

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ

Белоконь С. А., Верецагина Л. Н., Иванчик И. И.,
Рябова Л. И., Хохлов Д. Р.

Представлены результаты измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла в $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ в диапазоне температур $4.2\div 300$ К при изменении степени легирования N_{Ga} в пределах $(0.1\div 1)$ ат% в условиях темноты и контролируемой ИК подсветки. Обнаружены существенные различия в характере гальваномагнитных свойств и реакции на ИК подсветку образцов p -типа с $N_{\text{Ga}} < 0.4$ ат% и n -типа с $N_{\text{Ga}} \geq 0.4$ ат%. Полученные результаты интерпретируются в рамках модели, учитывающей неоднородность степени легирования по объему кристалла и эффект стабилизации уровня Ферми в определенном диапазоне N_{Ga} .

Известно, что введение примеси Ga в теллурид свинца позволяет при определенных условиях получить высокоомный (ВО) материал с малой концентрацией носителей заряда $n \sim 10^{11}$ см⁻³ в области азотных температур [1, 2]. Возникновение такого ВО состояния, как правило, связывается с формированием глубокого уровня, стабилизирующего в определенном диапазоне концентраций легирующей примеси положение уровня Ферми (УФ) в запрещенной зоне PbTe [1-3]. В то же время характер перехода из низкоомного (НО) в ВО состояние и обратно при изменении степени легирования материала до конца не ясен. В частности, имеющиеся литературные данные не дают однозначного ответа на вопрос, смещается ли при увеличении N_{Ga} уровень химического потенциала в глубь запрещенной зоны непрерывно или скачком.

В настоящей работе рассматривался характер изменения гальваномагнитных свойств $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ в диапазоне температур $4.2\div 300$ К при изменении степени легирования материала.

Монокристаллы PbTe , легированные галлием в количестве $N_{\text{Ga}} = (0.1\div 1)$ ат% (здесь и далее данные по N_{Ga} соответствуют загрузке в шихту), выращивались методом Чохральского. Исследовалась также эпитаксиальная пленка $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$, выращенная методом лазерного напыления на подложке BaF_2 . Величина N_{Ga} в шихте составляла ~ 1 ат%.

Образцы монтировались в специальную низкотемпературную камеру, охлаждаемую жидким гелием и полностью экранирующую образец от фонового излучения. Контролируемая ИК подсветка образца осуществлялась светодиодом с длиной волны $\lambda \sim 1$ мкм. Энергия кванта излучения светодиода существенно превышает ширину запрещенной зоны материала ϵ_g . Проводились измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла в температурном интервале $4.2\div 300$ К в условиях темноты и ИК подсветки.

Кристаллы с $N_{\text{Ga}} < 0.4$ ат% имели p -тип проводимости, образцы с $N_{\text{Ga}} \geq 0.4$ ат% были n -типа. Омические контакты к материалу p -типа изготовлялись путем подварки платиновых проволочек, к образцам n -типа — с помощью подпайки индием.

Для объемных кристаллов измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла проводились на нескольких образцах, вырезанных из разных мест шайбы; кроме того, для всех исследованных материалов сравнивались результаты измерений на одном образце, но на разных парах потенциальных

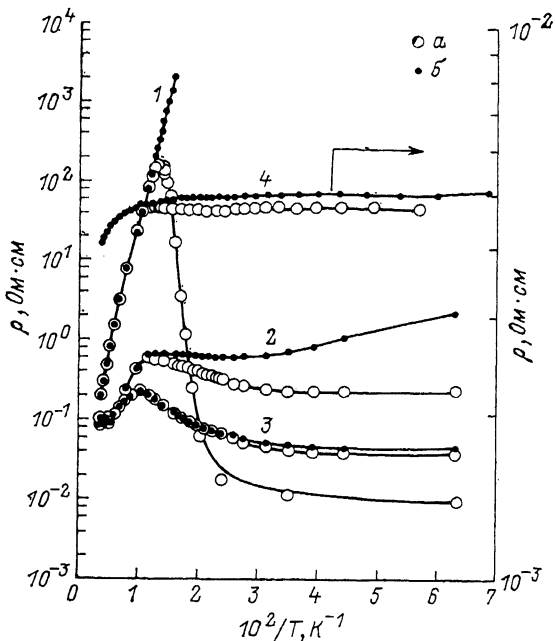


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ при подсветке (а) и в темноте (б).

N_{Ga} , ат%/с: 1 — 0,4, 2 — 0,1, 3 — 0,2, 4 — 1 (пленка).

и холловских контактов. Оказалось, что результаты таких измерений совпадают лишь для сплавов с $N_{\text{Ga}}=0.4$ и 1 ат%, а в остальных случаях различаются, иногда довольно существенно. Так, для двух образцов, вырезанных из шайбы с $N_{\text{Ga}}=0.2$ ат%, величина удельного сопротивления при комнатной температуре различалась более чем на порядок. Тем не менее удается проследить некоторые общие закономерности.

Типичные температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$, коэффициента Холла $R(T)$ и холловской подвижности $\mu(T)$, измеренные в условиях темноты и ИК подсветки, представлены на рис. 1—3 соответственно. Кривые, измеренные при освещении светодиодом, соответствуют усредненным по объему образца значениям ρ , R и μ .

Вид $\rho(T)$ для объемных образцов p -типа с $N_{\text{Ga}}=0.1$ и 0.2 ат% и для пленки n -типа аналогичен. В области $T > 100$ К наблюдаются близкий к активационному рост удельного сопротивления с понижением температуры. Характерная энергия активации ϵ_a , вычисленная согласно соотношению $\rho \sim \exp(\epsilon_a/kT)$, невелика: для образца с $N_{\text{Ga}}=0.1$ ат% $\epsilon_a=27$ мэВ, при $N_{\text{Ga}}=0.2$ ат% $\epsilon_a=15$ мэВ. В пленке n -типа величина ϵ_a еще меньше — 4 мэВ. Важно отметить корреляцию между ϵ_a и величиной удельного сопротивления материала при $T=300$ К. По мере дальнейшего понижения температуры характер изменения сопротивления существенным образом зависит от образца и даже от выбора пары потенциальных контактов.

Коэффициент Холла материалов p -типа при $T > 100$ К также имеет температурную зависимость, близкую к активационной, с $\epsilon_a \sim 10\text{--}30$ мэВ. При более низких температурах скорость изменения R уменьшается, и при $T < 50$ К коэффициент Холла практически не меняется. Характерно, что уровень

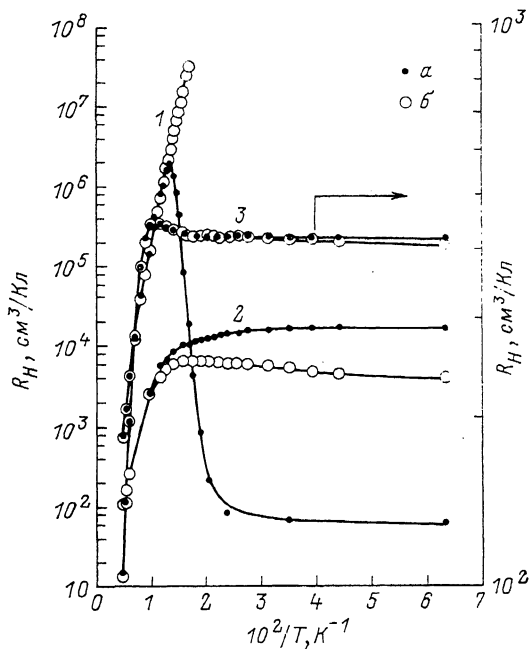


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла при подсветке (а) и в темноте (б) образцов $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$.

1-3 — то же, что и на рис. 1.

насыщения величины R в образце, содержащем 0.1 ат% Ga, на 1.5 порядка выше, чем в образце, вырезанном из шайбы с 0.2 ат% Ga.

При включении ИК подсветки в монокристаллах $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ p -типа наблюдается заметная фотопроводимость, обусловленная ростом концентрации дырок и исчезающая при повышении температуры выше некоторого критического значения T_c . Величина T_c меняется от образца к образцу и лежит в пределах 40–100 К. Интересно, что в сплаве, содержащем 0.1 ат% Ga, $T_c \approx 100$ К, а при $N_{\text{Ga}}=0.2$ ат% $T_c \approx 40$ К. Для пленки n -типа $T_c \approx 80$ К.

В образце с $N_{\text{Ga}}=1$ ат% температурная зависимость сопротивления имеет ярко выраженный металлический характер, концентрация электронов во всем температурном интервале 1.2–300 К составляет $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см^{-3} , фотоотклик не зарегистрирован.

Образец, содержащий 0.4 ат% Ga, является наиболее высокоомным. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла имеют активационный характер с $\epsilon_a \approx 140$ мэВ [считая $\rho \sim \exp(\epsilon_a/2kT)$] (рис. 1, 2). В области азотных температур концентрация свободных электронов составляет лишь $\sim 10^{11}$ см^{-3} . При освещении образца светодиодом в области $T < T_c \approx 80$ К наблюдается значительный фотоотклик, достигающий по меньшей мере нескольких порядков величины при температурах, близких к гелиевым. По-видимому, данный образец соответствует ВО кристаллу n -типа, исследованному в работах [1, 2, 4]. Отметим, что образцы $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ с аналогичными свойствами были получены в различных лабораториях с помощью различных методов [1–4].

При температурах выше T_c температурная зависимость холловской подвижности всех исследованных образцов является степенной: $\mu \sim T_c^n$, $n \approx \approx (-2 \pm 0.3)$, что вполне характерно для теллурида свинца [5] (рис. 3). При низких температурах $T < 30$ К в материалах p -типа наблюдается снижение

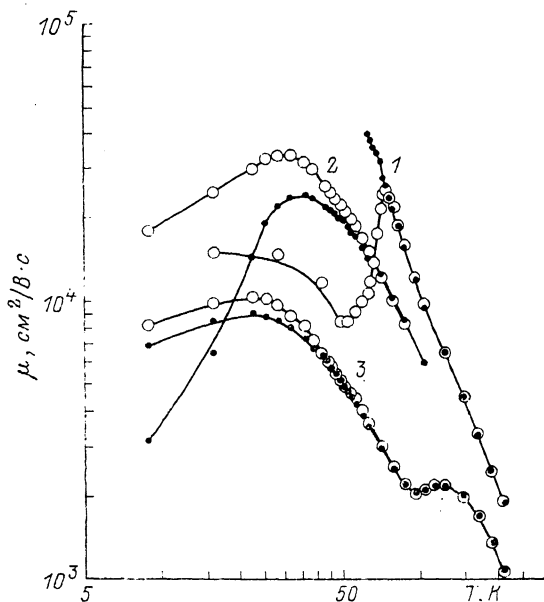


Рис. 3. Температурные зависимости холловской подвижности в $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$ при подсветке и в темноте.

1-3 — то же, что и на рис. 1.

подвижности с уменьшением T , причем в сплаве с 0.1 ат% Ga падение μ является гораздо более резким ($n \approx 1.7$), чем для образца с $N_{\text{Ga}}=0.2$ ат% ($n \approx 0.3$). Включение светодиода снижает скорость падения μ при понижении температуры. При $T=T_c$ на темновой зависимости $\mu(T)$ сплавов p -типа наблюдается небольшой излом, который сглаживается при включении подсветки. В ВО материале с $N_{\text{Ga}}=0.4$ ат%, напротив, в темновом состоянии зависимость $\mu(T)$ является достаточно гладкой в точке T_c , а при включении подсветки на $\mu(T)$ появляется особенность. Важно отметить, что в сплавах p -типа ИК подсветка приводит к росту величины эффективной холловской подвижности в отличие от ВО образца, содержащего 0.4 ат% Ga (рис. 3).

Полученные результаты могут быть, на наш взгляд, интерпретированы следующим образом.

При легировании Ga в запрещенной зоне материала возникает локальный уровень ϵ_i , природа которого не связана напрямую с примесью Ga, и количество состояний на ϵ_i существенно меньше количества введенной примеси. Тем не менее плотность состояний на уровне достаточно велика для обеспечения эффекта стабилизации уровня Ферми в определенном интервале N_{Ga} .

Расположение уровня фиксировано внутри запрещенной зоны; он лежит на ~ 140 мэВ ниже дна зоны проводимости. Скорее всего, примесные состояния ϵ_i хорошо локализованы, о чем свидетельствует тот факт, что для ВО образцов, полученных разными способами и, очевидно, имеющих разную степень заполнения ϵ_i , величина энергии активации практически не меняется.

Природа задержанной фотопроводимости, наблюдающейся в ВО $\text{PbTe}\langle\text{Ga}\rangle$, связана с особенностями примесных состояний, обеспечивающих стабилизацию уровня Ферми. Состояния системы с локализованным и делокализованным электронами разделены барьером в конфигурационном пространстве, что обеспечивает большие времена жизни фотовозбужденных носителей заряда и, в конечном итоге, высокий фототок при температурах $T < T_c \approx 80$ К [2].

По-видимому, основная часть примеси Ga, вводимой в материал, обладает обычным донорным действием. По мере увеличения N_{Ga} уменьшается концентрация дырок. Этот процесс, однако, не может происходить равномерно по всему объему образца. В результате в материалах p -типа появляются области, в которых уровень Ферми уже стабилизирован уровнем ϵ_i в запрещенной зоне, однако значительная часть образца недокомпенсирована. Возникающий в результате крупномасштабный потенциальный рельеф зон является, по нашему мнению, основной причиной появления фотоотклика в данных материалах. Чем больше амплитуда рельефа, тем больше должны быть дрейфовый ϵ_d и рекомбинационный ϵ_p барьеры, выше значение сопротивления материала, быстрее должна уменьшаться подвижность при понижении температуры [6]. Величина ϵ_d , по-видимому, соответствует энергии высокотемпературной активации ϵ_{ar} , а ϵ_p должна коррелировать с температурой появления фотопроводимости T_c . Приведенные соображения говорят о том, что амплитуда потенциального рельефа в исследованном образце с $N_{Ga}=0.2$ ат% меньше, чем в кристалле с $N_{Ga}=0.1$ ат%. В то же время значительное отличие комнатного значения сопротивления для двух образцов с $N_{Ga}=0.2$ ат% свидетельствует в пользу того, что для материала p -типа флуктуации свойств даже в пределах одной шайбы могут быть больше, чем для двух шайб с несколько различающимися N_{Ga} .

В материалах p -типа подсветка приводит к увеличению концентрации неравновесных дырок. Известно, что в $VO PbTe\langle Ga \rangle$ за эффект задержанной фотопроводимости ответственны неравновесные электроны [2]. Тем не менее возможно, что вклад в фотоотклик в материале p -типа дает фотопроводимость, обусловленная генерацией неравновесных электронов в VO областях. В этом случае барьер, разделяющий n - и p -области, становится более крутым и высоким, и пространственное разделение фотогенерированных электронов и дырок на барьере происходит более эффективно. В результате затрудняется рекомбинация и увеличивается время жизни неравновесных дырок, обеспечивающих рост проводимости образца.

Таким образом, природа появления задержанной фотопроводимости в кристаллах p -типа и в материале со стабилизированным уровнем Ферми различна. Если в $VO PbTe\langle Ga \rangle$ эффект обусловлен особенностями примесных состояний, то в кристаллах p -типа он является следствием появления крупномасштабного потенциального рельефа зон. В пользу такого вывода свидетельствует также то обстоятельство, что ИК подсветка различным образом влияет на величину эффективной холловской подвижности в этих материалах. В образцах p -типа генерация неравновесных носителей заряда приводит к некоторому выравниванию потенциального рельефа и величина μ растет. В $VO PbTe\langle Ga \rangle$ фотовозбужденные электроны практически не диффундируют в глубь образца [7]. Таким образом, в образце создается потенциальный рельеф зон, что приводит к эффективному снижению подвижности.

Отсутствие фотоотклика в HO образце n -типа с $N_{Ga} \approx 1$ ат% свидетельствует о том, что задержанная фотопроводимость не возникает, если уровень ϵ_i полностью заполнен. Причина этого эффекта неясна.

Для пленки, исследованной в настоящей работе, по-видимому, осуществляется промежуточный случай: в некоторых областях образца реализуется VO состояние, но в основном его объем обладает металлической проводимостью n -типа. В данном случае включение подсветки должно приводить к выравниванию потенциального рельефа в образце, поэтому эффект фотопроводимости обусловлен здесь не разделением неравновесных носителей заряда в поле неоднородностей, а уменьшением сопротивления VO областей при подсветке, о чем свидетельствует совпадение T_c пленки с критической температурой для VO образцов.

Таким образом, данные настоящей работы указывают на то, что при леги-

ровании RbTe галлием в спектре полупроводника образуется глубокий уровень, практически не меняющий своего положения при изменении степени легирования. В определенном диапазоне концентрации примеси уровень Ферми стабилизирован уровнем ϵ_i . Вне этого диапазона уровень Ферми находится в одной из разрешенных зон.

Список литературы

- [1] Бушмарина Г. С., Грузинов Б. Ф., Драбкин И. А. и др. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 10. С. 1874—1881.
- [2] Акимов Б. А., Брандт Н. Б., Гаськов А. М. и др. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 87—92.
- [3] Сизов Ф. Ф., Пляцко С. В., Лакеенков В. М. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 4. С. 592—596.
- [4] Троян Ю. Г., Сизов Ф. Ф., Лакеенков В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 10. С. 1776—1781.
- [5] Heinrich H. // *Narrow Gap Semiconductor Physics and Application* / Ed. by W. Zavadski, *Lecture Notes in Physics*, 133. Berlin—Heidelberg—N. Y., 1980. P. 407—426.
- [6] Шейнкман М. К., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 2. С. 209—233.
- [7] Akimov B. A., Brandt N. B., Chesnokov S. N., Egorov K. N., Khokhlov D. R. // *Sol. St. Commun.* 1988. V. 66. N 8. P. 811—813.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова

Получена 10.06.1991
Принята к печати 24.07.1991