

Термостимулированные токи и неустойчивости фотоотклика в сплавах на основе PbTe(In) при низких температурах

© Б.А. Акимов, В.А. Бोगоявленский, Л.И. Рябова, В.Н. Васильков, Е.И. Слынько

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 5 мая 1998 г. Принята к печати 19 мая 1998 г.)

Исследованы фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-X-Y}Sn_XGe_YTe(In)$ ($0.06 < X < 0.2$, $0.08 < Y < 0.12$) с концентрацией In 0.5–1 ат% на подложках VaF_2 в диапазоне температур $4.2 < T < 30$ К. Единичные пики термостимулированных токов наблюдаются при $T \sim 6 - 14$ К. Установлено, что магнитное поле до 5 Тл слабо сдвигает положение пиков, практически не влияя на их форму. Пики термостимулированных токов и обнаруженные при $T < 15$ К электротермические неустойчивости объясняются возбуждением электронов из метастабильных состояний в зону проводимости.

Введение

Твердые растворы на основе PbTe с примесью In являются интересными объектами для исследований необычных примесных состояний в полупроводниках [1]. Прикладные аспекты проблемы связаны с конструированием фотоприемных устройств на основе данных соединений для инфракрасного (ИК) диапазона спектра [2,3].

Установлено, что введение In в PbTe в количестве 0.5–2.0 ат% приводит к закреплению уровня Ферми (УФ) на 70 мэВ выше дна зоны проводимости, а также к повышению однородности электрофизических свойств монокристаллов. При температурах $T < T_C \sim 20$ К в PbTe(In) при выведении из состояния равновесия наблюдаются долговременные релаксации электронных распределений [1].

Стабилизация УФ может осуществляться в запрещенной зоне твердых растворов $Pb_{1-X}Sn_XTe(In)$ [1], $Pb_{1-X}Mn_XTe(In)$ [4], $Pb_{1-X}Ge_XTe(In)$ [5]. Для создания фотоприемных устройств на базе данных сплавов предпочтительно использование эпитаксиальных пленок, которые могут быть получены методами горячей стенки и молекулярно-лучевой эпитаксии, в том числе и на кремнии с переходными слоями [6]. Широкие возможности вариации параметров энергетического спектра представляются при исследовании сплавов $Pb_{1-X-Y}Sn_XGe_YTe(In)$ [7]. Но главным преимуществом этих твердых растворов является наиболее высокое значение температуры появления задержанной фотопроводимости $T_C \sim 36$ К [2] по сравнению с другими исследованными сплавами на основе PbTe(In).

По существующим представлениям, примесь In в PbTe и сплавах на его основе индуцирует формирование глубоких DX-подобных центров. Такие центры описываются в рамках конфигурационных диаграмм [4,8,9] для системы трех уровней: $E_C - E_1 - E_2$. Уровень E_C соответствует дну зоны проводимости, уровень E_1 отвечает метастабильному одноэлектронному состоянию. Уровень Ферми стабилизируется на основном двухэлектронном уровне E_2 . При $E_2 > E_C$ в сплавах реализуется металлическое состояние, при $E_2 < E_C$ — диэлектрическое. В

последнем случае термическая энергия активации проводимости системы E_A соответствует переходам $E_2 - E_C$. По имеющимся данным, эта величина увеличивается в сплавах $Pb_{1-X-Y}Sn_XGe_YTe(In)$ с ростом X и Y [7]. В диэлектрическом состоянии уровень E_1 может быть расположен как выше, так и ниже уровня E_C .

В настоящей работе проведен цикл экспериментов по исследованию кинетических характеристик неравновесных процессов с целью обнаружить и изучить особенности метастабильных состояний примесных центров в сплавах $Pb_{1-X-Y}Sn_XGe_YTe(In)$.

Исследованные образцы, особенности методики эксперимента

Эпитаксиальные пленки состава $Pb_{1-X-Y}Sn_XGe_YTe(In)$ были получены методом горячей стенки на подложках из VaF_2 [2]. Состав шихты для синтеза соответствовал трем сериям: $X = 0.06$, $Y = 0.08$, $C_{In} = 1\%$; $X = 0.1$, $C_{In} = 0.5\%$ и $X = 0.2$, $Y = 0.12$, $C_{In} = 1\%$. Температурный режим камеры поддерживался таким образом, что температура подложки фиксировалась при 380°C, а градиент в реакционной зоне составлял не более 1–3°C. В таких условиях, очень близких к равновесным, рост пленки продолжался в течение 7–8 ч. Толщина полученных пленок варьировалась при этом от 1 до 6 мкм. Температурные зависимости удельного сопротивления пленок, снятые в условиях полного экранирования образцов от фонового излучения и при ИК подсветке, показаны на рис. 1. Все образцы обладали высокой фоточувствительностью (изменения сопротивления составляли 4–6 порядков при 4.2 К) и имели значение термической энергии активации E_A в диапазоне от 4 до 44 мэВ. Вариация величины E_A обусловлена изменением состава пленок и шихты в процессе нескольких последовательных процедур синтеза, осуществленных после шихты фиксированного состава.

В настоящей работе применялась в основном стандартная методика термоактивационной токовой спектроскопии, подробно описанная, например, в книге [10].

Экспериментальные результаты

Типичный вид кривых ТСТ показан на рис. 2 для пленки с энергией активации $E_A \sim 35$ мэВ. Образец пленки с размерами 1×2 мм охлаждался до 4.2 К и засвечивался ИК излучением с помощью миниатюрной лампы накаливания с максимальной мощностью излучения до 30 мВт. Напряжение на образце фиксировалось на уровне 1 В, регистрировался ток в цепи образца. Далее подсветка выключалась и наблюдалась длительная (до нескольких десятков минут) релаксация фототока I . Участок 1–2 на зависимостях I от времени t , приведенных на рис. 2, соответствует некоторой конечной стадии релаксации. В условиях остаточной релаксации фототока в момент времени, соответствующий точке 2, образец начинали нагревать со скоростью 1–3 К/с. При этом были зарегистрированы пики ТСТ, максимумы которых находились в диапазоне от 6 до 14 К, а форма пиков зависела от режима нагревания. На рис. 2 кривые 2, 3, 4, 5 и 2', 3', 4', 5' соответствуют нагреву образца со скоростью 1 и 2 К/с соответственно. Вблизи точки 4 ток I почти достигал своего темнового значения. На участках 4–5, 4'–5' наблюдается характерное возрастание тока, связанное с термической активацией проводимости даже в условиях экранирования.

В отличие от имеющихся многочисленных данных [10] пики ТСТ в исследованных системах наблюдаются при

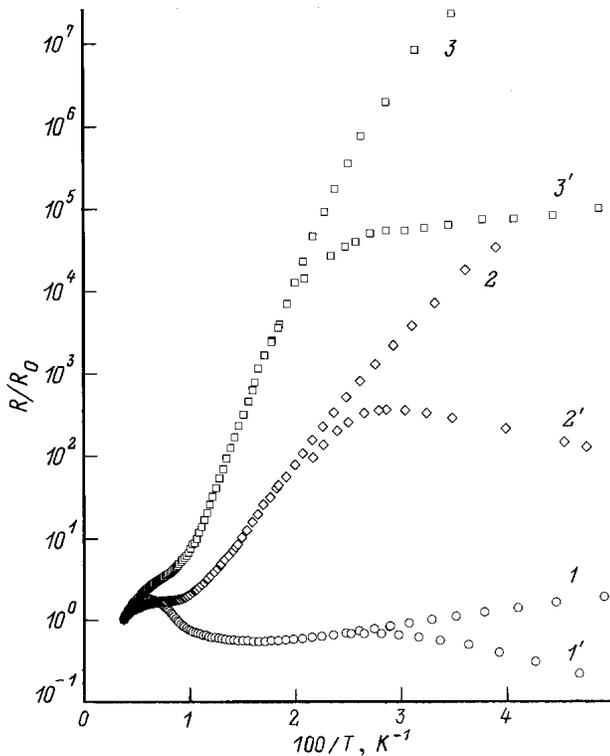


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления образцов пленок $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe(In)$ с различной энергией активации при низких температурах в условиях экранирования (1, 2, 3) и при ИК подсветке (1', 2', 3').

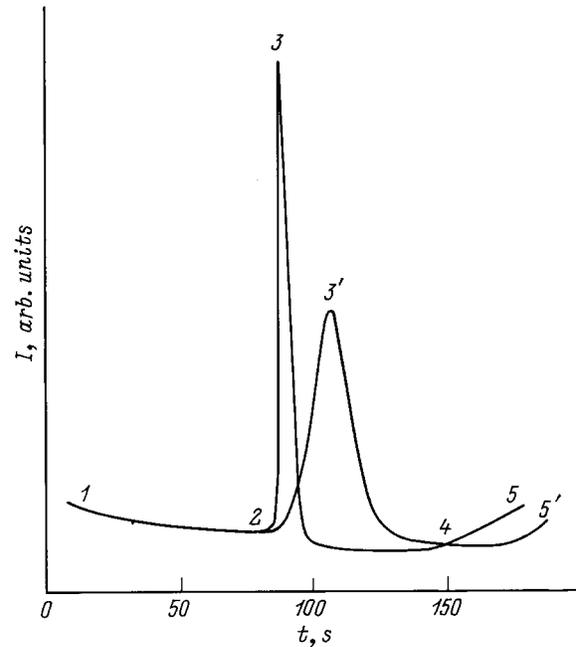


Рис. 2. Типичный вид автоматической записи термостимулированных токов в исследуемых пленках (см. текст).

существенно более низких температурах. Как видно из приведенных на рис. 2 данных, пик ТСТ является единственным и не содержит каких-либо особенностей.

Ранее, в работах [11,12], обращалось внимание на необычное поведение свойств метастабильных (парамагнитных) центров в сплавах на основе PbTe с примесями In и Ga. Поэтому в настоящей работе были исследованы особенности пиков ТСТ в магнитных полях до 5 Тл. Было установлено, что в магнитном поле амплитуда ТСТ понижается, а максимум пиков незначительно сдвигается в сторону более низких температур (рис. 3).

С ростом напряжения, приложенного к пленке (до 5 В) в условиях непрерывной подсветки, обнаружены квазипериодические колебания тока (рис. 4, края кривой 1). Такого рода колебания подробно описывались ранее для метастабильных состояний в PbTe(Ga) [13]. Кривая 2 на рис. 4 описывает кратковременное изменение окружающей среды от 4.2 до 15 К в максимуме. При таком изменении ток через образец при прочих равных условиях падает, а неустойчивости исчезают.

При исследовании фотоотклика образцов при 4.2 К было обнаружено явление бистабильности. Оказалось, что в том случае, когда интенсивность подсветки достаточно мала, для нарастания фототока при напряжениях до 3 В в систему необходимо вносить дополнительное возбуждение. Оно может быть реализовано посредством повышения температуры образца или с помощью подсветки дополнительным источником ИК излучения. Общая схема эксперимента состояла в следующем. Образец засвечивался малой засветкой при 4.2 К и затем подсветка выключалась. Через некоторое время после начала

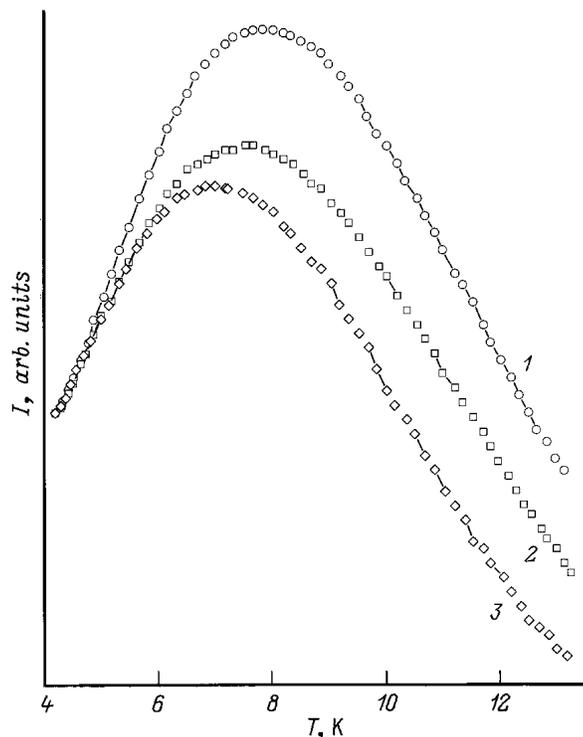


Рис. 3. Вид записи кривых термостимулированных токов в отсутствие магнитного поля (1) и в магнитном поле (2 — $H = 1$ Тл, 3 — $H = 5$ Тл).

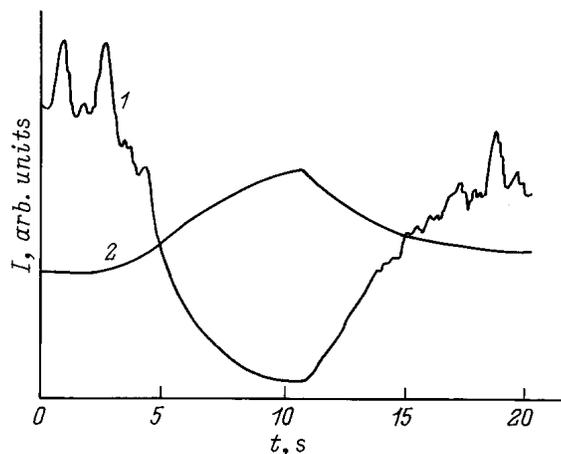


Рис. 4. Электротермические неустойчивости тока в цепи образца (1) и их трансформация при изменении температуры окружающей среды (2).

релаксации фототока подсветка снова включалась, но это последующее включение никак не влияло на релаксацию. Далее на некоторое время включался либо нагреватель образца, либо дополнительный источник ИК излучения. Было установлено, что при температуре образца около 6 К он вновь становится фоточувствительным и в дальнейшем описанный цикл обратимо воспроизводится.

Обсуждение результатов

Интерпретация экспериментальных результатов возможна в рамках описанной ранее модели глубоких центров. К сожалению, из-за сложности изучаемых многокомпонентных систем и наличия фазового перехода в исследуемом интервале температур можно предложить лишь феноменологическое описание явлений.

Наиболее логичной представляется гипотеза, что пики ТСТ соответствуют переходам носителей заряда между метастабильным уровнем E_1 и зоной проводимости. Возбуждение системы светом приводит к тому, что с уровня E_2 электроны возбуждаются в зону проводимости. При этом индуцируются электронные метастабильные состояния с уровнем E_1 . В процессе релаксации электронных распределений некоторое количество центров с энергией E_1 остается заселенным. Нагрев образца приводит к термическому возбуждению локализованных на этих центрах электронов в зону проводимости, при этом в начале нагрева проводимость образца увеличивается, а уровни E_1 начинают опустошаться. Темп переходов зонных электронов на уровень E_2 оказывается более высоким, чем темп повторного их захвата на уровень E_1 . Это может быть связано с тем, что число состояний на уровне E_2 гораздо выше, чем на уровне E_1 . С дальнейшим ростом температуры происходит опустошение как зоны проводимости, так и уровня E_1 . В динамике весь описанный процесс и приводит к пику ТСТ. Описание такого рода процессов аналогично хорошо известным токам ТСТ в широкозонных полупроводниках [10], следует лишь проследить аналогию между известными уровнями прилипания и метастабильными состояниями E_1 .

Качественный результат состоит в том, что наблюдается единственный пик ТСТ с максимумом при крайне низких температурах 6–14 К. Пик сдвигается в магнитном поле, но не расщепляется. Количественные точные расчеты положения уровня E_1 в методике ТСТ затруднены, однако приблизительные оценки дают значения энергии перехода порядка 10–20 мэВ. Те же значения энергии можно получить из рассмотрения картин электротермических неустойчивостей при различных температурах по методике работы [13]. Естественно также считать существование самих неустойчивостей качественным подтверждением предложенной модели.

Заметим, что факт наблюдения единственного пика ТСТ может дать некоторую информацию о фазовом переходе в пленках $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe(In)$. Как видно из рис. 1, никаких особенностей на кривых температурных зависимостей сопротивления не наблюдается. Совокупность полученных данных указывает на то, что в рассматриваемых системах фазовый переход может подавляться. Не исключена также и противоположная ситуация: расщепление эквивалентных долин достаточно велико, так что в качестве уровня E_C выступает лишь одна нижняя долина.

Положение уровня E_1 зависит от состава сплава. Наблюдение этого уровня при $E_1 > E_C$, по-видимому,

возможно, если учитывать, что существует барьер в конфигурационном пространстве между этим уровнем и зонной проводимости [4,9]. Однако методически наблюдение этого эффекта в сплавах с малой (до 10 мэВ) энергией активации осложняется тем, что наличие в камере с образцов источников с температурой выше 15 К приводит к заметной фотопроводимости пленок. При больших энергиях активации (выше 40 мэВ) релаксации фототока становятся столь быстрыми, что ТСТ зарегистрировать не удастся. Таким образом, наиболее надежными можно считать данные, полученные в промежуточном интервале энергий активации.

Интерпретация экспериментов по бистабильности фототоклика и зависимостей формы и положения пиков ТСТ от магнитного поля пока вызывает затруднения.

В заключение отметим важное следствие представленных исследований. Существование метастабильных состояний, которые могут быть частично заселены при подсветке, фактически означает, что на базе рассматриваемых сплавов могут быть созданы длинноволновые фотоприемные устройства с предварительным возбуждением метастабильных состояний.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 96-02-16275-а и № 96-15-96500.

Список литературы

- [1] В.А. Акимов, А.В. Дмитриев, Д.Р. Хохлов, Л.И. Рябова. *Phys. St. Sol. (a)*, **137**, 9 (1993).
- [2] V.F. Chishko, V.T. Hryapov, I.L. Kasatkin, V.V. Osipov, E.I. Slyn'ko, O.V. Smolin, V.V. Tretinik. *Infr. Phys.*, **33**, 197 (1993).
- [3] В.А. Акимов, Л.И. Рябова, В.Н. Шумский, Н.И. Петиков. *Infr. Phys.*, **34**, 375 (1993).
- [4] Б.А. Акимов, Н.А. Львова, Л.И. Рябова. *ФТП*, **30**, 1647 (1996).
- [5] Х.А. Абдуллин, А.И. Лебедев. *Письма ЖЭТФ*, **39**, 272 (1984).
- [6] H. Zogg, S. Blunier, T. Hoshino, C. Maissen, J. Masek, A.N. Tiwari. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **38**, 1110 (1991).
- [7] Х.А. Абдуллин, А.И. Лебедев. *ФТП*, **19**, 1725 (1985).
- [8] Z. Wilamowski, T. Suski, W. Jantsch. *J. Acta Phys. Polon (a)*, **82**, 561 (1992).
- [9] Б.А. Акимов, А.В. Албул, Л.И. Рябова. *ФТП*, **29**, 2158 (1995).
- [10] Ю.А. Гороховский, Г.А. Бордовский. *Термоактивационная спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков* (М., Наука, 1991).
- [11] Б.А. Акимов, А.В. Никорич, Д.Р. Хохлов, С.Н. Чесноков. *ФТП*, **23**, 668 (1989).
- [12] A.V. Vasil'ev, B.A. Volkov, T.N. Voloshok, S.V. Kuvshinnikov. *Proc. 23rd Int. Conf. Phys. Semicond.* (Berlin, 1996), v. 4, p. 3009.
- [13] Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт, А.В. Албул, Л.И. Рябова. *ФТП*, **31**, 133 (1997).

Редактор В.В. Чалдышев

Thermally induced currents and instabilities of photoresponse in PbTe(In)-based alloys at low temperatures

B.A. Akimov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.N. Vasil'kov, S.I. Slyn'ko

M.V. Lomonosov Moscow State University, 119899 Moscow, Russia

Abstract The thermally induced currents (TIC) and instabilities of photoresponse in $\text{Pb}_{1-X-Y}\text{Sn}_X\text{Ge}_Y\text{Te}(\text{In})$ ($0.06 < X < 0.2$; $0.08 < Y < 0.12$; $0.5\% < C_{\text{In}} < 1\%$) films prepared on BaF_2 substrates have been investigated at temperatures $4.2 < T < 30$ K. The temperature corresponding to the maximum of single TIC peaks T_M appears to be extremely low being from 6 K up to 14 K for films with different compositions. It is established that the influence on the magnetic fields up to 5 T on the shape of TIC peaks and T_M values is negligible. The results are interpreted in terms of thermal excitation of charge carriers from a metastable impurity level E_1 to the conduction band E_C . At low excitation levels under the IR-illumination instabilities of photoresponse have been observed at temperatures close to 4.2 K. The combined effect of lighting and slight heating of the sample up to ~ 6 K results in reducing or increasing of the photoresponse depending on experimental conditions.

Fax: (095) 932 88 76 (Akimov)

E-mail: akimov@mig.phys.msu.ru (Akimov)