

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$

Е.П.Скипетров, А.Н.Некрасов, А.Г.Хорош

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

(Получена 3 ноября 1993 г. Принята к печати 7 декабря 1993 г.)

Исследовано влияние облучения быстрыми электронами (энергия электронов $E = 6$ МэВ, доза облучения $\Phi \leq 7.7 \cdot 10^{17}$ см⁻²) при 300 К и последующего гидростатического сжатия до давлений $P \leq 15$ кбар на электрофизические свойства сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ в условиях экранировки внешнего излучения и контролируемой подсветки тепловым источником инфракрасного излучения. Установлено, что облучение электронами практически не влияет на электрофизические свойства сплавов, величину стационарной фотопроводимости и величину барьера W между локализованными и зонными состояниями в исследованных сплавах. Полученные результаты объясняются на основе модели энергетического спектра, предложенной ранее для нелегированных сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$, облученных электронами, и предполагающей жесткую стабилизацию уровня Ферми в исследованных образцах примесным уровнем индия.

Введение

Легирование индием приводит к возникновению в энергетическом спектре сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ квазилокального уровня E_{In} , положение которого относительно краев энергетических зон в точке L зоны Бриллюэна зависит от содержания олова в сплаве, температуры, давления и магнитного поля [1-3]. Примесная полоса индия обладает донорно-акцепторными свойствами и стабилизирует уровень Ферми в образце при легировании другими примесями и введении нестехиометрических дефектов, если их концентрация меньше концентрации индия ($N_i < N_{In}$). С ростом содержания олова в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ квазилокальный уровень индия приближается ко дну зоны проводимости, пересекает дно зоны проводимости и потолок валентной зоны соответственно при $x \approx 0.21$ и $x \approx 0.28$ ($T = 4.2$ К) и движется в глубь валентной зоны. Поэтому в области составов, соответствующих $0.22 \leq x \leq 0.28$, стабилизированный уровень Ферми находится в

запрещенной зоне и реализуется диэлектрическое состояние, в котором концентрация носителей заряда близка к собственной.

Другим важным свойством сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ является долговременная релаксация неравновесных носителей заряда при низких температурах ($T < 20$ К). Известно, что при выведении системы электронов из равновесного состояния с помощью ИК подсветки, сильного электрического поля или быстрого изменения магнитного поля процессы перетекания электронов между примесными и зонными состояниями носят долговременный характер [1-3]. При понижении температуры в области ($T < 20$ К) времена жизни неравновесных носителей заряда экспоненциально увеличиваются и достигают значений $\sim 10^5$ с. Такой активационный характер процесса захвата электрона дефектом интерпретируется как наличие барьера W в конфигурационном пространстве, отделяющего локализованные состояния от зонных [4,5]. Таким образом, оказывается, что в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ уровень Ферми жестко стабилизирован примесным уровнем индия, обладающим донорно-акцепторными свойствами. Легирование другими примесями и введение нестехиометрических дефектов не вызывает заметных изменений электрофизических параметров сплавов при концентрациях $N_i < N_{in}$. В то же время в работах [6,7] показано, что электронное облучение нелегированных сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$, вызывающее генерацию простейших дефектов в подрешетках металла и халькогена, приводит к существенным изменениям параметров образцов (изменение концентрации электронов и дырок, переход в диэлектрическое состояние) в результате появления в энергетическом спектре сплавов резонансных уровней донорного и акцепторного характера. Можно предположить, что сплавы $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ должны обладать повышенной радиационной стойкостью и при облучении электронами электрофизические параметры сплавов будут изменяться достаточно слабо.

В настоящей работе исследовано влияние облучения электронами на электрофизические и фотоэлектрические свойства сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ ($x = 0.22, 0.25$), находящихся как в металлической, так и в диэлектрической фазах, с целью выяснения вопроса о возможности управления свойствами сплавов с помощью облучения, определения характера воздействия облучения на величину барьера W между локализованными и зонными состояниями и оценки радиационной стойкости параметров этих сплавов.

1. Образцы. Методика измерений

В настоящей работе исследованы монокристаллические образцы сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.22, 0.25$), легированные индием.¹ Параметры исследованных образцов при $T = 4.2$ К приведены в таблице.

Исходные образцы облучались быстрыми электронами (энергия электронов $E = 6$ МэВ, доза облучения $\Phi \leq 7.7 \cdot 10^{17}$ см⁻²) при 300 К на линейном импульсном ускорителе ЭЛУ-6. У каждого образца до облучения и после нескольких облучений электронами измерялись температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента

¹ Образцы для измерений предоставлены А.В.Никоричем (НИИ Прикладной физики АН Молдовы, г.Кишинев).

Образец	x	N_{In} , ат%	n , см^{-3}	ρ , Ом·см	$\mu_H \cdot 10^{-5}$, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\Phi_{\text{max}} \cdot 10^{-17}$, см^{-2}
I-1	0.22	0.005	$1.3 \cdot 10^{17}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	5.5	7.7
I-2	0.22	0.005	$0.9 \cdot 10^{17}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	1.5	2.7
I-11	0.22	0.05	$1.7 \cdot 10^{16}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$	6.5	2.7
I-12	0.22	0.05	$2.0 \cdot 10^{16}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	5.7	7.7
434-1	0.22	0.2	$6.9 \cdot 10^{15}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	3.9	0.96
434-3	0.22	0.2	$4.1 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	0.57	0.96
I-21	0.22	0.2	$< 8 \cdot 10^{14}$	$> 5.0 \cdot 10^1$	—	1.4
I-22	0.22	0.2	$< 8 \cdot 10^{14}$	$> 5.0 \cdot 10^1$	—	1.4
I-25	0.25	0.5	$< 8 \cdot 10^{14}$	$> 4.0 \cdot 10^3$	—	1.0

Холла R_H в интервале температур $4.2 \leq T \leq 300 \text{ K}$ и магнитном поле $B \leq 0.4 \text{ T}$, а также осцилляции Шубникова-де-Гааза при $T = 4.2 \text{ K}$, $B \leq 7 \text{ T}$, $B \parallel \langle 100 \rangle$. При проведении измерений образцы находились в специальной камере из латуни, которая помещалась в вакуумированную тонкостенную трубу из нержавеющей стали, и полностью экранировались от внешнего излучения и излучения деталей криостата. В случае необходимости контролируемая ИК подсветка осуществлялась с помощью теплового источника (угольное сопротивление, через которое пропускался постоянный ток) с температурой $T^* \leq 50 \text{ K}$, размещенного в капсуле.

После облучения электронами ($\Phi = 2.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) один из образцов, I-11, исследовался также в условиях гидростатического сжатия до давлений $P \leq 15 \text{ кбар}$ [7].

2. Гальваномагнитные явления в сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$, облученных электронами

Исходные образцы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0.22$), исследованные в настоящей работе, несколько различались по своим свойствам. По характеру температурных зависимостей удельного сопротивления все образцы можно разделить на две группы. В первую группу входят образцы I-1, I-2, I-11, I-12 434-1, находящиеся в металлической фазе. Температурные зависимости удельного сопротивления этих образцов имеют «металлический» характер (рис. 1), указывающий на то, что уровень индия E_{In} скорее всего расположен на фоне разрешенных состояний вблизи дна зоны проводимости и стабилизирует уровень Ферми. Концентрация электронов в зоне проводимости при $T = 4.2 \text{ K}$ монотонно уменьшается с ростом концентрации индия в сплаве (таблица).

Вторую группу составляют образцы 434-3, I-21, I-22 с высокими концентрациями индия ($N_{\text{In}} \approx 0.2 \text{ ат}\%$), находящиеся в диэлектрической фазе. На температурных зависимостях удельного сопротивления этих образцов наблюдается активационный участок, свидетельствующий о наличии в запрещенной зоне уровня индия $E_{\text{In}} \approx E_c - \Delta E_{\text{In}}$ (рис. 1). Энергия активации уровня индия ΔE_{In} , определенная по углу

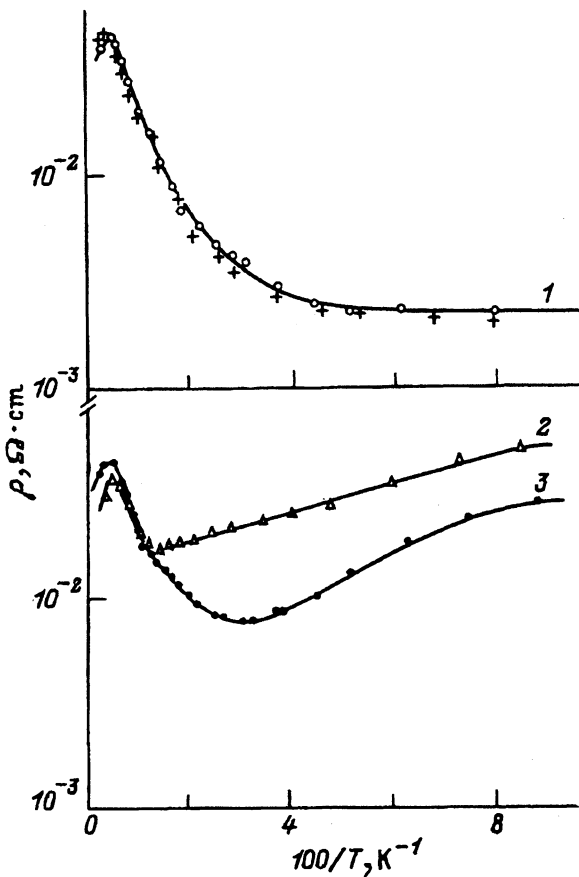


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ 434-1 (1) и 434-3 (2,3).

Доза облучения $\Phi \cdot 10^{-16}$, см^{-2} : 1 — 2.1, 9.6; 2 — 9.6, 3 — 0.

наклона зависимостей $\ln \rho(1/T)$, в исследованных образцах составляет $1.5 \div 5$ мэВ.

Увеличение энергии активации уровня коррелирует с увеличением удельного сопротивления при низких температурах в исследованных образцах. Поэтому можно считать, что существование остаточных электронов в зоне проводимости при гелиевых температурах связано с тем, что при понижении температуры уровень индия движется вниз по энергии и пересекает дно зоны проводимости. При этом в области температур $T < 25$ К происходит экспоненциальное увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда, связанное с существованием барьера W между зонными и локализованными состояниями. В этих условиях при охлаждении образца свободные электроны не успевают перейти на локальный уровень и происходит «замораживание» электронов в зоне проводимости. При прочих равных условиях (одна и та же величина барьера W , одинаковые условия охлаждения образца) концентрация замороженных электронов определяется, очевидно, положением уровня индия относительно дна зоны проводимости при

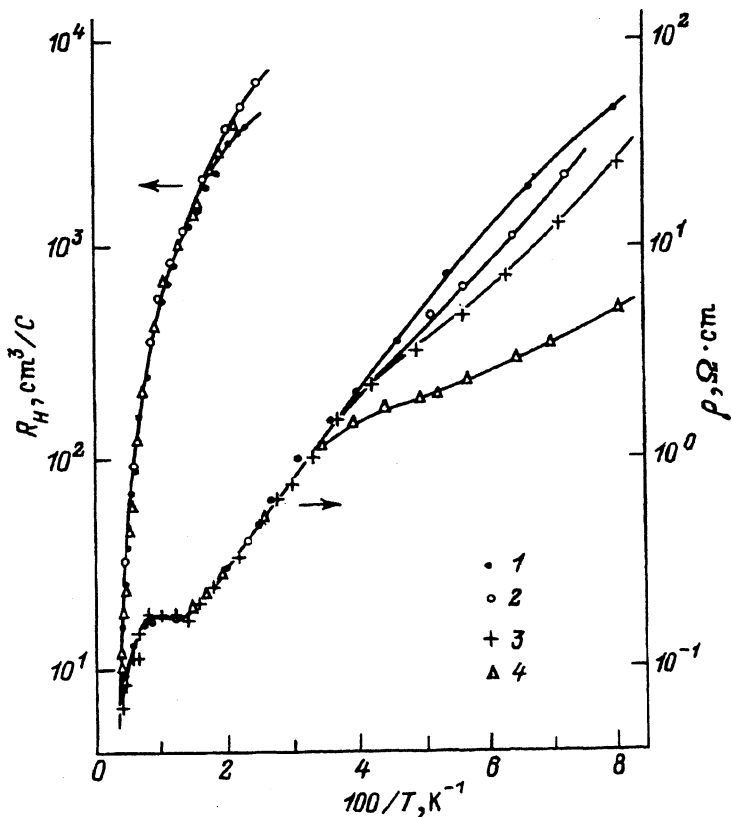


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла образца I-22.

Доза облучения $\Phi \cdot 10^{-17}$, см^{-2} : 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 1.0, 4 — 1.4.

$T \approx 25$ К и монотонно уменьшается с ростом концентрации индия в сплаве. Вообще говоря, не исключено, что в металлических образцах (I-1, I-2, I-11, I-12, 434-1) при гелиевых температурах уровень индия также расположен в запрещенной зоне и не стабилизирует уровень Ферми, а существование электронов в зоне проводимости связано с эффектом замораживания электронов при понижении температуры.

Таким образом, в образцах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0.22$) наблюдается вполне определенная закономерность — уменьшение концентрации электронов в зоне проводимости и увеличение энергии активации уровня индия при увеличении концентрации индия, свидетельствующая о смещении уровня ко дну зоны проводимости и в запрещенную зону сплава. Подобное изменение положения уровня индия при увеличении концентрации индия, но в области более высоких концентраций индия ($N_{\text{In}} \geq 1$ ат%), наблюдалось ранее в работах [8,9].

Под действием облучения характер зависимостей $\rho(T)$, $R_H(T)$ в исследованных образцах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ практически не меняется (рис. 1, 2). В металлических образцах электрофизические параметры и период осцилляций Шубникова-де-Гааза при $T = 4.2$ К в пределах экс-

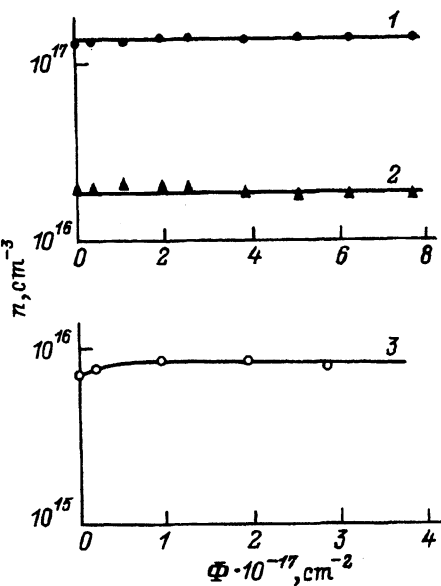


Рис. 3. Зависимости концентрации электронов при $T = 4.2$ К от дозы облучения в разных образцах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$: 1 — I-12, 2 — I-1, 3 — 434-1.

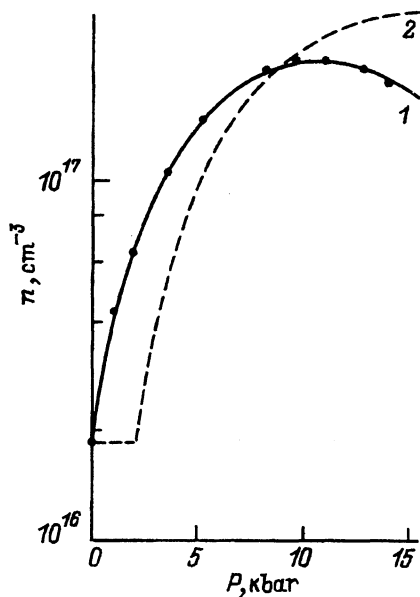


Рис. 4. Зависимости концентрации электронов при $T = 4.2$ К от давления. Точки — эксперимент на образце I-11, облученном электронами при $\Phi = 2.7 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} . Линии — расчет с параметрами: 1 — $E_{In} = E_c + 4.4$ мэВ, $dE_{In}/dP = 0.7$ мэВ/кбар; 2 — $E_{In} = E_c - 4.0$ мэВ, $dE_{In}/dP = 1.7$ мэВ/кбар.

периментальных ошибок остаются постоянными, поэтому можно считать, что концентрация электронов n практически не зависит от дозы облучения (рис. 3). Медленное увеличение концентрации электронов при $T = 4.2$ К, со скоростью примерно на 2 порядка меньшей, чем в не легированных образцах n - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ [10], наблюдается лишь в образце 434-1 с минимальной исходной концентрацией электронов.

Для определения положения уровня индия в металлических образцах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, а также для выяснения вопроса о влиянии электронного облучения на энергетический спектр сплавов исследовано влияние давления на электрофизические свойства облученного образца I-11. Установлено, что электрофизические параметры облученного образца (удельное сопротивление и коэффициент Холла, период осцилляций Шубникова-де-Гааза) изменяются таким же образом, как и в необлученных образцах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ [9].

На рис. 4 приведена зависимость концентрации электронов в образце I-11 ($\Phi = 2.7 \cdot 10^{17}$ cm^{-2}) от давления, построенная по результатам измерения коэффициента Холла и осцилляций Шубникова-де-Гааза при $T = 4.2$ К. Как и в необлученных образцах, зависимость имеет вид колоколообразной кривой с максимумом при давлении $P \approx 10$ кбар, соответствующем переходу сплава в бесщелевое состояние. Теоретические зависимости $n(P)$, показанные на рис. 4 линиями 1 и 2, построены в рамках двухзонной модели Кейна с параметрами, приве-

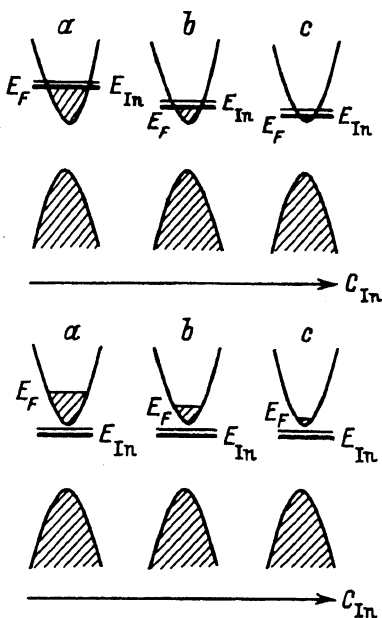


Рис. 5. Возможные зонные диаграммы «металлических» образцов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ при повышении содержания In (C_{In}) в сплаве:

вверху — смещение уровня E_{In} , стабилизирующего уровень Ферми, внизу — уменьшение концентрации «замороженных» электронов.

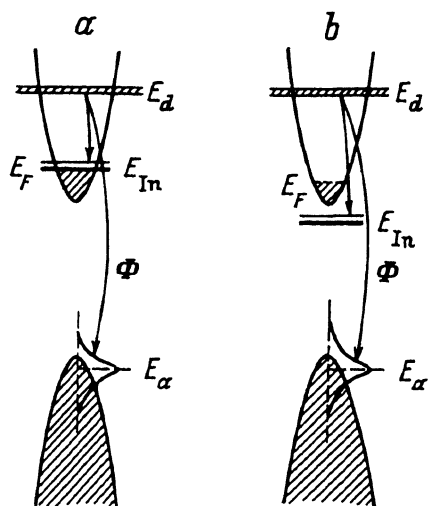


Рис. 6. Энергетические диаграммы сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, облученных электронами, в металлической (а) и диэлектрической (b) фазах.

денными в работе [9]. При построении этих зависимостей рассматривались две альтернативные возможности расположения уровня индия (рис. 5) и предполагалось в одном случае (кривая 1), что уровень Ферми в исходных образцах расположен чуть выше дна зоны проводимости ($E_{In} = E_c + 4.4$ мэВ), а в другом (кривая 2) — чуть ниже дна зоны проводимости ($E_{In} = E_c - 4.0$ мэВ). Расчеты показали, что удовлетворительное согласие теории и эксперимента может быть достигнуто только в случае, если уровень индия в исследованном сплаве находится в зоне проводимости и стабилизирует уровень Ферми в облученном образце в условиях гидростатического сжатия.

Таким образом, исследование облученного образца I-11 под давлением указывает на отсутствие каких-либо аномалий по сравнению с необлученными образцами и позволяет считать, что в металлических образцах уровень Ферми действительно стабилизирован уровнем индия, расположенным в зоне проводимости сплава.

В «диэлектрических» образцах во всем исследованном диапазоне доз облучения температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла с точностью до ошибок измерения совпадают в диапазоне температур от 300 К до T' (величина T' зависит от конкретных параметров образца и для исследованных образцов составляет $20 \div 50$ К). При этом наклон активационных участков на зависимостях $\rho(1/T)$ остается одинаковым для всех доз облучения. Заметные изменения удельного сопротивления с ростом дозы облучения происходят

только в области температур $T < T'$, где кривые $\rho(1/T)$ расходятся (рис. 1, 2).

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с моделью энергетического спектра $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ ($x = 0.2$), предложенной в [6,7] и предполагающей возникновение при облучении резонансного уровня донорного типа в зоне проводимости и резонансной зоны акцепторного типа вблизи потолка валентной зоны сплава. В этом случае генерация дефектов донорного типа приводит к перетеканию электронов с уровня E_d , расположенного выше уровня Ферми в исследованных образцах, в резонансную зону акцепторного типа и в зону проводимости. В нелегированных сплавах $n-Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ ($x = 0.2$) это должно приводить к увеличению концентрации электронов со скоростью $dn/d\Phi = d(N_d - N_a)/d\Phi$.

Высокая радиационная стойкость электрофизических параметров образцов, легированных индием, как в металлической, так и в диэлектрической фазах связана, видимо, с тем, что в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ уровень Ферми стабилизирован емким квазилокальным уровнем индия, который содержит большое число заполненных и свободных состояний, $N \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Поэтому электроны, переходящие с резонансного донорного уровня при облучении электронами, могут занимать состояния на уровне индия (рис. 6), и концентрация электронов в образцах должна оставаться постоянной вплоть до его полного заполнения. С этой точки зрения медленное увеличение концентрации электронов в образце 434-1 может быть связано с некоторым уширением уровня индия ($\delta E_{In} \sim 1 \text{ мэВ}$) и движением уровня Ферми вверх в зоне проводимости по мере заполнения состояний в примесной полосе индия при облучении. Оценки, проведенные в рамках закона дисперсии Кейна [9], показали, что изменение положения уровня Ферми в этом образце при облучении не превосходит 0.3 мэВ, что удовлетворительно согласуется с предполагаемой шириной уровня индия в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ [1].

Изменения электрофизических параметров диэлектрических образцов при $T < T'$ свидетельствуют, очевидно, об изменении концентрации замороженных электронов в зоне проводимости. Подобное поведение ρ в области низких температур наблюдалось ранее при изменении концентрации индия и связывалось с возникновением деформационной корреляции соседних примесных центров индия при увеличении концентрации индия [11,12]. При такой корреляции перестройка одного из примесных центров вызывает перестройку соседних, что проявляется в уменьшении времени жизни неравновесных электронов и в уменьшении концентрации замороженных электронов в зоне проводимости. Поэтому можно предположить, что облучение электронами вызывает изменение «жесткости» кристаллической решетки и изменение степени деформационной корреляции примесных центров. Кроме того, известно, что облучение электронами приводит к некоторому повышению однородности образцов (увеличение подвижности носителей заряда в нелегированных образцах при облучении) [6]. Поэтому возможно также, что электронное облучение, генерируя дополнительные точечные дефекты однородно по объему образца, способствуют более равномерному распределению примесных центров и выравниванию высоты барьеров W в объеме кристалла.

3. Фотопроводимость в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, облученных электронами

Представляло интерес выяснить характер воздействия облучения электронами на параметры, определяющие возможности практического применения сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ в качестве фотоприемников ИК диапазона: концентрацию носителей заряда и проводимость в условиях экранировки внешнего излучения и контролируемой ИК подсветки, величину барьера W и время жизни неравновесных носителей заряда. Опираясь на известные в настоящее время данные по влиянию нестехиометрических дефектов на свойства сплавов, можно предположить, что в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ должна наблюдаться повышенная радиационная стойкость не только электрофизических, но и рекомбинационных параметров. Для определения характера воздействия электронного облучения на рекомбинационные характеристики сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ исследованы температурные зависимости удельного сопротивления диэлектрических образцов I-21, I-22, I-25 в условиях экранировки внешнего излучения и контролируемой подсветки тепловым источником ИК излучения.

Установлено, что в отсутствие подсветки температурные зависимости удельного сопротивления образцов при всех дозах облучения имеют два активационных участка (рис. 2, 7). Высокотемпературный участок (в области комнатных температур) соответствует собственной ионизации. Низкотемпературный активационный участок ($T < 40$ K) обусловлен, очевидно, ионизацией примесного уровня индия, который

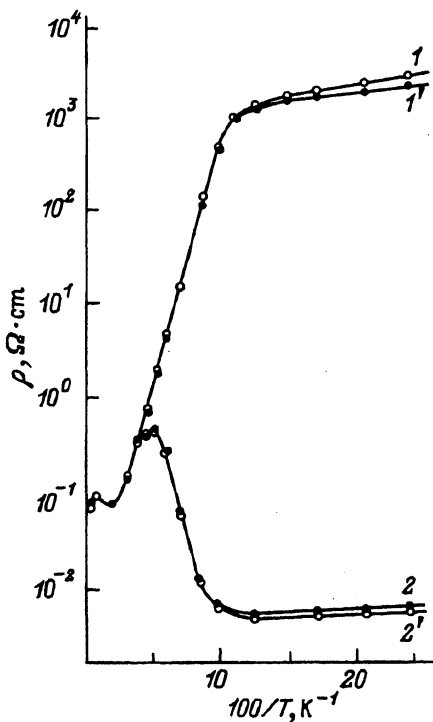


Рис. 7. Температурные зависимости удельного сопротивления образца I-25 в условиях экранировки внешнего излучения и контролируемой ИК подсветки.

Доза облучения $\Phi \cdot 10^{-17}$, cm^{-2} : 1, 2 — 0; 1', 2' — 1. Температура источника излучения T^* , K: 1, 1' — 4.2; 2, 2' — ≈ 30 .

в сплаве с $x = 0.25$ располагается чуть выше середины запрещенной зоны [$1-3$]. Контролируемая подсветка образца от теплового источника с температурой $T^* \approx 30$ К приводит к качественным изменениям зависимостей $\rho(1/T)$ (рис. 7). Величина удельного сопротивления в области гелиевых температур уменьшается более чем на 5 порядков, а зависимость $\rho(1/T)$ в области низких температур приобретает «металлический» характер.

При облучении электронами характер зависимостей $\rho(1/T)$ как в условиях экранировки образцов, так и в условиях ИК подсветки, в основном не меняется. Практически постоянным остаются характерные величины, определяющие возможности применения сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ в качестве фотоприемников ИК диапазона (темновое сопротивление и фотосопротивление при гелиевых температурах, температура появления задержанной фотопроводимости). Поэтому можно считать, что величина барьера W между локализованными и зонными состояниями, а также время релаксации фотопроводимости не зависят от дозы облучения. Некоторое уменьшение фоточувствительности в области гелиевых температур может быть связано с незначительными изменениями параметров примесных центров и проявлением деформационной корреляции соседних примесных центров при генерации дополнительных точечных дефектов в образцах.

Заключение

Установлено, что при облучении электронами электрофизические свойства сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, находящихся как в металлической, так и в диэлектрической фазах, практически не зависят от потока облучения. Экспериментальные результаты не противоречат модели энергетического спектра облученных электронами нелегированных сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и объясняются существованием в энергетическом спектре сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ емкого квазилокального уровня индия, жестко стабилизирующего уровень Ферми в исследованных образцах. Показано, что в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, находящихся в диэлектрической фазе, облучение электронами практически не влияет на величину стационарной фотопроводимости в области низких температур ($T < 25$ К) и величину барьера W между локализованными и зонными состояниями. Медленное изменение электрофизических параметров и фоточувствительности при облучении свидетельствует об изменении концентрации замороженных электронов в зоне проводимости при $T < 25$ К и скорее всего связано с изменением степени деформационной корреляции соседних примесных центров индия при генерации дополнительных точечных дефектов в образцах.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой радиационной стойкости электрофизических и рекомбинационных параметров сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ и позволяют использовать их в качестве материала для изготовления радиационно-стойких фотоприемников ИК диапазона.

Список литературы

- [1] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145**, 51 (1985).
- [2] Б.А. Акимов, В.П. Зломанов, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. Высокочистые вещества, вып. 6, 22 (1991).
- [3] В.А. Akimov, A.V. Dmitriev, D.R. Khokhlov, L.I. Ryabova. Phys. St. Sol. (a), **137**, 9 (1993).
- [4] Б.А. Волков, О.А. Панкратов. ДАН СССР, **255**, 93 (1980).
- [5] Б.А. Волков, В.В. Осипов, О.А. Панкратов. ФТП, **14**, 1387 (1980).
- [6] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, Е.И. Слынько, А.Г. Хорош, В.И. Штанов. ФТП, **24**, 51 (1990).
- [7] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, А.Г. Хорош. ФТП, **26**, 888 (1992).
- [8] Б.М. Вул, С.П. Гришечкина, Т.Ш. Рагимова. ФТП, **16**, 1452 (1982).
- [9] Б.А. Акимов. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. М. (1985).
- [10] А.Н. Некрасова, Е.П. Скипетров. Матер. VIII Всес. симп. по полупроводникам с узкой запрещенной зоной и полуметаллам. Ч. 1, 121. Львов (1991).
- [11] Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт, А.В. Никорич, Л.И. Рябова, В.В. Соковишин. Письма ЖЭТФ, **39**, 222 (1984).
- [12] Б.А. Акимов, А.В. Албул, А.В. Никорич, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. ФТП, **18**, 1778 (1984).

Редактор Л.В. Шаронова
