

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  $Pb_{1-x}Cd_xSe$   
С МАЛЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  $Cd$  ( $0 \leq x \leq 0,01$ )

М. Х. Максимов, А. П. Шотов

УДК 537.311.33; 621.375.826

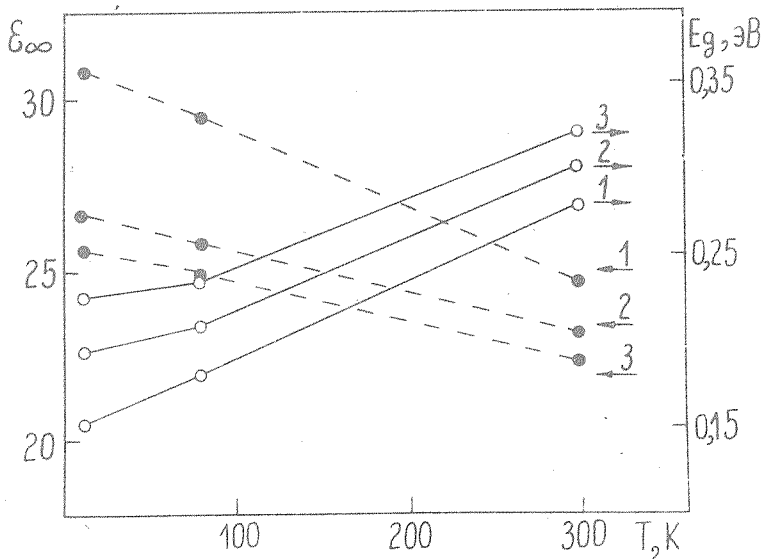
В  $Pb_{1-x}Cd_xSe$  при малом содержании  $Cd$  (до 1%) обнаружено существенное изменение ширины запрещенной зоны, а также электрических и оптических свойств.

При сильном легировании узкощелевых полупроводников типа  $A^{IV}B^{VI}$ ,  $PbSe$ ,  $PbTe$  и твердых растворов на их основе изменяется не только концентрация свободных носителей, но и существенным образом может изменяться энергетический спектр полупроводника, в частности, ширина его запрещенной зоны. Это было обнаружено в  $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$  с примесью  $Cd$  по изменениям спектров фотолюминесценции /1/ и фотопроводимости /2/. Детальное знание влияния легирующих примесей на электрические свойства и энергетический спектр необходимо для целенаправленного изменения свойств материалов и создания гетероструктур для оптоэлектронных приборов ИК диапазона, в особенности, перестраиваемых инжекционных лазеров.

В настоящей работе изучались электрические и оптические свойства  $Pb_{1-x}Cd_xSe$ , содержащего до 1 ат.%  $Cd$ .

I. Изготовление образцов. Эпитаксиальные слои  $Pb_{1-x}Cd_xSe$  с малым содержанием  $Cd$  ( $0 \leq x \leq 0,01$ ) выращивались методом вакуумной молекулярной эпитаксии ("горячей стенки") /3,4/ на свежеиспеченных подложках (100)  $KCl$  или (111)  $BaF_2$ . В качестве исходного материала (источника) при выращивании пленок использовались твердые растворы соответствующего состава, полученные прямым синтезом исходных предварительно очищенных компонентов. Условия выращивания были близки к равновесным,

что позволило получать эпитаксиальные слои с высокими подвижностями носителей (до  $32000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $77 \text{ К}$  для  $\text{PbSe}$ ). В зависимости от условий выращивания пленки получались n- или p-типа с концентрацией носителей  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для контроля состава и структуры проводился рентгеноструктурный анализ, который показал, что пленки имеют монокристаллическую структуру. На дифрактограммах не обнаружено линий второй фазы. Слои  $\text{PbSe}$  давали узкие дифракционные линии. Полуширина линий увеличивалась с ростом содержания  $\text{Cd}$ . Состав пленок определялся по измерению параметра кристаллической решетки, а также на микроанализаторе "Сamebax". Было установлено, что постоянная решетки  $a_0$  уменьшается при увеличении содержания  $\text{Cd}$ , в соответствии



Р и с. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны  $E_g$  и высокочастотной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\infty}$  от температуры:

○ -  $E_g$ ; ● -  $\epsilon_{\infty}$ ; 1 -  $\text{PbSe}$ ; 2 -  $\text{Pb}_{0,995}\text{Cd}_{0,005}\text{Se}$ ; 3 -  $\text{Pb}_{0,99}\text{Cd}_{0,01}\text{Se}$

с данными работы /5/. Нужно отметить, что состав пленок, выращенных на подложках  $KCl$ , соответствует в рамках точности измерений составу источника (шхты). Содержание  $Cd$  в пленках на  $BaF_2$  было почти в 2 раза больше чем в источнике.

2. Спектр фотопроводимости. Спектральная зависимость фотопроводимости измерялась по обычной схеме с помощью инфракрасного спектрометра ИКС-21 с призмой  $NaCl$  на частоте 600 Гц. Фотосигнал с нагрузочного сопротивления подавался на узкополосный усилитель с синхронным детектором. Значение ширины запрещенной зоны определялось по подуспаду фотопроводимости. На рис. 1 показано изменение  $E_g$  с температурой для  $Pb_{1-x}Cd_xSe$ . При введении  $Cd$   $E_g$  возрастает от 0,28 эВ ( $x = 0$ ) до 0,30 эВ ( $x = 0,005$ ) и 0,32 эВ ( $x = 0,01$ ) при  $T = 300$  К. Температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны  $dE_g/dT$  уменьшается с увеличением концентрации  $Cd$ .

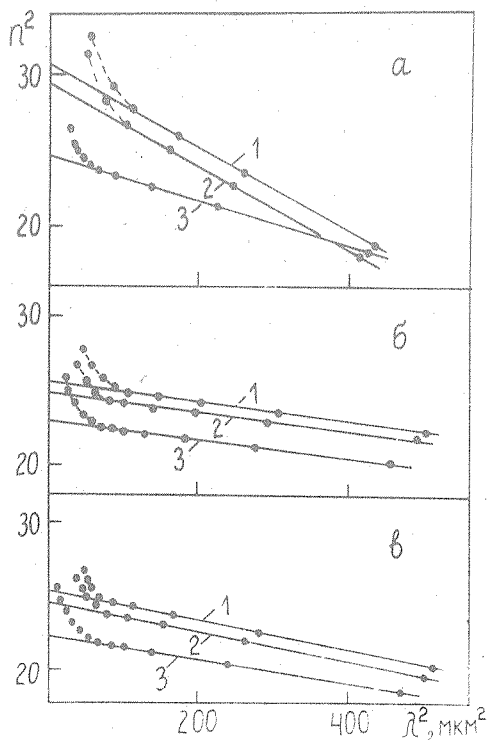
Для выяснения влияния напряжений, возникающих в пленке при низких температурах из-за разницы коэффициентов линейного расширения пленки и подложки, на спектры ФП и на величину  $E_g$  были сделаны контрольные измерения на свободных слоях без подложки (подложка из  $KCl$  растворялась в воде). Различий в спектрах ФП свободных пленок и на подложках замечено не было.

3. Оптические свойства. Оптическое пропускание пленок измерялось на двухлучевом призмённом инфракрасном спектрометре UR-10. Измеряемые образцы с толщиной 2-8 мкм монтировались на хладопроводе в гелиевом криостате с окнами из  $KBr$ .

Интерференция света при прохождении сквозь плоскопараллельный слой полупроводника приводит к появлению характерных максимумов в спектре пропускания. Максимумы интерференции имеют место, когда выполняется известное условие  $2nd = m\lambda$ , где  $n$  - показатель преломления,  $d$  - толщина пленки,  $m$  - целое число. Для расчета показателя преломления толщина пленок  $d$  измерялась на электронном сканирующем микроскопе.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости квадрата показателя преломления от квадрата длины волны. Они линейны в области длинных волн и отклоняются от линейности с приближением к краю собственного поглощения, что связано с быстрым ростом коэффициента поглощения вблизи края фундаментального поглощения /6/. Экстраполяцией линейного участка к нулевой длине вол-

ны были найдены значения высокочастотной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\infty}$ . На рис. 1 показано изменение  $\epsilon_{\infty}$  с температурой для PbSe и  $Pb_{1-x}Cd_xSe$  ( $x = 0,005; 0,01$ ). Для PbSe  $\epsilon_{\infty} = 24,5; 29$  и  $31,5$  при  $T = 300, 80$  и  $6$  К, соответственно, что хорошо согласуется с данными работы [7]. При введении Cd в PbSe  $\epsilon_{\infty}$  уменьшается, край оптического преломления сдвигает-



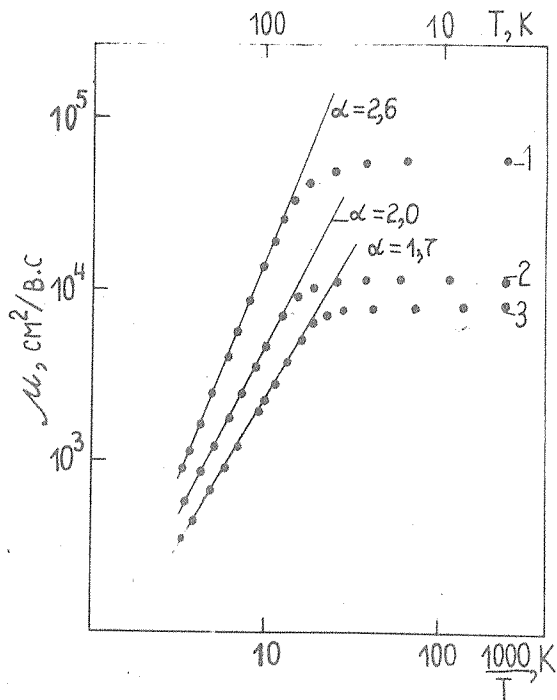
Р и с. 2. Зависимость квадрата показателя преломления от квадрата длины волны при 6 К (1), 80 К (2) и 300 К (3),

а - PbSe; б -  $Pb_{0,995}Cd_{0,005}Se$ ; в -  $Pb_{0,99}Cd_{0,01}Se$

ся в более коротковолновую область вследствие увеличения ширины запрещенной зоны.

4. Электрические свойства. Измерения эффекта Холла проводились четырехконтактным методом Ван дер Пау в диапазоне температур 4,2-300 К.

Для всех образцов PbSe наблюдался рост коэффициента Холла ( $R_x$ ) при понижении температур. Величина этого роста менялась от образца к образцу и для отдельных образцов превышала 50%.



Р и с. 3. Зависимость холловской подвижности от температуры:  
 1 - PbSe,  $n = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; 2 -  $\text{Pb}_{0,995}\text{Cd}_{0,005}\text{Se}$ ,  $n = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  
 3 -  $\text{Pb}_{0,99}\text{Cd}_{0,01}\text{Se}$ ,  $n = 3,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Рост  $R_x$  становится более заметным для образцов с низкими концентрациями свободных носителей ( $1,5 - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ).

При введении Cd не наблюдалось существенных изменений в величине  $R_x$  и ее температурной зависимости. Холловская концентрация носителей оставалась на уровне  $2-6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Только на отдельных образцах  $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$  с  $n < 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при 300 К наблюдался сильный рост  $R_x$  при понижении температуры. Слабая зависимость концентрации свободных носителей от содержания Cd в материале показывает, что она в основном определяется соотношением собственных дефектов (вакансии металла и Se) и зависит от условий роста пленок.

На рис. 3 показана температурная зависимость холловской подвижности ( $\mu$ ). При высоких температурах, когда основными является фоновый механизм рассеяния носителей, подвижность меняется по закону  $\mu = \mu_0 T^{-\alpha}$ . Для PbSe  $\alpha = 2,6$ . С увеличением концентрации Cd  $\alpha$  уменьшается и при  $x = 0,01$ ,  $\alpha = 1,7$ . Эти изменения можно объяснить температурной зависимостью эффективной массы для сплавов /8/ (при возрастании  $E_g$  эффективная масса слабее зависит от температуры). При температурах ниже 40 К подвижность не зависит от температуры. В этой области температур подвижность определяется рассеянием носителей на заряженных центрах (вакансиях и примесях). Наблюдаемое на эксперименте уменьшение абсолютной величины подвижности при низких температурах при  $x > 0$  связано с увеличением степени компенсации (числа заряженных центров).

Таким образом, в настоящей работе показано, что в PbSe, при относительно малом содержании Cd (до 1%) наблюдаются существенные изменения ширины запрещенной зоны, а также электрических и оптических свойств.

Поступила в редакцию  
12 июля 1982 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. И. И. Засавицкий, Б. Н. Мацонашвили, А. П. Шотов, Письма в ЖТФ, **32**, 156 (1980).
2. M. Lanir, H. Levinstein, Infr. Phys., **18**, 259 (1978).
3. A. Lopez-Otero, Thin Solid Films, **42**, 1 (1978).

4. К. В. Вяткин, А. П. Шогов, В. В. Урсахи, Изв. АН СССР, сер. Неорганич. материалы, 17, 24 (1981).
5. F. Wald, A. J. Rosenberg, J. Phys. Chem. Solids, 26, 1087 (1965).
6. F. Stern, Phys. Rev., 133A, 1653 (1964).
7. К. В. Вяткин, А. П. Шогов, ФТП, 14, 1331 (1980).
8. L. H. Rogers, A. J. Crocker, J. Phys. D, 4, 1006 (1971).