

ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИКИ ФОТОТОКА В ПЛЕНКАХ $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ ОТ УРОВНЯ ОСВЕЩЕНИЯ И ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ

© 2013 А. Н. Акимов¹, А. Э. Климов¹, А. М. Самойлов², В. Н. Шумский¹, В. С. Эпов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 13, 630090 Новосибирск, Россия

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия

e-mail: klimov@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 23.05.2013 г.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования динамики нарастания и спада фототока в полученных молекулярно-лучевой эпитаксией пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ с составами $x \approx 0.24—0.28$ при $T = 4.2$ К при различных интенсивностях освещения и его продолжительности. Рассматриваются возможные причины отличия поведения фототока в зависимости от указанных факторов.

Ключевые слова: узкозонные полупроводники, твердые растворы, теллурид свинца, теллурид олова, легирование, тонкие пленки, фотопроводимость.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при гелиевых температурах в легированных индием узкозонных твердых растворах $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ с составами $x \approx 0.24—0.28$ ($\Delta E_g \approx 0.06—0.04$ эВ) и содержанием In около 1—3 ат.% уровень Ферми находится в запрещенной зоне [1, 2]. При этом в отсутствие освещения концентрация свободных носителей заряда может быть близка к собственной, а удельное сопротивление при $T = 4.2$ К сравнимо с удельным сопротивлением диэлектриков. Такие образцы очень чувствительны к освещению, под действием которого их сопротивление может уменьшаться на 6—7 и более порядков величины [1, 2], а характерное время релаксации фототока может достигать часов, суток и более. Уменьшение тока после выключения освещения носит неэкспоненциальный характер — так называемая долговременная, или «задержанная» фотопроводимость.

В настоящее время известно большое количество экспериментальных работ, посвященных как изучению долговременной релаксации фотопроводимости в $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$, так и ее практическому использованию [3, 4]. Вместе с тем, до сих пор не существует общепринятой модели аномально большого для узкозонных материалов времени жизни неравновесных носителей заряда в изученных образцах.

Целью настоящей работы было исследование влияния интенсивности и длительности освещения

на характер временных зависимостей нарастания и спада фототока в $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе исследования проводили на пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ состава $x \approx 0.26$ ($E_g \approx 0.06$ эВ), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках BaF_2 с ориентацией (111). Толщина изученных пленок варьировалась в пределах 1.5 ± 0.2 мкм, а содержание примесных атомов индия не превышало 1—3 т.%. Образцы для исследований были изготовлены методом фотолитографии и имели ширину 80 мкм. При этом расстояние между двуслойными контактами Ti/Al составляло 120 мкм. Измерения временных зависимостей тока проводили в жидком гелии в металлической камере, тщательно экранированной от фонового излучения. В экспериментах использовали образцы p -типа проводимости, типичное значение подвижности дырок в которых, измеренное по эффекту Холла, превышало $\mu_p > 2 \times 10^3$ см²В⁻¹с⁻¹ при $T = 77$ К, достигая величин $\sim 10^4$ см²В⁻¹с⁻¹ вблизи $T \approx 20—30$ К при концентрации дырок $[p] < 10^{14}$ см⁻³ в этой же области температур. При более низких температурах высокое сопротивление образцов, при $T = 4.2$ К достигавшее величин $R \sim 10^{12}$ Ом и более, не позволило измерить концентрацию и подвижность носителей заряда без освещения по эффекту Холла.

Для приведенных далее экспериментальных временных зависимостей тока напряжение смещения на образце составляло $U = 0.025$ В. Освещение образцов осуществляли миниатюрной лампой накаливания, расположенной внутри измерительной камеры также в жидком гелии, что исключало изменение температуры образцов при включенном источнике излучения. Образец располагался на расстоянии от лампы примерно 3 см. Инфракрасный край спектрального диапазона излучения определяется пропусканием стеклянной колбы лампы, т. е. составлял примерно $\lambda_{\text{макс}} \approx 2.5\text{—}3.0$ мкм. Температурная зависимость сопротивления нити накаливания лампы $R_{\text{л}} = f(T_{\text{л}})$ для использованных режимов измерения приведена на рис. 1 а. С целью исключения влияния сопротивления подводящих проводников зависимость $R_{\text{л}} = f(T_{\text{л}})$ установили экспериментально четырехконтактным методом в диапазоне $T = 4.2\text{—}293$ К, а для температур $T > 293$ К ее экстраполировали с использованием справочных данных по зависимости сопротивления вольфрама от температуры. При $T = 4.2$ К сопротивление $R_{\text{л}} = 0.7$ Ом, сопротивление подводящих проводов — 0.7 Ом. Полученные данные были использованы для расчета зависимости температуры нити накаливания лампы от подаваемого на нее напряжения $T_{\text{л}} = f(U_{\text{л}})$, показанной на рис. 1 б. Для каждого значения $U_{\text{л}}$ температуру $T_{\text{л}}$ вычисляли из значений сопротивления нити $R_{\text{л}}$, измеренного также четырехконтактным методом.

Динамика изменения интенсивности излучения при включении и выключении лампы была изме-

рена с использованием бескорпусного фотосопротивления (ФС) на основе пленки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с краем чувствительности $\lambda_{\text{макс}} \approx 10$ мкм и быстродействием не хуже 10^{-4} секунды, расположенном в жидком гелии на расстоянии около 0,3 см от лампы. Временные зависимости относительного изменения проводимости ФС для трех значений используемого в эксперименте напряжения питания лампы представлены на рис. 2.

Как видно на рис. 2, характерное время нарастания сигнала при включении лампы и его спада при выключении составляет не более одной секунды для всех изученных значений напряжения $U_{\text{л}}$. Вычисленная из приведенных данных постоянная времени составила $\tau = 0.8$ с, за исключением нарастания сигнала при $U_{\text{л}} = 1.5$ В, где она оказалась равной 0.32 с. Во всех трех случаях переходный процесс, связанный с разогревом или охлаждением нити накаливания, заканчивался практически полностью примерно за три секунды. Следует подчеркнуть, что сигнал с ФС пропорционален потоку квантов от источника освещения. Для использованных температур нити накаливания (таблица 1) максимум потока квантов от абсолютно черного тела с аналогичными температурами находится на длине волны $\lambda_{\text{максчв}}$, расположенной за краем пропускания стеклянной колбы $\lambda_{\text{макс}} \approx 2.5\text{—}3.0$ мкм. Таким образом, при рассмотрении данных в таблице 1 видно, что основная часть потока квантов приходится на область вблизи края пропускания стеклянной колбы лампы, т. е. спектральный состав излучения в нашем случае не сильно зависит от температуры нити лампы.

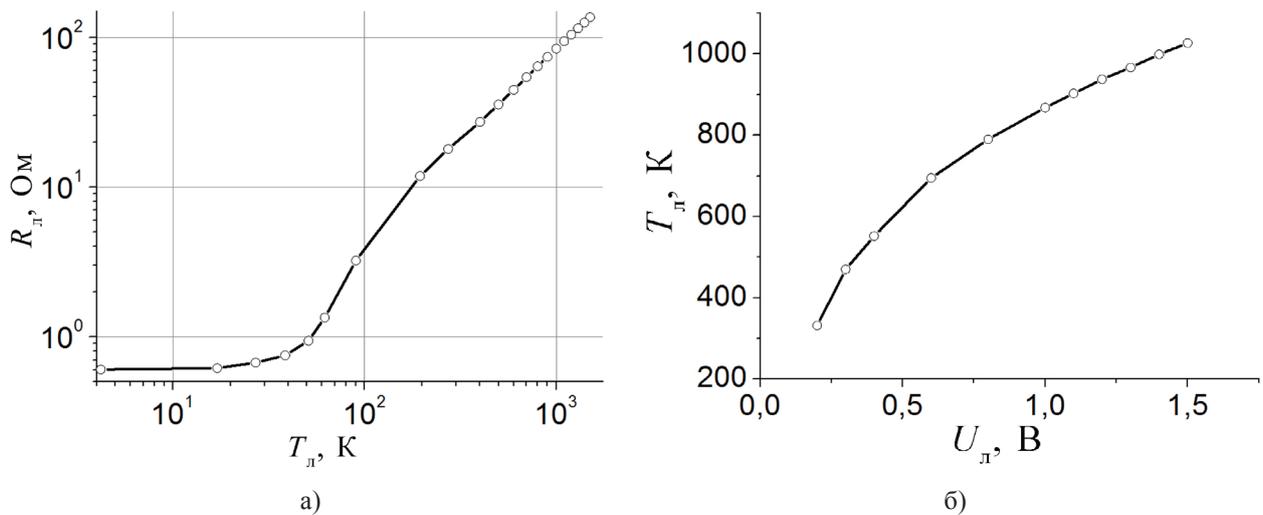


Рис. 1. Рабочие параметры источника ИК-излучения при исследовании фотопроводимости пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}<\text{In}>$: а — температурная зависимость сопротивления нити накала лампы $R_{\text{л}} = f(T_{\text{л}})$; б — рассчитанная с использованием $R_{\text{л}} = f(T_{\text{л}})$ зависимость температуры нити накаливания $T_{\text{л}}$ от напряжения на лампе $U_{\text{л}}$

Таблица 1. Значения максимальной длины волны ИК-излучения в рамках модели абсолютно черного тела в зависимости от величин напряжения на лампе

Напряжение на лампе $U_{л}$, В	Температура T , К	Максимальное значение длины волны λ_{maxchv} , мкм
0.2	330	12.6
0.4	470	7.9
1.5	1025	3.6

На рис. 3 показаны три временных зависимости силы тока, измеренные последовательно друг за другом для одной из пленок при $T = 4.2$ К в различных режимах. Перед измерением зависимости, показанной на рис. 3а, образец был охлажден до температуры жидкого гелия без освещения. В момент, отмеченный стрелкой вверх (\uparrow), на источник излучения было подано напряжение $U_{л} = 0.2$ В при

номинальном напряжении лампы $U_{л} = 10$ В. Видно, что в пределах точности измерений ($\sim 10^{-14}$ А) ток оставался равным нулю в течение примерно 80 с при дальнейшем незначительном увеличении, близком к уровню шума.

Зависимость, представленная на рис. 3б, была измерена непосредственно после первой. В течение времени около 10 с после включения освещения

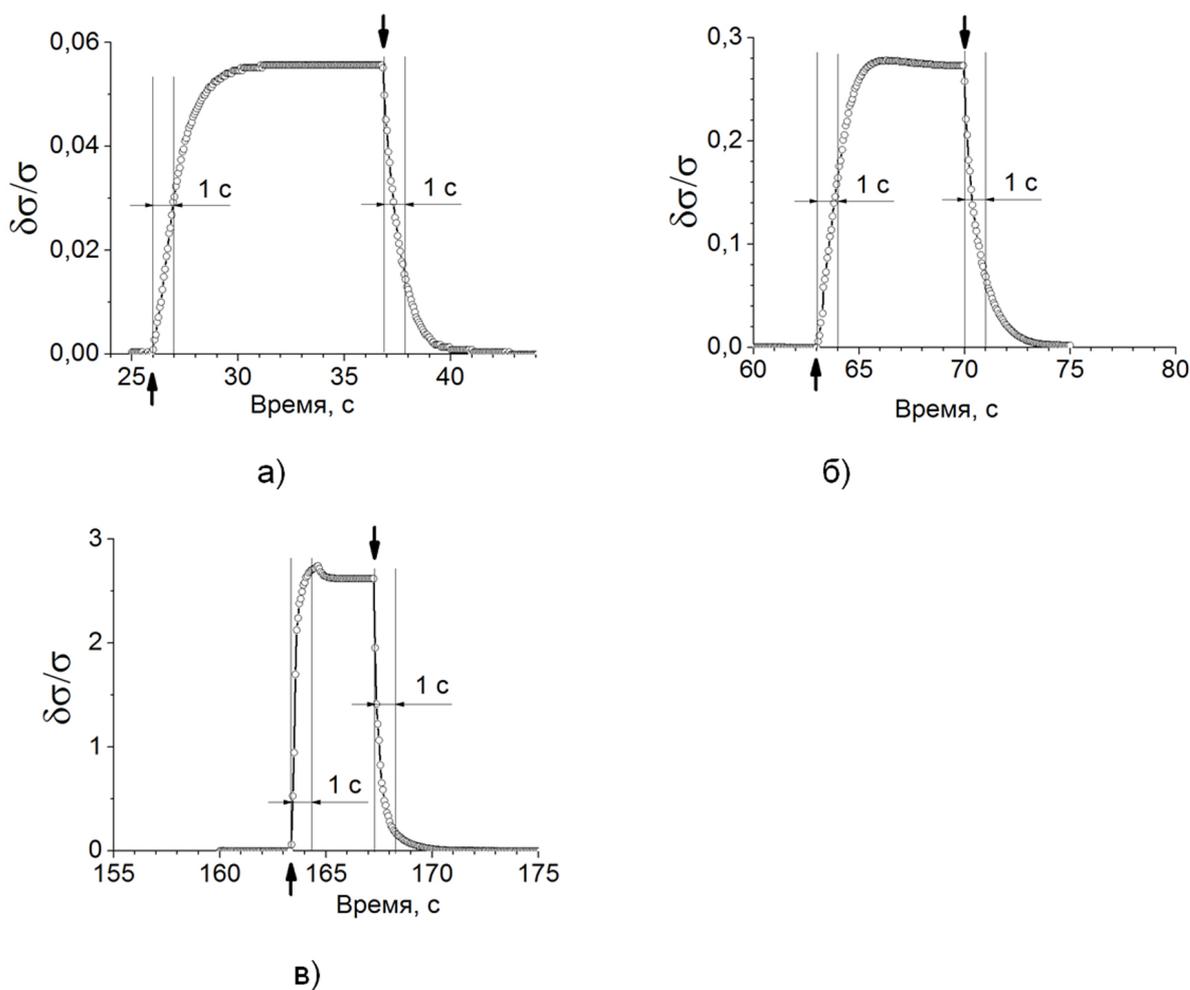


Рис. 2. Временные зависимости относительного изменения проводимости $\delta\sigma/\sigma$ фотосопротивления HgCdTe при включении (\uparrow) и выключении (\downarrow) лампы. Напряжение на лампе: а — $U_{л} = 0.2$ В; б — $U_{л} = 0.4$ В; в — $U_{л} = 1.5$ В

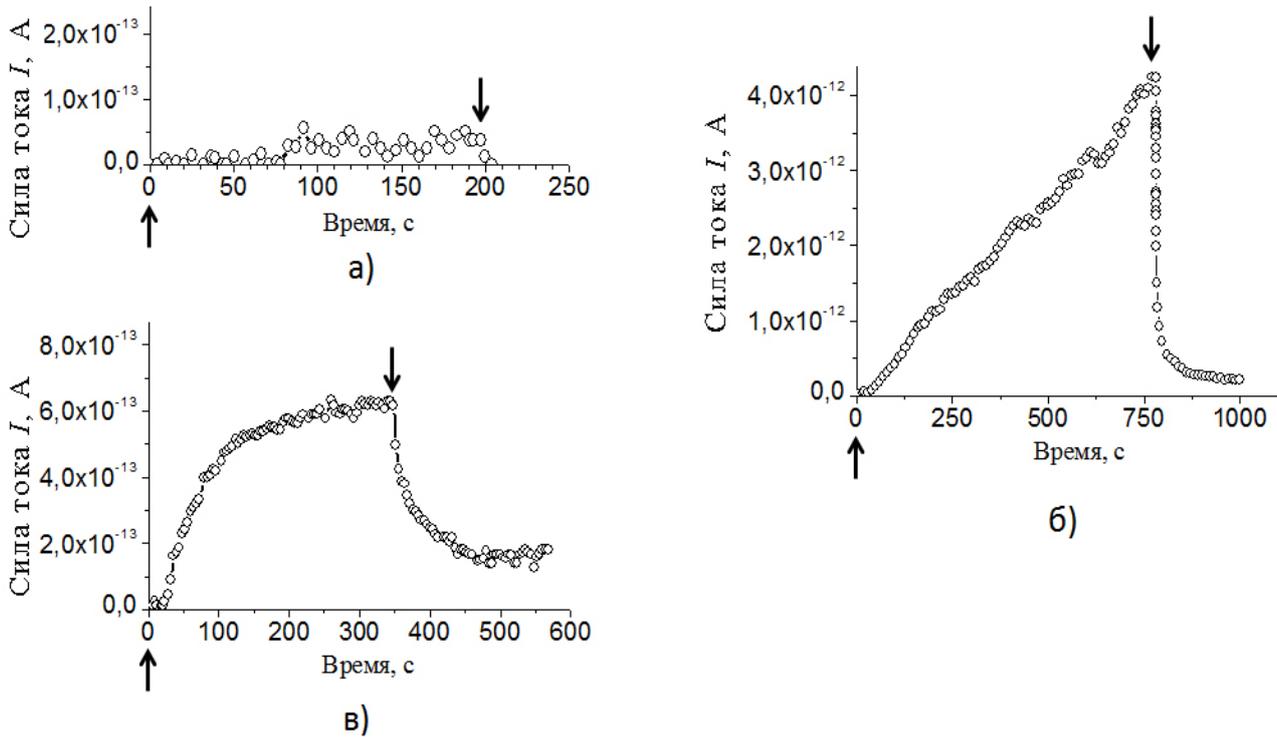


Рис. 3. Временные зависимости силы тока при включении (\uparrow) и выключении (\downarrow) источника ИК-излучения для трех различных режимов измерений: *a* — данные получены сразу после охлаждения образца без освещения; *б* и *в*-данные получены при повторном освещении без «отогревания» образца. Напряжение на источнике излучения $U_{\text{л}} = 0.2$ В для кривых (*a*) и (*в*); для кривой (*б*) $U_{\text{л}} = 0.3$ В

изменение тока не регистрировалось, а затем ток увеличивался приблизительно линейно от времени в течение 700 с, достигнув величины около 4×10^{-12} А перед выключением источника излучения. После этого наблюдался участок быстрого спада тока с последующей медленной неэкспоненциальной релаксацией, типичной для пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}<\text{In}>$ при $x \approx 0.26$. После экспозиции образца в темноте в течение более 1800 секунд ток вновь уменьшился до величины $I < 10^{-14}$ А (точность измерений).

Сразу после этого была измерена зависимость, приведенная на рис. 3в. Как и для кривой на рис. 3а, напряжение на лампе составило $U_{\text{л}} = 0.2$ В. Видно, что для этой кривой динамика нарастания тока радикально отличается от динамики кривых, изображенных на рис. 3а и рис. 3б. В отличие от кривой на рис. 3а, примерно через 30 с после включения источника излучения ток начал быстро возрастать. Вместе с тем, в отличие от кривой на рис. 3б, после экспозиции в течение 300 с зависимость силы тока от времени демонстрирует явную тенденцию к насыщению. Как и для кривой на рис. 3б, после выключения освещения наблюдалась долговременная релаксация фотопроводимости. Но при этом

характерный участок быстрой релаксации выражен гораздо слабее, а остаточная проводимость, превышающая ошибку измерений, оставалась и после выдержки образца в темноте в течение более часа (во втором случае ток становился меньше минимальной измеряемой величины уже после ≈ 30 мин.). Таким образом, приведенная серия зависимостей свидетельствует о влиянии предварительного облучения на характер нарастания и спада фототока.

Для полной рекомбинации фотовозбужденных носителей заряда образец был прогрет выше температуры жидкого азота и вновь охлажден до температуры жидкого гелия без освещения.

На рис. 4 приведена зависимость силы тока от времени, измеренная в тех же условиях, как и для кривой на рис. 3а, в течение существенно более длительной продолжительности освещения (не 180 с, а более чем 6000 с). Заметное увеличение силы тока наблюдалось примерно через 500 с после включения освещения с нарастанием по гиперлинейной зависимости в течение примерно 1500 с. Затем наблюдалось приблизительно линейное нарастание силы тока до момента выключения освещения. После выключения освещения, аналогично

кривой на рис. 3б, наблюдался участок быстрого спада фототока и далее — участок «задержанной» фотопроводимости. Даже через 400 с после выключения освещения ток оставался на уровне $1 \cdot 10^{-13}$ А, т. е. превышал нулевой уровень примерно на порядок. Из сравнения зависимостей на рис. 3 и рис. 4 можно предположить, что поведение фототока как на участке нарастания, так и на участке спада зависит не только от интенсивности излучения, но и от его суммарной дозы — экспозиции.

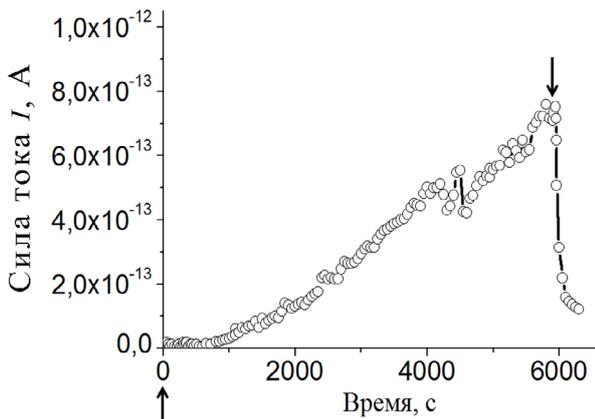


Рис. 4. Временная зависимость тока после включения (↑) и выключения (↓) источника освещения с $U_n = 0.2$ В. Зависимость получена после «отогревания» образца свыше $T = 80$ К.

Для подтверждения этого предположения образец был вновь прогрет до температуры выше $T = 77$ К с последующим охлаждением без освещения до $T = 4.2$ К. После этого была изучена серия зависимостей силы тока от времени, приведенная на рис. 5. Для каждой кривой момент выключения освещения помечен стрелкой (↓). Напряжение питания лампы изменяли в пределах от $U_n = 0.4$ В до $U_n = 1.5$ В. Характерным для приведенной серии зависимостей является то, что максимальная амплитуда фототока примерно такая же, как и для кривой на рис. 3 б. При этом длительность освещения образца составляла менее секунды при значительно большей интенсивности и одновременно при меньшей суммарной экспозиции. Как видно на рис. 5, в этом случае даже после шестикратного освещения с большей по сравнению с рис. 3 и рис. 4 интенсивностью происходит быстрая релаксация фототока до нуля с точностью $\approx 10^{-14}$ А без «задержанной» фотопроводимости.

Для более детального изучения характера релаксации образец был вновь прогрет и затем охлажден в темноте. На рис. 6. представлена зависимость силы

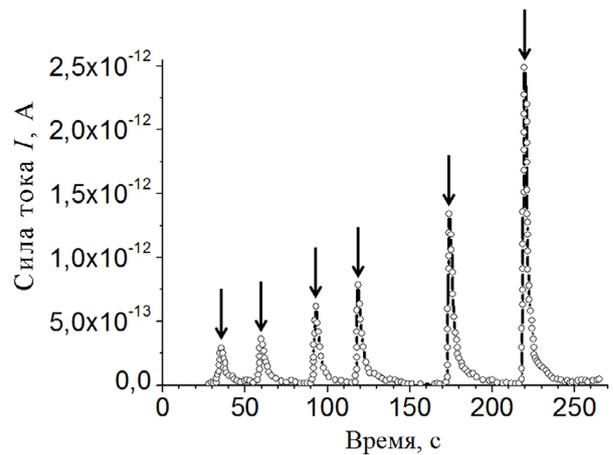


Рис. 5. Серия временных зависимостей тока при включении и выключении (↓) кратковременного интенсивного освещения с $U_n = 0.4$ — 1.5 В (напряжение на лампе увеличивается для кривых слева направо). Зависимости получены после «отогревания» образца свыше $T > 80$ К и последующего охлаждения до $T = 4.2$ К без освещения

тока от времени, аналогичная кривым на рис. 5, в увеличенном по времени масштабе. Моменты включения и выключения лампы показаны стрелками (↑) и (↓) соответственно. После выключения питания лампы и окончания переходного процесса в ней фототок быстро падает до нулевого уровня по закону близкому к экспоненциальному (пунктирная кривая) с постоянной времени 1.86 с, что примерно в шесть раз больше постоянной времени лампы при выключении при $U_n = 1.5$ В (рис. 2 в). «Задержанная» фотопроводимости в данном случае не наблюдается в пределах точности измерений.

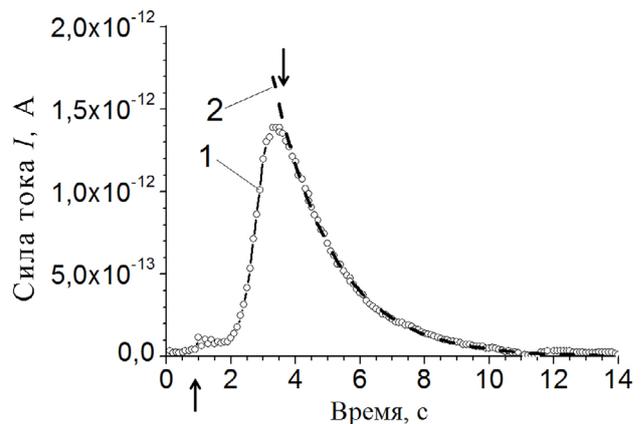


Рис. 6. Зависимость тока от времени при включении (↑) и выключении (↓) лампы при $U_n = 1.5$ В после предварительного прогрева образца с последующим охлаждением до $T = 4.2$ К без освещения: 1 — эксперимент, 2 — зависимость вида $I = I_0 \exp(-t/\tau)$, $\tau = 1.86$ с

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, наиболее характерными особенностями полученных результатов являются следующие:

1. Гиперлинейное возрастание тока на начальных участках временных зависимостей после включения освещения и зависимость характера дальнейшего нарастания тока от суммарной экспозиции образцов при освещении.

2. Появление «задержанной» фотопроводимости после выключения освещения после достаточно большой суммарной экспозиции образцов при освещении и экспоненциальный спад фототока при кратковременном освещении.

3. Большой уровень возбуждения при освещении, при котором максимальный ток примерно на два порядка или более превышает ток без освещения.

Следует отметить, что, согласно данным ряда работ, например [1], при освещении пленки $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ при $T = 4.2$ К имеют p -тип проводимости. Можно предположить, что при генерации электронно-дырочных пар электроны могут захватываться на ловушки. По-видимому, наблюдаемые особенности динамики фототока связаны с наличием в пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ нескольких типов центров захвата неравновесных носителей заряда и, возможно, нескольких каналов для их рекомбинации. В частности, в работе [5] показано, что вольт-амперные характеристики образцов $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ в режиме инжекции из контактов и ограничении тока пространственным зарядом хорошо описываются моделью, предполагающей наличие в запрещенной зоне квазинепрерывного спектра ловушек на расстоянии примерно $0,001—0,01$ эВ ниже дна зоны проводимости и глубже. В этом случае широкий диапазон сечений захвата и концентрации таких уровней позволяет в принципе описывать самые различные особенности неэкспоненциального поведения тока при включении и выключении освещения.

Нелинейное (S -образное) возрастание тока при включении освещения описано, например, авторами работы [6]. В наших экспериментах аналогичное возрастание значений I может быть связано с наличием центров захвата не только для электронов, но и для дырок. В этом случае при малой суммарной экспозиции генерируемые ИК-излучением носители заряда обоих типов могут локализоваться на соответствующих уровнях. И только после достижения равновесия между такими уровнями и носителями заряда в разрешенных

зонах будет наблюдаться заметное и гиперлинейное возрастание фототока, связанное с захватом электронов на другие уровни. При заметной роли захвата на уровни, связанные с протяженными дефектами, такой механизм также может быть реализован.

Экспоненциальное уменьшение силы фототока после выключения освещения в условиях преобладания межзонной рекомбинации при больших уровнях возбуждения может наблюдаться только для случая рекомбинации через глубокие уровни. Однако для этого требуется достаточно высокая концентрация носителей заряда в разрешенных зонах, которая в нашем случае невелика. Оценки, сделанные авторами [7], показывают, что для $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ при $T = 4.2$ К преобладает излучательная межзонная рекомбинация, которая имеет неэкспоненциальный характер при больших уровнях возбуждения. Кроме того, в нашем случае существенны процессы захвата носителей заряда на ловушки и выброса с них. Можно предположить, что при кратковременном освещении мы имеем дело с неравновесным заполнением ловушек, при котором существенно заселен только один тип из них, имеющий наибольшее сечение захвата и наименьшее время жизни носителей заряда на них, что и определяет экспоненциальный спад фототока, наблюдаемый в настоящей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в данной работе экспериментальные данные свидетельствуют о том, что вид временной зависимости нарастания и спада фотосигнала в пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ ($x = 0.26—0.28$) качественно зависит от условий освещения образцов. В зависимости от интенсивности и длительности освещения может наблюдаться как «быстрая» экспоненциальная, так и «медленная» неэкспоненциальная релаксация фототока. Характер нарастания фототока так же зависит от указанных факторов. На качественном уровне полученные результаты находят объяснение в рамках модели, предполагающей наличие в пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe<In>$ различных типов ловушек с широким набором величин сечений захвата и концентраций.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки Российской Федерации (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг., грант № 2012-1.1-12-000-2003-120).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вул Б. М., Воронова И. Д., Калюжная Г. А. и др. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 1. С. 21.
2. Акимов Б. А., Брандт Б. А., Богословский С. А. и др. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 1. С. 11.
3. Акимов Б. А., Зломанов В. П., Рябова Л. И. и др. // Высокочистые вещества. 1991. Т. 6. № 6. С. 22.
4. Климов А. Э., Шумский В. Н. Многоэлементные фотоприемные устройства дальнего ИК-диапазона на

- основе гетероэпитаксиальных пленок $PbSnTe$, легированных In , на BaF_2 . Гл. 6 в кн. «Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона» / под ред. С. П. Синицы. Новосибирск: Наука, 2001. С. 308.
5. Акимов А. Н., Ерков В. Г., Климов А. Э. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 5. С. 563.
 6. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: ГИФМЛ, 1963. 496 с.
 7. Климов А. Э., Шумский В. Н. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 2. С. 147.

Акимов Алексей Николаевич — н. с., Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: (383) 3308888, e-mail: lexa@isp.nsc.ru

Akimov Aleksey N. — Scientific Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS; tel.: (383) 3308888, e-mail: lexa@isp.nsc.ru

Климов Александр Эдуардович — заведующий лабораторией, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: (383) 3306631, e-mail: klimov@isp.nsc.ru

Klimov Alexandr E. — Head of Laboratory, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS; tel.: (383) 3306631, e-mail: klimov@isp.nsc.ru

Самойлов Александр Михайлович — д. х. н., профессор кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2596515, e-mail: samoylov@chem.vsu.ru

Samoylov Alexandr M. — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University; tel.: (473) 2596515, e-mail: samoylov@chem.vsu.ru

Шумский Владимир Николаевич — главный н. с., Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: (383) 3307883, e-mail: shumsky@isp.nsc.ru

Shumsky Vladimir N. — Chief Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS; tel.: (383) 3307883, e-mail: shumsky@isp.nsc.ru

Эпов Владимир Станиславович — инженер, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: (383) 3306631, e-mail: epov@isp.nsc.ru

Epov Vladimir Stanislavovich — engineer, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS; tel.: (383) 3306631, e-mail: epov@isp.nsc.ru