

Энергетический спектр $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.22$), облученного электронами

© Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова, А.В. Рязанов

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

(Получена 24 апреля 1996 г. Принята к печати 22 января 1997 г.)

Исследовано влияние гидростатического сжатия ($P \leq 12$ кбар) на электрофизические свойства $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.22$), облученного электронами ($T \approx 300$ К, $E = 6$ МэВ, $\Phi = 7.7 \cdot 10^{17}$ см⁻²). Исследована перестройка энергетического спектра облученных электронами сплавов под действием давления. На основе полученных экспериментальных данных определены параметры модели энергетического спектра носителей заряда в $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.22$), облученном электронами.

В настоящее время известно, что облучение сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x \approx 0.2$) электронами приводит к возникновению в энергетическом спектре этих материалов резонансного уровня донорного типа E_d в зоне проводимости и зоны резонансных состояний акцепторного типа E_a , расположенной вблизи потолка валентной зоны [1–3]. Внешнее давление изменяет относительное расположение краев разрешенных зон и радиационных уровней, индуцируя таким образом изменение концентрации носителей заряда в разрешенных зонах за счет перераспределения электронов между зонными и локализованными состояниями. Эта методика позволила получить наиболее достоверные сведения о параметрах глубоких радиационных уровней в сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.2$) p -типа [2,3]. В то же время облученные электронами сплавы n -типа и сплавы с другим содержанием олова под давлением пока не исследовались, и параметры энергетического спектра радиационных дефектов в этих материалах до сих пор не известны.

В настоящей работе исследовалось влияние гидростатического сжатия на электрофизические свойства облученного электронами сплава $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.22$) при $T \approx 300$ К, энергии электронов $E = 6$ МэВ и потока $\Phi \leq 8.4 \cdot 10^{17}$ см⁻². Методика подготовки образцов к измерениям и основные параметры приведены в работе [4]. У каждого образца до и после облучения исследовались температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла ($4.2 \leq T \leq 300$ К, $B \leq 0.04$ Тл), а также эффект Шубникова–де-Гааза и полевые зависимости коэффициенты Холла ($T = 4.2$ К, $B \leq 6$ Тл, $B \parallel \langle 100 \rangle$). Для измерений в условиях гидростатического сжатия ($P \leq 12$ кбар) был выбран образец С-22 ($n_0 = 1.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $\Phi = 7.7 \cdot 10^{17}$ см⁻²) с содержанием олова $x = 0.22$, в котором экспериментально наблюдалась n - p -конверсия при облучении, и при максимальных потоках облучения уровень Ферми оказался расположенным в валентной зоне.

Установлено, что под действием давления удельное сопротивление образца С-22 при $T = 4.2$ К уменьшается почти на 2 порядка и проходит через минимум при давлении $P \approx 9$ кбар, соответствующему переходу сплава с $x = 0.22$ через бесщелевое состояние. Температурные

зависимости удельного сопротивления качественно меняют свой вид и при максимальных давлениях имеют металлический характер, типичный для нелегированных кристаллов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ (рис. 1). Коэффициент Холла при низких температурах плавно уменьшается под давлением примерно на порядок и практически выходит на насыщение при $P > 6$ кбар. Характер температурных и полевых зависимостей коэффициента Холла не изменяется под давлением [4].

Полученные результаты указывают на увеличение концентрации свободных дырок под действием давления. На рис. 2 представлена зависимость концентрации дырок от давления, рассчитанная по величине коэффициента Холла в слабых магнитных полях при $T = 4.2$ К. Наиболее

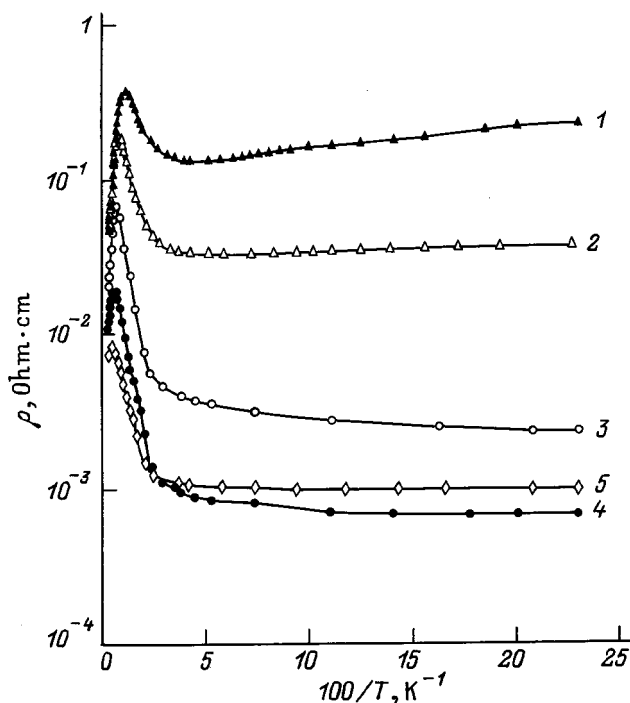


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образца С-22, облученного электронами ($\Phi = 7 \cdot 10^{17}$ см⁻²), при различных давлениях P , кбар: 1 — 0, 2 — 0.3, 3 — 1.9, 4 — 6.7, 5 — 11.8.

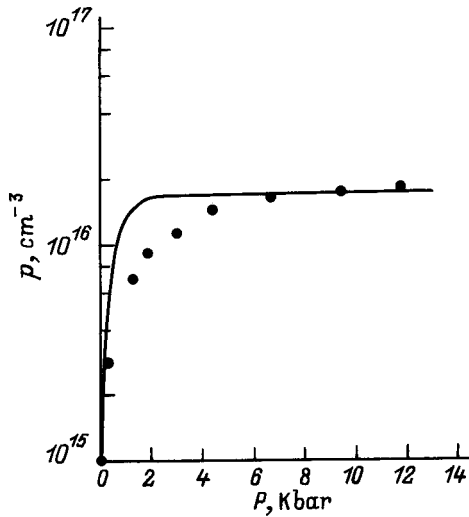


Рис. 2. Зависимости концентрации дырок от давления при $T = 4.2\text{ К}$ для образца *C-22*, облученного электронами ($\Phi = 7.7 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$). Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет с параметрами $E_v - E_a = 9.3\text{ мэВ}$, $\sigma = 4\text{ мэВ}$, $dN_a/d\Phi = 1.7\text{ см}^{-1}$.

быстрые изменения концентрации дырок наблюдаются в области низких давлений, а при $P > 6\text{ кбар}$ зависимость $p(P)$ практически выходит на насыщение. Такие изменения концентрации дырок под давлением наблюдались и ранее при исследовании облученных электронами образцов $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.2$) [2,3] и связывались с перераспределением электронов между валентной зоной и резонансной зоной радиационных дефектов E_a (рис. 3). Характерный вид зависимости концентрации дырок от давления (быстрое увеличение и выход на насыщение) позволяет определить основные параметры модели энергетического спектра путем сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей $p(P)$ для облученного электронами сплава.

При проведении этих расчетов за основу принимались ширина резонансной зоны $\sigma = 4\text{ мэВ}$ и скорость генерации радиационных дефектов акцепторного типа $dN_a/d\Phi = 1.7\text{ см}^{-1}$, характерные для исследованного ранее сплава $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x = 0.2$) [1–3]. При этом предполагалось, что, так же как и в облученных электронами сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, результаты исследований которых представлены в работах [5,6], изменение концентрации свободных носителей заряда и состава сплава не должны существенно влиять на значения этих параметров. С другой стороны, изменение содержания олова в сплаве может заметно повлиять на положение акцепторной зоны E_a относительно потолка валентной зоны. Поэтому основной целью расчета считалось определение энергетического положения резонансной зоны E_a . И, наконец, для оценки скорости генерации дефектов донорного типа $dN_d/d\Phi$ использовалось значение разностной скорости генерации дефектов $d(N_a - N_d)/d\Phi$, определенное по положению точки n - p -конверсии для образца *C-22* и ско-

рости уменьшения концентрации электронов, рассчитанной по изменению периода шубниковских осцилляций в образцах *Nn-4, 5* из работы [4].

При построении теоретических зависимостей $p(P)$ учитывалось, что при перестройке энергетического спектра облученного сплава под давлением сумма концентраций дырок в валентной зоне p и в резонансной зоне p_a остается постоянной:

$$p(P) + p_a(P) = p(0) + p_a(0), \quad (1)$$

или, учитывая, что $p_a(P) = N_a - n_a(P)$ и $p_a(0) = N_a - n_a(0)$, получим

$$p(P) = p(0) + [n_a(P) - n_a(0)], \quad (2)$$

где

$$n_a(P) = \int_{-\infty}^{E_F(P)} g_a(E) dE, \quad (3)$$

$$g_a(E) = \frac{N_a}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E - E_a)^2}{2\sigma^2}\right],$$

$N_a = \Phi(dN_a/d\Phi)$, $g_a(E)$ — функция плотности состояний в резонансной зоне в виде кривой гауссовского типа, E_a — середина и σ — ширина резонансной зоны, E_F — энергия Ферми, рассчитанная в рамках двухзонной модели Кейна с параметрами, приведенными в [7]. Наилучшее согласие теории и эксперимента достигнуто в предположении неизменности положения середины резонансной зоны E_a относительно середины запрещенной зоны сплава под давлением (рис. 3) и при следующих параметрах модели:

$$E_v - E_a = 9.3\text{ мэВ}, \quad \sigma = 4\text{ мэВ}, \quad dN_a/d\Phi = 1.7\text{ см}^{-1}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что выбранный метод расчета позволяет автоматически достичь согласия результатов расчета с экспериментальными данными при атмосферном давлении, а согласие в области максимальных давлений достигается путем вариации положения резонансной зоны E_a . При этом в области промежуточных давлений расчетные концентрации дырок заметно превышают экспериментальные значения (рис. 2). Подобное отклонение теоретических кривых от экспериментальных точек

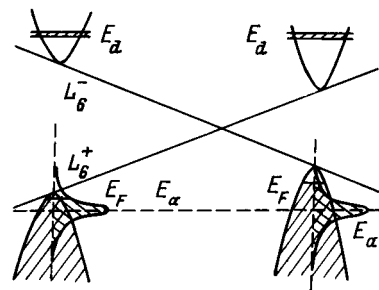


Рис. 3. Диаграмма перестройки энергетического спектра под давлением.

обсуждалось ранее при анализе экспериментальных данных, полученных для облученных электронами сплавов p - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.2$), и связывалось с отклонением функции плотности состояний в резонансной зоне от гауссовской формы [3].

Отметим также, что в исследованном сплаве $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.22$) резонансная зона E_a оказалась расположенной несколько ниже, чем в исследованных ранее сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.2$), для которых среднее значение $E_v - E_a$ составляло $E_v - E_a \approx 5.3$ мэВ. Это обстоятельство позволяет предположить, что в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ положение зоны радиационных дефектов E_a относительно середины запрещенной зоны не зависит от состава.

Авторы благодарны А.М. Мусалитину за облучение образцов быстрыми электронами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-18325, 96-02-16275).

Список литературы

- [1] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, А.Г. Хорош. ФТП, **24**, 51 (1990).
- [2] А.Н. Некрасова, Е.П. Скипетров, А.Г. Хорош. Физика и техника высоких давлений, **2**, 107 (1992).
- [3] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, А.Г. Хорош. ФТП, **26**, 888 (1992).
- [4] Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова. ФТП, **31**, 257 (1997).
- [5] Н.Б. Брандт, В.Н. Доропей, В.П. Дубков, Е.П. Скипетров. ФТП, **22**, 1462 (1988).
- [6] Б.Б. Ковалев, Е.П. Скипетров. ФТП, **24**, 1379 (1990).
- [7] Б.А. Акимов, Р.С. Вадхва, Б.П. Зломанов, Л.И. Рабова, С.М. Чудинов. ФТП, **11**, 1077 (1977).

Редактор Т.А. Полянская

Energy spectrum of n - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.22$) irradiated with electrons

T.P. Skipetrov, A.N. Nekrasova, A.V. Ryazanov

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

Abstract The influence of high hydrostatic pressure ($P \leq 12$ kbar) on the galvanomagnetic properties of n - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.22$) irradiated with electrons ($T \approx 300$ K, $E = 6$ MeV, $\Phi = 7.7 \cdot 10^{17}$ cm $^{-2}$) has been investigated. The reconstruction of the energy spectrum of irradiated alloys under pressure has been investigated. On the basis of the obtained experimental data the parameters of the model of energy spectrum for n - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x = 0.22$) have been determined.

E-mail: ski@mig.phys.msu.su (E.P. Skipetrov)