

тогда как при уменьшении  $n$  происходит скачкообразный рост числа высокоэнергетичных фотодырок, вследствие чего величина фотопроводимости  $CP$  резко возрастает (рис. 1,  $b$ , кривые 1—4).

На рис. 2 приведена зависимость  $\Delta\sigma/\sigma$  от угла  $\alpha$  между вектором электрического поля излучения и осью  $CP$ , которая изображает отмеченное ранее различие для структур с высокими ( $\epsilon_n < V < \epsilon_n + \hbar\omega$ ) и низкими ( $V < \epsilon_n$ ) барьерами.

Таким образом, внутризонная фотопроводимость классических легированных сверхрешеток на основе  $p$ -Ge в дальнем ИК диапазоне обладает существенной анизотропией и сильно зависит от высоты потенциальных барьеров при условии  $\hbar\omega \gg T$  и  $\epsilon_n < V < \epsilon_n + \hbar\omega$ . Характер изменения фотопроводимости с ростом угла между направлением вектора электрического поля излучения и осью  $CP$  качественно различен для структур с высокими и низкими барьерами. Спектральная зависимость фотопроводимости  $CP$  имеет сложный характер, с участками роста и спада в области частот, где энергия кванта излучения превышает характерную энергию оптического фонона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. F. Levine, G. Hasnain, C. G. Bethea, N. Chand. Appl. Phys. Lett., 54, 2704 (1989).
- [2] T. L. Lin, J. Maserjian. Appl. Phys. Lett., 57, 1422 (1990).
- [3] В. М. Васецкий, В. Н. Порошин, О. Г. Скарбей, Э. С. Саркисян. ФТП, 22, 1610 (1988).
- [4] О. Э. Райчев. ФТГ, 32, 1734 (1990).
- [5] Е. В. Берегулин, С. Д. Ганичев, И. Д. Ярошецкий, И. Н. Ясиевич. ФТП, 16, 286 (1982).
- [6] Д. А. Паршин, А. Р. Шабаев. ЖЭТФ, 92, 1471 (1987).
- [7] Р. А. Сурис, В. А. Федирко. ФТП, 12, 1060 (1978).
- [8] В. Н. Гусятников, В. А. Иванченко, М. В. Николаев. В кн.: Тр. II Всес. шк.-сем., ч. 2, 82, Саратов (1988).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 27, вып. 1, 1993

### СВОЙСТВА КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПЛЕНОК В СИСТЕМЕ СУЛЬФИД СВИНЦА—СУЛЬФИД КАДМИЯ

С. П. Зимин, Е. Л. Корегина, Л. В. Бочкарева

Ярославский государственный университет,  
150000, Ярославль, Россия  
(Получено 7.05.1992. Принято к печати 26.06.1992)

Полупроводниковые соединения сульфид свинца и сульфид кадмия достаточно хорошо изучены, и синтез новых материалов на основе этих соединений в форме твердых растворов позволяет осуществить постепенный переход от узкозонных полупроводников к широкозонным. Путем вариации состава в твердом растворе  $Pb_{1-x}Cd_xS$  возможны изменение величины постоянной решетки и увеличение ширины запрещенной зоны по сравнению с сульфидом свинца, что приводит к смещению спектрального диапазона фоточувствительности в область меньших длин волн [1]. Особый интерес вызывает изучение сильно компенсированных образцов этого твердого раствора, поскольку наличие эффективного механизма изменения спектрального диапазона в сочетании с известной высокой фоточувствительностью сильно компенсированных образцов может оказаться перспективным для создания приемников ИК диапазона на длины волн 2—4 мкм.

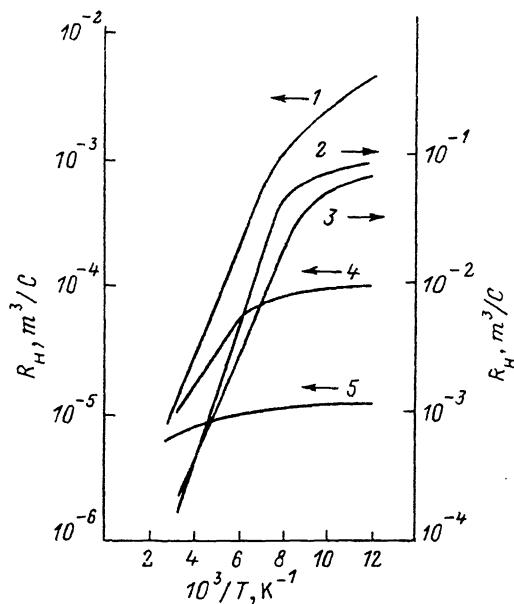


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла для слоев  $Pb_{1-x}Cd_xS(Na)$ .  $x$ : 1 — 0.05, 2 — 0.14, 3 — 0.14, 4 — 0.05, 5 — 0.2.

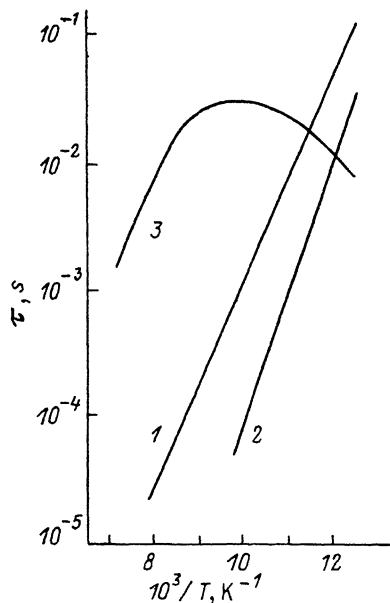


Рис. 2. Типичные температурные зависимости времени релаксации фотопроводимости для компенсированных пленок  $Pb_{1-x}Cd_xS(Na)$ .  $x$ : 1 — 0.05, 2 — 0.14, 3 — 0.14.

Исследовались эпитаксиальные слои сульфида свинца—сульфида кадмия с компенсирующей акцепторной примесью натрия (0.5—2%), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках  $BaF_2$  (111). Величина  $x$  имела значения: 0.05, 0.08, 0.10, 0.14, 0.20, 0.30, толщина пленок составляла 0.4—3.5 мкм. Изучение структуры пленок  $Pb_{1-x}Cd_xS(Na)$  методом растровой электронной микроскопии показало, что пленки с малой мольной долей сульфида кадмия характеризуются монокристаллической структурой, отсутствием микрорельефа поверхности, в то время как для образцов с большими значениями  $x$  выявляется зернистая структура с характерным размером зерна сферической формы 0.05—0.2 мкм. Исследования элементного состава пленок методом оже-спектроскопии свидетельствовали о том, что распределение основных элементов по толщине пленки и по произвольно выбранной линии в плоскости слоя на некоторой глубине внутри него с макроскопической точки зрения является однородным, однако имеются микрофлуктуации состава.

На основании холловских измерений было получено, что исследуемые слои обладали проводимостью дырочного типа и характеризовались широким набором значений концентрации носителей заряда при азотной температуре. В пленках с малыми значениями  $x$  ( $x < 0.14$ ) при 77 К наблюдались anomalно высокие значения коэффициента Холла, соответствующие концентрации  $10^{13}$ — $10^{16}$  см $^{-3}$ . Температурные зависимости коэффициента Холла для таких образцов описывались экспоненциальным законом в интервале 300—140 К (рис. 1), отклоняясь при дальнейшем понижении температуры в сторону меньших значений, что связано с влиянием фоновой засветки. При комнатной температуре концентрация дырок составляла  $10^{16}$ — $10^{17}$  см $^{-3}$ . Подобные зависимости с активационными участками описаны для  $PbSe_{1-x}S(Tl)$  в [2], для  $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$  — в [3]. В пленках с  $x > 0.2$  концентрация носителей заряда при 77 К составляла  $10^{17}$ — $10^{18}$  см $^{-3}$  и практически не изменялась в интервале 77—300 К, что типично для «классических» халькогенидов свинца. Анализ величины энергии активации  $E_a$

для компенсированных образцов показал, что значения  $E_a$ , определенные по тангенсу угла наклона в интервале 300—140 К, лежат в широком диапазоне от 17 до 700 мэВ. Различные значения  $E_a$  характерны не для одного конкретного состава, а для серии образцов, полученных в одном технологическом цикле. Для объяснения наблюдаемого факта может быть применена модель компенсированных неоднородных полупроводников [4]. В этом случае можно предположить, что в каждом образце существуют свои особенности статистического распределения микрофлуктуаций состава и, как следствие, свои особенности микрорельефа зоны проводимости и валентной зоны.

Вследствие низкой концентрации носителей заряда сильно компенсированные образцы  $Pb_{1-x}Cd_x(Na)$  обладали высокими значениями удельного сопротивления при 77 К (до  $10^4$  Ом·см), и при повышении температуры изменение электропроводности соответствовало изменению коэффициента Холла. Отметим, что величина энергии активации  $E_{a1}$ , определенная по тангенсу угла наклона зависимости  $\ln \rho = f(10^3/T)$  в интервале 300—140 К, была в 1.5—2.0 раза ниже величины  $E_a$ , определенной из холловских измерений. Это может быть объяснено тем, что в неоднородных полупроводниках проводимость определяется концентрацией носителей на уровне протекания, а коэффициент Холла определяется средней по образцу концентрацией [4]. Изучение величины подвижности дырок в слоях  $Pb_{1-x}Cd_xS(Na)$  показало, что увеличение в твердом растворе содержания элемента второй группы приводит к резкому уменьшению подвижности при 77 К с  $5 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/В·с для  $x=0.05$  до 6 см<sup>2</sup>/В·с для  $x=0.3$ , что определяется во многом изменением структуры пленок. Следует учитывать, что величина холловской подвижности в неоднородных полупроводниках отличается от дрейфовой. Исследование стабильности электрофизических параметров слоев при длительном хранении на воздухе (2 года) при термоциклировании 300→77→300 К (100 циклов) и низкотемпературном отжиге 100 °С (20 ч) показало высокую стабильность значений концентрации и подвижности носителей заряда, в том числе и для сильно компенсированных образцов.

При температурах ниже 150 К исследуемые слои сульфида свинца—сульфида кадмия с компенсирующей примесью натрия обладали высокой фоточувствительностью, причем в зависимости от степени компенсации фоточувствительность различалась на несколько порядков. На рис. 2 приведены типичные зависимости времени релаксации фотопроводимости от температуры для сильно компенсированных пленок. Значения  $\tau$  определялись по релаксационным кривым фотопроводимости при импульсной засветке в условиях равновесного теплового фона. Из рис. 2 следует, что при изменении температуры наблюдается два вида зависимости  $\tau(T)$ . Для ряда образцов зависимость  $\tau(T)$  в интервале 150—77 К практически подчиняется экспоненциальному закону со значениями энергии активации  $E_{a2} = 150—250$  мэВ. Для других образцов активационные процессы наблюдались лишь при температурах выше 90—130 К (рис. 2, кривая 3). Аналогичные зависимости наблюдались авторами [5] для сильно компенсированных пленок  $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$ . Максимальные значения времени релаксации фотопроводимости для исследуемых пленок достигали десятых долей секунды; соотношения  $E_{a2} > E_a$ ,  $E_{a1}$  свидетельствует в пользу применимости модели неоднородных полупроводников для изучаемых материалов.

Таким образом, результаты данной работы показывают, что путем введения дополнительной акцепторной примеси натрия в слои твердого раствора сульфида свинца—сульфида кадмия возможно получение сильно компенсированного материала, характеризующегося концентрацией носителей  $10^{13}—10^{14}$  см<sup>-3</sup>, хорошей стабильностью электрофизических параметров и высокой фоточувствительностью в ИК диапазоне.

Авторы признательны И. А. Дрозду, О. В. Горшковой за предоставленные образцы и полезную дискуссию.

- [1] A. K. Sood, K. Wu, J. N. Zemel. *Thin Sol. Films*, 48, 73, 87 (1978).  
 [2] А. Н. Вейс, В. И. Кайданов, Р. Ю. Крупицкая, Р. Б. Мельник, С. А. Немов. *ФТП*, 14, 2349 (1980).  
 [3] Л. В. Прокофьева, М. Н. Виноградова, С. В. Зарубов. *ФТП*, 14, 2201 (1980).  
 [4] М. К. Шейнкман, А. Я. Шик. *ФТП*, 10, 209 (1976).  
 [5] Л. Г. Бакуева, И. Б. Захарова, В. И. Ильин, С. Ф. Мусихин. *ФТП*, 22, 1896 (1988).

Редактор Л. В. Шаронова

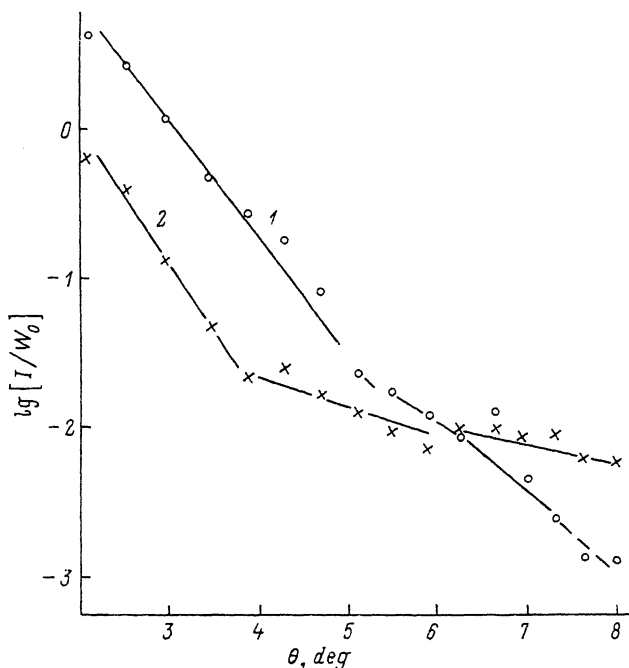
*ФТП*, том 27, вып. 1, 1993

## ИЗМЕНЕНИЕ ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА МОНОКРИСТАЛЛАМИ НЕЛЕГИРОВАННОГО GaAs ВСЛЕДСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В. П. Калинушкин, В. А. Юрьев

Институт общей физики Российской академии наук,  
 117942, Москва, Россия  
 (Получено 22.06.1992. Принято к печати 29.06.1992)

Исследованные монокристаллы специально не легированного GaAs были выращены методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава в направ-



Диagramмы рассеяния света монокристаллами облученного электронами с энергией 3.5 МэВ (1) и исходного (2) GaAs.