

шумы. Измерения в поляризованном свете показали, что фотоответ существенно зависит от направления вектора напряженности электрического поля падающего излучения  $E$ . На рисунке кривыми 1 и 2 для обоих типов структур представлены спектральные зависимости коэффициента фотополюхроизма, определенного по формулам

$$\mathcal{S}_{(010)} = \frac{I_a - I_c}{I_a + I_c}, \quad \mathcal{S}_{(100)} = \frac{I_b - I_c}{I_b + I_c},$$

где  $\mathcal{S}_{(010)}$ ,  $\mathcal{S}_{(100)}$  — коэффициенты фотополюхроизма для гетеропереходов, расположенных соответственно в плоскостях (010) и (100),  $I_i$  ( $i=a, b, c$ ) — фототок, измеренный в соответствующей структуре при направлении вектора электрического поля поляризованного излучения параллельно оси  $i$  ( $E \parallel [100]$ ,  $E \parallel [010]$ ,  $E \parallel [001]$ ).

На рисунке (кривые 3, 4) представлены также спектральные зависимости фотоответа для структуры, изготовленной в плоскости (010), для двух поляризаций падающего излучения.

Из рисунка видно, что максимальное значение коэффициента фотополюхроизма  $\mathcal{S} = 74\%$  было получено в структуре, содержащей гетеропереход в плоскости (010), перпендикулярной плоскости скола. Это значение приходится на спектральный участок 1.8—1.9 мкм, соответствующий длинноволновому краю фотоответа структуры. В области коротких длин волн в этой структуре коэффициент фотополюхроизма меняет полярность, что, по-видимому, обусловлено особенностями зонного спектра базового материала.

Таким образом, показано, что селенид индия  $\text{In}_4\text{Se}_3$  является перспективным материалом для создания поляризационно чувствительных фотоприемников в ближней ИК области. Следует заметить, что возможно расширение спектрального диапазона реализации высоких значений фотополюхроизма при использовании твердых растворов  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_x$ , обладающих более узкой шириной запрещенной зоны, чем  $\text{In}_4\text{Se}_3$ .

#### Список литературы

[1] Рудь Ю. В. // Изв. вузов СССР. Физика. 1986. Т. 29. В. 8. С. 68—83.

Институт проблем материаловедения АН УССР  
Черновицкое отделение

Получено 28.08.1989  
Принято к печати 30.08.1989

ФТП, том 24, вып. 1, 1990

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАРГАНЦА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРООТРАЖЕНИЯ

Авакянц Л. П., Александрович С. В., Велиулин Э. И.,  
Ефимов А. Д., Холина Е. Н., Чапнин В. А.

В последнее время большой интерес исследователей привлекает относительно новый класс веществ — узкощелевые полумагнитные полупроводники, в том числе твердые растворы  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , которые при  $x < 0.3$  имеют кристаллическую структуру цинковой обманки и являются прямозонными полупроводниками с энергетической щелью (определяемой как  $E_g = E_{\Gamma_6} - E_{\Gamma_8}$ ) в центре зоны Бриллюэна. При увеличении содержания марганца ( $x$ ) в твердых растворах электронная зонная структура плавно перестраивается от бесщелевой инверсной, для которой  $E_g < 0$ , до обычной структуры с  $E_g > 0$  [1, 2], что делает  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  перспективным материалом для инфракрасных детекторов. С ростом содержания марганца наряду с изменением ширины запре-

ценной зоны меняются также энергии других переходов ( $E_1$ ,  $E_1 + \Delta$  и т. д.), энергия которых, как известно [3], в тройных растворах подобного типа зависит от содержания марганца ( $x$ ) квадратично, т. е.

$$E_1 = ax^2 + bx + c. \quad (4)$$

Для оптического перехода  $E_1$  в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  известны два аппроксимирующих полинома: с коэффициентами, полученными из данных по оптическому отражению [1], и полином, полученный в результате анализа спектров электроотражения [4]. Однако значения  $E_1(x)$ , вычисляемые по этим полиномам, заметно различаются, и, следовательно, вопрос о том, какой из аппроксимаций лучше пользоваться, остается открытым.

Целью данной работы было исследование оптического перехода  $E_1$  в мо-

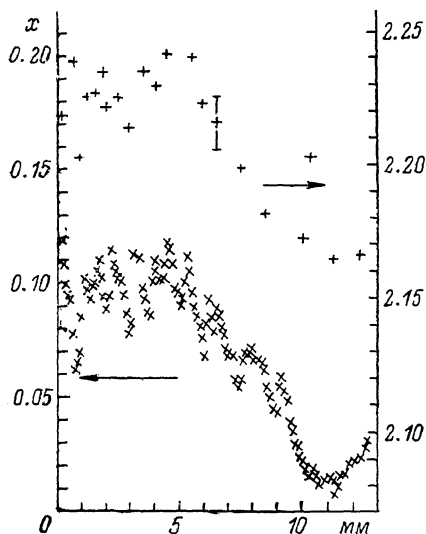


Рис. 1. Зависимость концентрации марганца  $x$  в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и энергии оптического перехода  $E_1$  от координаты вдоль кристалла.

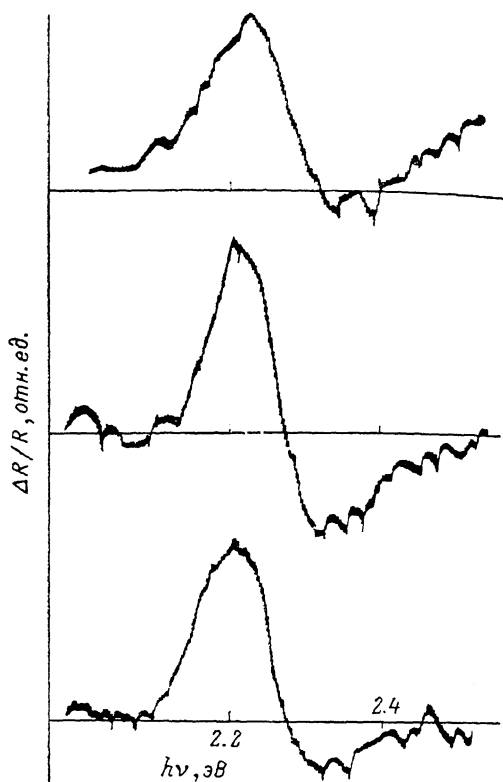


Рис. 2. Спектры электролитического электроотражения кристалла  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  для трех точек, смещенных друг относительно друга вдоль образца.

нокристаллах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  методом электролитического электроотражения и определении коэффициентов полинома (4). Исследования проводились на монокристаллических образцах  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , вырезанных из слитков, выращенных методом движущегося нагревателя с теллуrom в качестве растворителя. Для того чтобы можно было одновременно исследовать набор значений  $x$ , образцы вырезались из начальной части слитка, соответствующей переходной области распределения компонентов по длине слитка в направлении роста [111]. Микроструктура исследуемых образцов характеризовалась равномерным распределением дислокаций со средней плотностью  $(3 \div 5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

Распределение содержания марганца в кристалле было определено рентгеновским микроспектральным анализом в волновом дисперсионном режиме путем сканирования по образцу. Результаты этих измерений представлены на рис. 1 в виде зависимости содержания марганца  $x$  от координаты вдоль образца. Полученные кривые соответствовали переходному участку в распределении компонентов при кристаллизации.

Спектры электроотражения регистрировались с помощью электромультипликаторной спектральной системы с автоматическим сбором и отображением данных [5]. Измерительная ячейка была установлена на координатном столике

микроскопа, что позволяло перемещать исследуемый образец относительно светового зонда с заданным шагом и реализовать различные варианты локальности исследуемых участков поверхности образца.

Определение положений экстремумов спектральных линий и последующая обработка спектров методом «трех точек» [6] осуществлялась программно на ЭВМ в диалоговом режиме.

По спектрам электроотражения была исследована зависимость энергии оптического перехода  $E_1$  от содержания марганца  $x$ . Переход  $E_1$  наиболее удобен для исследования, так как его энергия лежит в области 2.12—3.6 эВ, а во время как типичная ширина запрещенной зоны  $E_g$  для этого вещества составляет несколько десятых электронвольта.

Измерения проводились при комнатной температуре на частоте модуляции 512 Гц с локальностью фотометрируемых участков  $\varnothing$  80 мкм; в качестве электролита был выбран молярный раствор хлорида калия. Непосредственно перед измерениями была проведена обработка поверхности кристалла травлением в 2%-м растворе BrOH в метаноле с последующей промывкой в дистиллированной воде.

Первоначально была проведена серия измерений при различных напряжениях смещения и модуляции для определения условий низкополюевого линейризованного электроотражения. Были подобраны удовлетворяющие этим условиям напряжения смещения (−0.3 В) и модуляции (0.4 В), обеспечивающие получение достаточно интенсивного спектра. Форма, частота, амплитуда модулирующего напряжения, а также отсутствие фото- и электрохимических реакций в ходе эксперимента контролировались. В 21-й точке поверхности образца путем сканирования вдоль направления изменения состава твердого раствора были сняты спектры электролитического электроотражения, три из которых представлены на рис. 2. Полученные спектры характеризуются двумя противоположными по знаку пиками: положительным в области 2.1—2.3 эВ и отрицательным в области 2.3—2.4 эВ. На основании сведений о зонной структуре  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  и с учетом литературных данных [2, 4, 7] эти пики идентифицированы как принадлежащие прямому оптическому переходу  $E_1$  в критической точке  $M$  зоны Бриллюэна в направлении  $[111]$ .

Полученные (с точностью  $\pm 0.01$  эВ) значения энергии  $E_1$  представлены на рис. 1 в виде зависимости от координаты вдоль образца. Таким образом, была получена параметрически заданная зависимость (рис. 1)  $E_1(x)$ . Сопоставление кривых рис. 1 позволяет рассмотреть эту зависимость в явном виде.

Дальнейшая обработка результатов заключалась в аппроксимации зависимости  $E_1(x)$  полиномом (1), которая проводилась методом наименьших квадратов с учетом «веса» каждой точки. Совместно с полученными обрабатывались также две точки, соответствующие «чистым» компонентам раствора:  $E_1=2.12$  эВ для  $HgTe$  [1, 4] и  $E_1=3.60$  эВ для  $MnTe$  [4]. В ходе обработки были получены следующие значения коэффициентов полинома:

$$E_1(x) = 0.414x^2 + 1.065x + 2.12. \quad (2)$$

Среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек от расчетной кривой не превышало  $1 \cdot 10^{-3}$  эВ, что свидетельствует о достаточно хорошей аппроксимации. Учитывая также погрешность позиционирования кристалла ( $\pm 0.025$  мм) и расчета  $E_1$  ( $\pm 0.01$  эВ), можно оценить погрешность приближения по уравнению (2) в 10%. Сравнивая полученные нами величины коэффициентов полинома с имеющимися литературными данными, можно отметить их близость с результатами работы [4] и отличие от результатов работы [1], что вызвано, по-видимому, тем, что дифференциальные методы (и в том числе метод электролитического электроотражения) дают более точные результаты, чем оптическое отражение. Таким образом, методом электролитического электроотражения по энергиям оптического перехода  $E_1$  получены значения коэффициентов аппроксимирующего полинома  $E_1(x)$ , с помощью которого можно определять содержание компонентов в твердых растворах  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

- [1] Kendelewicz T., Kierzek-Pecold E. // Sol. St. Commun. 1978. V. 25. P. 579—581.  
 [2] Ляпилин И. И., Цидильковский И. М. // УФН. 1985. Т. 146. В. 1. С. 35—72.  
 [3] Moritani A., Taniguchi K., Hamaguchi S. // J. Phys. Soc. Japan. 1973. V. 34. P. 79—88.  
 [4] Wrobel J. M., Basset L. C., Aubel J. L., Sundaram S. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. P. 1135—1138.  
 [5] Велиюлин Э. И., Ляпин Р. Х. // Тез. докл. XX Всес. съезда по спектроскопии. Киев, 1988.  
 [6] Aspnes D. E., Rowe J. E. // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 188—190.  
 [7] Amirtharaj P. M., Pollak F. H., Furdyna J. K. // Sol. St. Commun. 1981. V. 39. P. 35—39.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Получено 10.07.1989  
Принято к печати 1.09.1989

ФТП, том 24, вып. 1, 1990

## ЗЕЕМАНОВСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ $3\Gamma_8^-$ -СОСТОЯНИЯ МЕЛКИХ АКЦЕПТОРОВ В ГЕРМАНИИ

Васильев В. П., Гельмонт Б. Л., Голубев В. Г.,  
Иванов-Омский В. И., Кропотов Г. И.

В настоящей работе изучено зеемановское расщепление возбужденного  $3\Gamma_8^-$ -состояния дырки, связанной на мелком акцепторе III группы в германии. Получены и проанализированы экспериментальные и теоретические зависимости расщепления от ориентации вектора напряженности магнитного поля ( $\mathbf{H}$ ) по отношению к осям кристалла. Идентифицированы компоненты  $3\Gamma_8^-$ -состояния по проекции полного момента.

Четырехкратно вырожденное по проекции  $m_j$  полного углового момента  $J$  состояние дырки, волновая функция которого преобразуется по представлению  $\Gamma_8^-$ , в линейном по магнитному полю приближении описывается гамильтонианом [1]

$$\mathcal{H}_L = \mu_B g'_1 (\mathbf{H}J) + \mu_B g'_2 (J_x^2 H_x + J_y^2 H_y + J_z^2 H_z). \quad (1)$$

Здесь  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g'_1$  и  $g'_2$  — параметры, зависящие от невозможных волновых функций состояния.

Зеемановское расщепление при произвольной ориентации  $\mathbf{H}$

$$\Delta E = \mu_B g'_1 \lambda H, \quad (2)$$

где  $\lambda^2 = \frac{1}{8} [9(1+9r)^2 + (1+r)^2] \pm (1+7r) [(1+13r)^2 - 36r(1+10r)]^{1/2} + h_x^2 h_y^2 + h_y^2 h_z^2 + h_z^2 h_x^2)^{1/2}$ , а  $h_i = H_i/H$ . Параметр  $r = g'_2/4g'_1$  характеризует отклонение состояния от сферической симметрии. Формулу (2) иногда удобно представить в виде  $\Delta E_{m_j} = m_j g'_m \mu_B H$ , где  $m_j = +3/2, +1/2, -1/2, -3/2$ .

Расчетная зависимость величины линейного зеемановского расщепления от угла между вектором  $\mathbf{H}$  и кристаллографическими осями при вращении  $\mathbf{H}$  в плоскости (110) показана на рис. 1.

Экспериментально регистрировались спектры фотовозбуждения в  $3\Gamma_8^-$ -состояние из основного состояния ( $C$ -линии) дырки, связанной на акцепторах — боре, алюминии или галлии. Концентрация примесей составляла  $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Использовался метод субмиллиметровой лазерной фотоэлектрической магнитоспектроскопии [2]. Источниками излучения являлись лазеры на парах  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{CH}_3\text{OD}$  с оптической накачкой перестраиваемым  $\text{CO}_2$ -лазером [3].

Зависимость положения компонентов  $C$ -линии в магнитном поле от направления вектора  $\mathbf{H}$  в плоскости (110) приведена на рис. 2. Изменение расстояний