моменту времени t_{off1} существенно, так как при этом наблюдается минимум тока. В принципе это возможно в том случае, если на зарядовое состояние „быстрых“ ловушек влияет не только непосредственно генерация носителей заряда освещением, но уменьшение концентрации носителей заряда при ОФП.

Рассматриваемая модель носит качественный характер, хотя, на наш взгляд, не противоречит комплексу полученных экспериментальных данных. Некоторые особенности, например, резкое изменение динамики на рис. 1, б при больших U_s , вплоть до отсутствия ПФП, требуют дополнительных исследований. Несмотря на то что, по всей видимости, это может быть объяснено сложным энергетическим спектром ловушек, локализованных в разных областях пленки.

5. Заключение

В структурах на основе пленок $\text{PbSnTe}:\text{In}$ с низкой проводимостью экспериментально обнаружена сильная

зависимость динамики нарастания и спада фототока, а также знака фотопроводимости, от напряжения смещения, интенсивности и времени освещения. На качественном уровне наблюдаемые эффекты находят объяснение в рамках модели токов, ограниченных пространственным зарядом, в присутствии ловушек со сложным энергетическим спектром, в том числе и на поверхности пленок.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-02-00324) и РНФ (№ 17-12-01047).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.И. Засавицкий, А.В. Матвеевко, Б.Н. Мацонашвили, В.Т. Трофимов. Письма ЖЭТФ, **37** (10), 456 (1983).
- [2] M.A.B. Tavares, M.J. da Silva, M.L. Peres, S. de Castro, D.A.W. Soares, A.K. Okazaki, C.I. Fornari, P.H.O. Rappl, E. Abramof. Appl. Phys. Lett., **110**, 042102 (2017).
- [3] M.J.P. Pirralho, M.L. Peres, D.A.W. Soares, P.C.O. Braga, F.S. Pena, C.I. Fornari, P.H.O. Rappl, E. Abramof. Phys. Rev. B, **95**, 075202 (2017).
- [4] Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. Письма ЖЭТФ, **80**, 143 (2004).
- [5] А.Н. Акимов, А.Э. Климов, В.С. Эпов. ФТП, **52**, 1401 (2018).
- [6] A.E. Klimov, V.N. Sumsy. Physica B Condens. Matter, **404**, 5028 (2009).
- [7] А.С. Тарасов, Д.В. Ищенко, А.Н. Акимов, И.О. Ахундов, В.А. Голяшов, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, С.П. Супрун, Е.В. Федосенко, В.Н. Шерстякова, О.Е. Терещенко. ЖТФ, **89**, 1795 (2019).
- [8] А.Н. Акимов, А.Э. Климов, С.В. Морозов, С.П. Супрун, В.С. Эпов, А.В. Иконников, М.А. Фадеев, В.В. Румянцев. ФТП, **50**, 1713 (2016).

Редактор Г.А. Оганесян

Sign-alternating photoconductivity in PbSnTe : In films in the space charge limited current regime

A.N. Akimov¹, I.O. Akhundov¹, D.V. Ishchenko¹, A.E. Klimov^{1,2}, I.G. Neizvestny^{1,2}, N.S. Paschin¹, S.P. Suprun¹, A.S. Tarasov¹, O.E. Tereshchenko^{1,3}, E.V. Fedosenko¹, V.N. Sherstyakova¹

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 The dependence of the photoconductivity sign on the bias voltage, intensity and duration of illumination was studied in PbSnTe : In films in the space charge limited current regime. The role of traps with a complex energy spectrum, including the surface traps, in the observed effects is discussed.