

УДК 621.315.592

## Фотоэлектрические и оптические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xTe$ (Ga)

И. Р. Нуриев, С. С. Фарзалиев, Н. В. Фараджев, Р. М. Садыгов  
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

*Представлены экспериментальные результаты исследования фотоэлектрических и оптических свойств эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ), содержащих 0,5—1 ат. % галлия, толщиной 1—5 мкм, полученных методом конденсации молекулярных пучков на подложках  $BaF_2$  (111). Пленки являются фоточувствительными при температурах жидкого азота 77 К, и максимум спектра фотопроводимости смещается в сторону коротких длин волн с увеличением содержания марганца в исследуемых образцах, что объясняется увеличением ширины запрещенной зоны (ШЗЗ). Аналогичное явление наблюдается и при исследовании края оптического поглощения, связанного с увеличением ШЗЗ. Значения ШЗЗ, определенные из спектральной зависимости коэффициента поглощения и фотопроводимости, находятся в удовлетворительном согласии.*

В течение последних двух десятилетий узкозонные полумагнитные твердые растворы халькогенидов свинца, в которых атомы свинца частично замещаются атомами переходного элемента — марганца с некомпенсированным магнитным моментом, стали предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [1—9]. В результате введения ионов марганца в решетку соединений халькогенидов свинца, например в  $PbTe$ , образуется твердый раствор  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ , при этом сильно возрастает ширина запрещенной зоны и в магнитном поле необычно изменяется энергетический спектр носителей заряда. Показано, что легирование полумагнитных твердых растворов  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  элементами III группы (Ga, In) приводит к качественному изменению фотопроводимости, т. е. появлению с ростом  $x$  на кинетических кривых, наряду с участком задержанной фотопроводимости, сравнительно быстрых релаксаций.

Исследования в основном проводились на массивных монокристаллах твердых растворов. В последние годы внимание исследователей широко привлекают эпитаксиальные пленки указанных твердых растворов, полученных на различных подложках [6, 10—13].

Известно, что для создания различных приборов ИК-техники, многоэлементных матриц, ИК-фотоприемников и их успешного применения в современной оптоэлектронике необходимо получение пленок со стабильным составом, совершенной структурой и заданными воспроизводимыми электрофизическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами. Проблема получения пленок с совершенной структурой требует подбора таких подложек, коэффициент термического расширения (КТР) которых был бы близок к КТР материала пленки. В этой проблеме немаловажную роль играют и значения пара-

метров решеток подложки и пленки. Желательно максимально возможное совпадение параметров решетки и КТР подложки и выращенной эпитаксиальной пленки.

При получении эпитаксиальных пленок халькогенидов свинца в качестве подложек, наряду с материалами  $A^4B^6$ , применяют и диэлектрические подложки. Для теллурида свинца величина КТР и параметр решетки составляют, соответственно:  $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ;  $a = 6,45 \text{ \AA}$ . Наиболее подходящей диэлектрической подложкой для получения эпитаксиальных пленок  $PbTe$ ,  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  мог бы служить фтористый барий ( $BaF_2$ ) с

КТР  $\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  и  $a = 6,19 \text{ \AA}$ . Основное достоинство диэлектрических подложек — возможность осуществления электрической развязки отдельных функциональных элементов при создании многоэлементных структур.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование фотоэлектрических и оптических свойств эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (Ga) ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ), выращенных на диэлектрических подложках  $BaF_2$ . Для решения поставленной задачи методом конденсации молекулярных пучков в вакууме  $10^{-4}$  Па были получены структурно совершенные эпитаксиальные пленки  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (Ga) с требуемыми химическим составом, толщиной и электрофизическими параметрами.

В проводимых исследованиях были использованы эпитаксиальные пленки, полученные на свежеотлитых гранях (111)  $BaF_2$ . Источником молекулярных пучков служили заранее синтезированные сплавы  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ) с соответствующим химическим составом и легированные 0,5—1 ат. % галлия. Введение примеси галлия  $\leq 1$  ат. % в соответствии с [4, 7, 10] обеспечивало повышенную однородность и стабилизацию свойств пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ .

Структурное совершенство пленок контролирова-

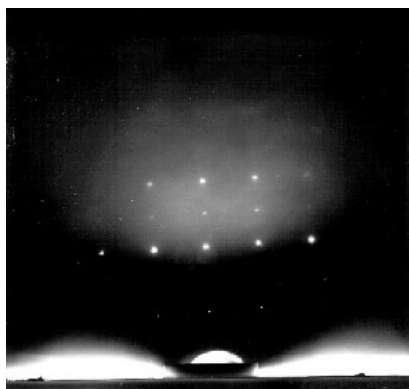
лось электронографическим, электрономикроскопическим и рентгенодифрактометрическим методами.

С применением дополнительного компенсирующего источника паров Te в процессе роста при температурах подложки  $T_s = 653—673$  К и скоростях конденсации 8—

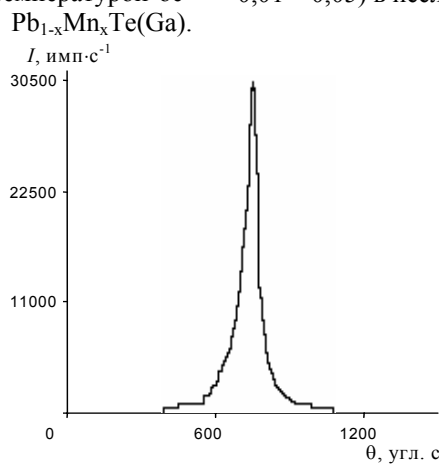
$10 \text{ \AA}/\text{с}$  получены эпитаксиальные пленки  $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Ga})$ , растущие плоскостью (111) с совершенной кристаллической структурой ( $W_{1/2} = 90—100''$ ) и гладкой поверхностью без включения второй фазы (рис. 1, а—в).

Из расчета электронограмм и кривой качания рентгеновской дифракции были вычислены параметры кристаллических решеток и на их основе определены соответствующие химические составы полученных пленок.

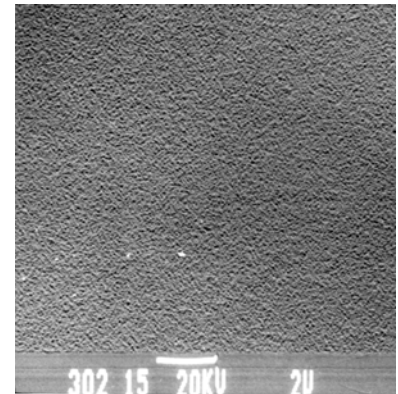
Скорость конденсации задавалась температурой основного источника



а



б



в

Рис. 1. Эпитаксиальная пленка  $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Ga})$  ( $x = 0,03$ ):

а — электронограмма; б — кривая качания рентгеновской дифракции; в — электрономикроскопический снимок поверхности

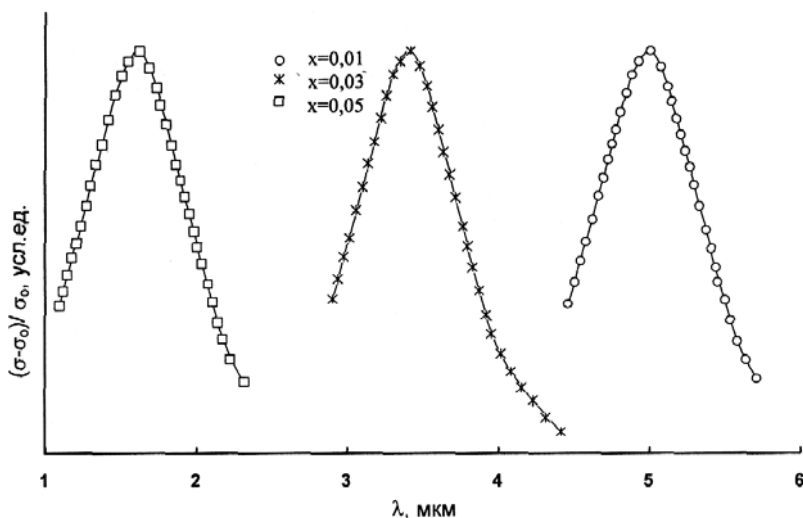


Рис. 2. Спектры фотопроводимости пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Ga})$  ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ), снятых при температуре 77 К

Исследован край оптического поглощения эпитаксиальных пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Ga})$  различных химических составов ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ) и толщин ( $d = 1—5$  мкм). Для определения коэффициента поглощения измерены

Регулированием температуры основного и дополнительного компенсирующего источников удалось получить высокоомные пленки  $n$ -,  $p$ -типа проводимости с концентрацией  $n$ -,  $p = 5 \cdot 10^{15}—2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (77 К) и подвижностью носителей заряда  $\mu = 2—3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (77 К). Значения подвижности носителей заряда также свидетельствуют о высоком кристаллическом совершенстве полученных пленок.

Исследование фотоэлектрических свойств этих пленок показало, что они фоточувствительны при температурах жидкого азота 77 К.

Установлено, что максимум спектра фотопроводимости пленок в соответствии с работами [3, 9] смещается в сторону более коротких волн с ростом  $x$  (рис. 2). Это объясняется увеличением ширины запрещенной зоны с ростом количества марганца ( $x = 0,01—0,05$ ) в исследуемых образцах.

оптическое пропускание  $D(\lambda)$  и отражение  $R(\lambda)$ , и по полученным данным вычислен коэффициент поглощения  $K(\lambda)$ .

Измерения спектров отражения показали, что коэф-

коэффициент отражения  $R(\lambda)$  постоянен по всей измеряемой ИК-области спектра (0—12 мкм) при  $T = 77$ —300 К. Коэффициент поглощения  $K(\lambda)$  вычислялся по формуле

$$K(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{1-R^2}{2D} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4D^2} + R^2} \right],$$

где  $d$  — толщина пленок.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe(Ga)$  различных химических составов толщиной  $d = 3$  мкм при 77 К приведена на рис. 3.

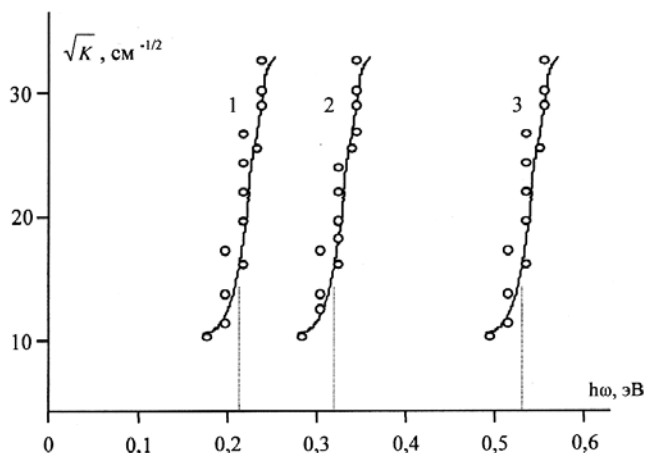


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe(Ga)$  ( $0,01 \leq x \leq 0,05$ ) при 77 К:  
1 —  $x = 0,01$ ; 2 —  $x = 0,03$ ; 3 —  $x = 0,05$

Как видно из рис. 3, с увеличением содержания марганца в исследуемых образцах край спектральной зависимости коэффициента оптического поглощения сдвигается в сторону коротких длин волн. По видимому, это обусловлено увеличением ширины запрещенной зоны в результате роста количества марганца в исследуемых образцах, как в случае спектральной зависимости фотопроводимости. Из рис. 3 также видно, что коэффициент поглощения хорошо описывается прямой в координатах  $K^{1/2}(h\omega)$  в области слабого поглощения эпитаксиальных пленок ( $K \leq 10^3 \text{ см}^{-1}$ ), что характерно для непрямых оптических переходов. По экстраполяции значений  $K^{1/2}(h\omega)$  к  $K = 0$  определялась величина ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) для каждого состава исследуемых пленок при  $T = 77$  К.

Исследования спектров оптического поглощения эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe(Ga)$  различных толщин ( $d = 1$ —5 мкм) показали, что величина коэффициента поглощения почти не зависит от  $d$ , что обусловлено высоким структурным совершенством и зеркаль-

но-гладкой поверхностью полученных пленок.

Значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  исследуемых образцов различного химического состава, определенные из спектральной зависимости коэффициента поглощения и фотопроводимости, находятся в удовлетворительном согласии.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС  
(проект № 01-0190).

#### Л и т е р а т у р а

1. Андрианов Д. Г., Павлов Н. М., Савельев А. С., Фистуль В. И., Цискаришвили Г. П. Дальнедействующая обменная связь между ионами  $Mn^{2+}$  в  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ // ФТП. 1980. Т. 14. Вып. 6. С. 1202—1212.
2. Засавицкий И. И., Ковальчик Л., Мацонашвили Б. Н., Сазонов А. В. Фотолуминесценция полумангнитных полупроводников типа  $A^{IV}B^{VI}$ // Там же. 1988. Т. 22. Вып. 12. С. 2118—2123.
3. Акимов Б. А., Никорич А. В., Рябова Л. И., Широкова Н. А. Переход металл — диэлектрик в твердых растворах  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (In)// Там же. 1989. Т. 23. Вып. 6. С. 1019—1024.
4. Акимов Б. А., Белоконь С. А., Дашевский З. М. и др. Энергетический спектр и фотопроводимость твердых растворов  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (Ga)// Там же. 1991. Т. 25. Вып. 2. С. 250—253.
5. Гук В. Г., Осипова Е. В., Папушина Т. И. Микротвердость кристаллов  $PbTe$  и  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ // Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 2. С. 340—343.
6. Трофимов В. Т., Аббасов Г. З., Спринхольц Г., Бауэр Г., Засавицкий И. И. Энергетическая диаграмма гетероперехода  $Pb_{1-x}Mn_xTe/PbTe$ // ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 7. С. 1158—1164.
7. Акимов Б. А., Львова Н. А., Рябова Л. И. Кинетика фотопроводимости в твердых растворах  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (In) при изменении их состава// Там же. 1996. Т. 30. Вып. 9. С. 1647—1652.
8. Виссер А. Де., Иванчик И. И., Хохлов Д. Р. Особенности магнитосопротивления сплавов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  (In) и  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (In) в сверхсильных магнитных полях// Там же. Вып. 8. С. 1400—1405.
9. Розачева Е. И., Сологубенко А. С., Кривулькин И. М. Микротвердость полумангнитных твердых растворов  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ // Неорганические материалы. 1998. Т. 34. № 6. С. 669—674.
10. Nuriyev I. R., Farzaliyev S. S., Djalilova Kh. D., Sadi-gov R. M. Features of growth and photoconductivity of epitaxial films of the  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (Ga) solid solutions// Proceedings of SPIE. 2002. V. 5126. P. 420—423.
11. Нуриев И. Р., Фарзалиев С. С., Садыгов Р. М. Фоточувствительные эпитаксиальные пленки  $Pb_{1-x}Mn_xTe(Ga)$ , выращенные на монокристаллах  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ : Сб. докл. 9-го Междунар. симпозиума “Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы”. — Харьков, Украина, 21—26 апреля 2003. С. 154—156.
12. Нуриев И. Р., Назаров А. М., Фарзалиев С. С., Фараджеев Н. В., Садыгов Р. М. Исследование структуры поверхности эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ // НАН Азербайджана. 2003. Т. 5. С. 123—125.
13. Нуриев И. Р., Фарзалиев С. С., Садыгов Р. М. Рост эпитаксиальных пленок  $Pb_{1-x}Mn_xTe(Ga)$  на монокристаллах  $PbTe_{1-x}Se_x$ // Поверхность. 2004. Т. 1. С. 113—115.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

**Photoelectrical and optical properties of  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  (Ga)  
epitaxial films**

*H. R. Nuriyev, S. S. Farzaliyev, N. V. Faradjev, R. M. Sadigov*  
Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

*The experimental results of photoelectric and optic properties on the gallium contained ( $N_{Ga}=0,5-1$  at. %),  $Pb_{1-x}Mn_xTe$  epitaxial films with thickness  $d=1-5 \mu m$ , obtained by a molecular beam condensation method on  $BaF_2$  (111) substrate have been presented. The films have been photosensitivity at  $T=77$  K and spectral maximum of photosensitivity were displacement in the short-wave length of spectrum, with introduction Mn, which are introduced to some increasing of the gap width in  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ . Analogous phenomenon have been observed by investigating of absorption optic edge bound also by the increase gap width. The magnitudes of gap width, determined by spectral dependence of absorption edge and photoconductivity are in the satisfactorily condition.*