

Электротехнические неустойчивости, обусловленные метастабильными электронными состояниями в $\text{PbTe}(\text{Ga})$

© Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт, А.В. Албул, Л.И. Рябова

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

(Получена 26 февраля 1996 г. Принята к печати 1 апреля 1996 г.)

Проведено феноменологическое описание электротермических неустойчивостей в высокоомных монокристаллах $\text{PbTe}(\text{Ga})$ при облучении образцов инфракрасным светом. Неустойчивости проявляются в виде периодических колебаний тока в цепи образца и его температуры в достаточно сильных электрических полях. Показано, что для наблюдения этих явлений важно наличие в энергетическом спектре полупроводника метастабильных электронных состояний, уровни которых расположены на расстоянии порядка 20 мэВ под дном зоны проводимости.

Введение

Среди семейства модифицированных сплавов халькогенидов свинца [1] одним из наиболее интересных объектов является $\text{PbTe}(\text{Ga})$. В последнее время для описания свойств этого соединения были получены новые, весьма важные экспериментальные данные [2–7] и предложены модели спектра примесных состояний.

При легировании PbTe галлием в некоторой области концентраций примеси Ga $((1-3) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3})$ реализуется диэлектрическое состояние, не характерное для узкощелевых полупроводников. При этом концентрация носителей заряда близка к собственной и составляет при азотных температурах $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а при гелиевой температуре $n < 10^9 \text{ см}^{-3}$. Температурные зависимости сопротивления R , снятые как в условиях экранировки образцов от фонового излучения, так и при подсветке инфракрасным излучением, резко (на 9 порядков) различаются между собой при температуре $T < T_c = 80 \text{ К}$. Времена релаксации неравновесных электронов составляют $\tau \simeq 10^{-3} \text{ с}$ при 77 К и $\tau > 10^5 \text{ с}$ при 4 К. При низких температурах "замороженная" концентрация неравновесных электронов достигает $n \simeq 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Результаты измерений спектров фотопроводимости (ФП) [6] и кинетики ФП [7] позволили предложить диаграмму спектра примесных состояний в $\text{PbTe}(\text{Ga})$, которая в первом приближении позволяет качественно описать имеющиеся данные и оценить некоторые характерные энергии в спектре (см. рисунок этой диаграммы в работе [7]). Для тематики настоящей работы эту систему можно рассматривать как трехуровневую. Уровень основного примесного состояния Ga расположена на расстоянии порядка 70 мэВ ниже дна зоны проводимости и стабилизирует уровень Ферми в $\text{PbTe}(\text{Ga})$. При фотоионизации основного уровня образуются метастабильное состояние, уровень которого находится приблизительно на 20 мэВ ниже дна зоны проводимости. Два примесных уровня вместе с зоной проводимости и образуют упомянутую

трехуровневую систему, в основном определяющую кинетику ФП [7]. Основой для постановки исследований, представленных в данной работе, явилось предположение авторов, что полупроводник с такой системой уровней может служить модельным объектом для изучения автоколебаний.

Был также предложен метод реализации этих процессов, заключающийся в следующем. Если светом постоянно возбуждать электроны в метастабильные состояния и приложить к образцу электрическое поле такой величины, при которой возникает условие джоулева пробоя [8], то в образце будут возникать периодические колебания тока и температуры. Когда в образце ток увеличивается, увеличивается и температура образца. При достижении некоторой критической температуры, когда ключевую роль играют процессы релаксации из метастабильного состояния в основное, концентрация электронов на уровнях истощается, что приводит к падению тока и прекращению разогрева образца. Поскольку после этого цикла вновь начинается разогрев образца, связанный с накоплением электронов в метастабильных состояниях, обусловленным подсветкой, процесс повторяется и может воссоздаваться периодически. В настоящей работе произведены эксперименты по подбору соответствующих условий: величины электрического поля, мощности подсветки, температуры окружающей среды, а также условий теплоотвода. В результате колебания тока и температуры были выявлены и анализируются далее. Вместе с тем в монокристаллах $\text{PbTe}(\text{Ga})$ обнаружен новый тип неустойчивости, не описывающийся в рамках представлений теплового пробоя.

Исследованные образцы и методика эксперимента

Для исследований использовались несколько серий монокристаллов $\text{PbTe}(\text{Ga})$, выращенных методом Чохральского, Бриджмена и паровыми методами. Гальваномагнитные измерения, исследования кинетики и

спектров ФП на тех же образцах проводились ранее [6,7]. Электроэрозионная резка кристаллов, подготовка поверхности, травление, припаивание контактов к образцам осуществлялись по тем же методикам [7]. В настоящей работе использовались образцы с фиксированными размерами $0.3 \times 0.8 \times 3.0 \text{ мм}^3$. Во избежание неточностей, связанных с объемно-неравновесными состояниями, далее в характеристиках приводятся напряжение U на контактах и полный ток I через образец. Принципиальных качественных отличий, связанных с различными методами выращивания образцов не прослеживается. Образец помещался в экранирующую камеру вместе с нагрузочным сопротивлением и питался постоянным током от отдельного источника. В той же камере располагался миниатюрный источник инфракрасного (ИК) излучения. Регистрация переходных процессов осуществлялась с помощью цифрового запоминающего осциллографа С9-8.

Для более детального выяснения природы обнаруженных неустойчивостей проводились эксперименты по параллельному контролю изменения тока и температуры. Образец в камере подвешивался на токовых проводах на расстоянии 1 см от держателя. К боковой грани образца приклеивалась тонкая (100 мкм) дифференциальная термопара, холодный спай которой располагался на хорошо охлаждаемых в гелии деталях. Сигнал с термопары через компаратор напряжений Р3003 подавался на канал А осциллографа С9-8. На канал В подавался сигнал с сопротивления нагрузки R_l в цепи образца, пропорциональный току (при всех условиях $R_l \ll R$). Информация с осциллографа в цифровом виде передавалась на ЭВМ для последующей обработки.

Результаты экспериментов

Представим вначале краткое описание зарегистрированных неустойчивостей. Вид периодических колебаний тока при $T = 4.2 \text{ К}$ и напряжении на образце $U = 35 \text{ В}$ показан на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b–e* показаны вариации формы колебаний при увеличении: *b* — давления гелия в камере (увеличение теплоотвода), *c* — температуры окружающей среды (до 35 К), *d* — уровня подсветки и *e* — напряжения на образце (до 45 В). Колебательный процесс не удается наблюдать при температуре выше 42 К, при напряжении ниже 30 В и при слишком низком или слишком высоком уровне подсветки (при мощности теплового источника ниже 1.6 мВт или выше 2.8 мВт).

Образцы совместной записи колебаний тока и температуры показаны на рис. 2. В условиях теплоотвода образца, описанных выше, колебания имели вид, близкий к синусоидальному (рис. 2, *a*), и средняя температура образца повышалась. Поскольку при данной конструкции достаточно точно измерять температуру образца не удается, изменения T в этих эксперимен-

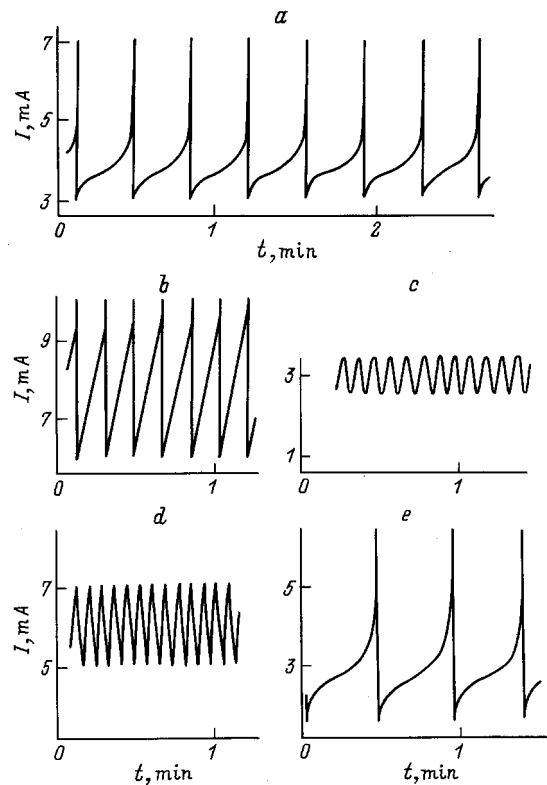


Рис. 1. Характерный вид наблюдаемых термоэлектрических неустойчивостей (колебаний тока I) в монокристаллах $\text{PbTe}(\text{Ga})$. Условия получения зависимостей *a–e* приведены в тексте.

тах носят оценочный характер. Амплитуда колебаний соответствует перегреву образца на несколько градусов при повышении средней температуры образца до 15 К. Наблюдается сдвиг фазы колебаний, который может быть также связан с массивностью и инерционностью спаев термопары. При вариации подсветки и электрического поля (рис. 2, *b*) удается наблюдать и более сложный периодический процесс, связанный с тем, что перед основным сбросом тока наблюдается по крайней мере одно более слабое колебание. Приведенные данные качественно подтверждают высказанную выше концепцию о возможности возникновения электротермических неустойчивостей в $\text{PbTe}(\text{Ga})$.

В ходе экспериментов было обнаружено, что в образце может возникнуть специфический колебательный процесс и в отсутствие непрерывной подсветки. Этот процесс может быть индуцирован следующим образом. К образцу прикладывается напряжение U_c некоторой величины. Это напряжение составляло $U_c = 24 \text{ В}$, тогда как колебания, представленные на рис. 2, *a*, происходили при $U = 40 \text{ В}$. Далее включается подсветка, и ток образца увеличивается до некоторой величины. Затем, через некоторое время $\Delta t \approx 10 \text{ с}$, подсветка выключается. Если бы к образцу было приложено слабое напряжение, ток через образец уменьшался бы в течение длительного времени,

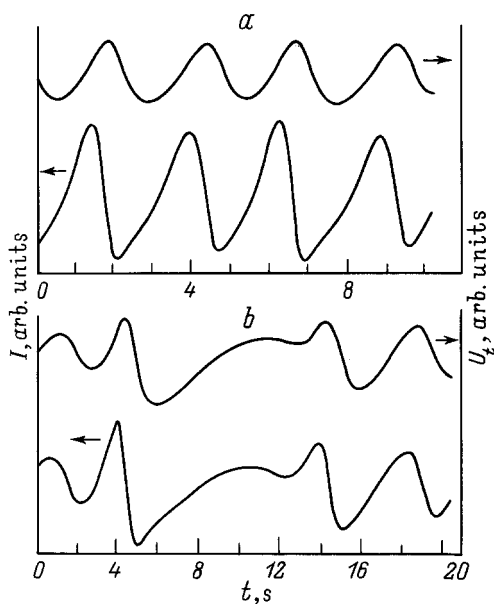


Рис. 2. Вид колебаний тока I в цепи образца и температуры образца, характеризуемой эдс термопары U_t , в присутствии подсветки (см. текст).

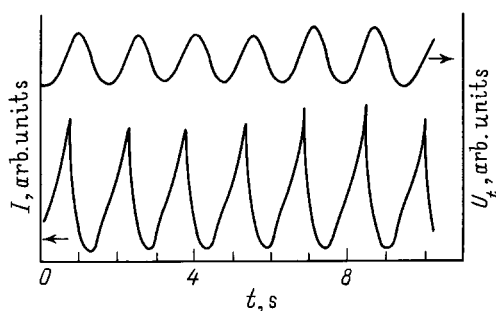


Рис. 3. Вид колебаний тока I в цепи образца и температуры образца, характеризуемой эдс термопары U_t , без подсветки (см. текст).

как это было показано в работе [7]. Но, когда к образцу прикладывается напряжение U_c , релаксация тока при некоторой критической его величине (порядка 2 мА) срывается в колебательный процесс, которым собственно и заканчивается релаксация, поскольку этот процесс по-видимому, может происходить неограниченно долго. Форма колебаний тока и температуры при таком процессе показана на рис. 3. Колебания температуры происходят вокруг некоторого среднего значения (7 К), намного меньшего, чем та же величина на рис. 2. Следует отметить, что эти колебания наблюдаются в очень узком интервале напряжений на образце $U = 23.5 \div 24.5$ В и при этом их период изменяется в этом диапазоне почти в 2 раза (от 2.8 с до 1.5 с). Характер колебаний существенно отличается от неустойчивостей, обнаруженных ранее в p -PbTe(Ga) [9].

Обсуждение результатов

Детальный количественный анализ обнаруживаемых неустойчивостей в настоящее время провести затруднительно. Уместно привести некоторые исходные данные для такого анализа.

Термическая энергия E_a активации проводимости в PbTe(Ga) при $T < 80$ К оценивается по зависимостям $\ln R(1/T)$ и составляет $E_a \sim 70$ мэВ. Величина барьера W_1 , которая определяет времена релаксации замороженной ФП при отогреве образцов, может быть оценена по измерениям характерных времен стационарной ФП в зависимости от температуры или по анализу зависимостей статических характеристик $\ln R(1/T)$, снятых в условиях подсветки в диапазоне температур $40 \div 80$ К. Основными критериями наличия одноэлектронных метастабильных состояний в PbTe(Ga) являются рассматриваемые ранее [6,7] явления термостимулированных токов, "индуцированной примесной ФП" и некоторые другие данные [4,5].

Вольт-амперные характеристики в высокоомных образцах PbTe(Ga) определяется проводимостью по примесной зоне метастабильных состояний, а также полевым и термическим забросом носителей в зону проводимости. Проводимость образца в таких условиях является функцией поля E и температуры T , которая в свою очередь определяется джоулевым разогревом системы. В этих условиях в системе может развиваться примесный пробой или примесный и джоулев пробой. Температурный и полевой разогрев электронов может привести к преодолению барьера W_1 и переходу этих электронов в основное состояние. Джоулев пробой в такой системе принципиально отличается от обычного, поскольку в процессе термической генерации носителей число центров истощается.

Явление джоулевого пробоя ранее изучалось в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ [8]. Вариации формы колебаний при изменении внешних условий (рис. 1) качественно соответствуют теоретическим представлениям. В теории теплового пробоя вводится параметр критической температуры окружающей среды $T_0^{(c)}$, при которой пробой может наблюдаться. Эта критическая температура определяется энергией активации проводимости E_a ,

$$T_0^{(c)} = E_a / 8kT, \tag{1}$$

что позволяет оценить энергию активации электронов с метастабильных состояний. Если за критическую температуру принять температуру исчезновения обнаруженных неустойчивостей, энергия активации составит $E_a \simeq 25$ мэВ. Естественно, определение этой энергии по рассматриваемому эффекту или по исследованию термостимулированных токов сопровождается большой ошибкой. Тем не менее полученные данные хорошо коррелируют с результатами оптических измерений Хохлова и Белогорохова [3]. Наблю-

дающиеся в этой работе линии спектра ФП в далекой ИК области (с энергией порядка 20 мэВ) можно предположительно связать с переходами электронов с метастабильных состояний в зону проводимости.

Природа колебаний, обнаруженных при отсутствии подсветки (рис. 3), в настоящее время не ясна и эти данные показывают, что более детальная структура спектра метастабильных состояний в $\text{PbTe}(\text{Ga})$ и возможные типы неустойчивостей могут представлять интерес для дальнейших исследований.

В заключение выражаем благодарность А.М. Гаскову, Е.И. Слынько, С.А. Белоколю за предоставленные образцы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] В.А. Акимов, А.В. Дмитриев, Д.Р. Хохлов, Л.И. Рябова. *Phys. St. Sol. (a)*, **137**, 9 (1993).
- [2] С.П. Гришечкина, А.А. Журавлев, К.-П. Моллманн, К.Х. Херрманн. *ФТП*, **25**, 677 (1991).
- [3] А.И. Белогорохов, Е.И. Слынько, Д.Р. Хохлов. *Письма ЖТФ*, **18**, 30 (1992).
- [4] А.Н. Васильев, Т.Н. Волошок, Ю.П. Гайдуков, Н.П. Данилова. *Письма ЖЭТФ*, **58**, 970 (1993).
- [5] А.Н. Васильев, Б.А. Волков, Т.Н. Волошок, С.В. Кувшинников. *Письма ЖЭТФ*, **61**, 768 (1995).
- [6] Б.А. Акимов, А.В. Албул, В.Ю. Ильин, М.Ю. Некрасов, Л.И. Рябова. *ФТП*, **29**, 2015 (1995).
- [7] Б.А. Акимов, А.В. Албул, Л.И. Рябова. *ФТП*, **29**, 2158 (1995).
- [8] В.А. Акимов, Н.В. Brandt, В.С. Kerner, V.N. Nikiforov, S.M. Chudinov. *Sol. St. Commun.* **43**, 31 (1982).
- [9] Ю.Г. Троян, Ф.Ф. Сизов, В.М. Лакеенков. *УФЖ*, **32**, 467 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

Electrothermal instabilities induced by metastable electronic state in $\text{PbTe}(\text{Ga})$

B.A. Akimov, N.B. Brandt, A.V. Albul, L.I. Ryabova

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

Abstract A phenomenological description of the electrothermal instabilities in high-ohmic single crystals of $\text{PbTe}(\text{Ga})$ under the IR-radiation of the samples by a heat source is performed. The instabilities appear as periodical vibrations of the electric current in the circuit of the sample and its temperature in high enough electric fields. A significant contribution into the observed processes is made by metastable electronic states, of which levels are situated ~ 20 meV lower the bottom of the conduction band.