

УДК 621.315.592

С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, В. Г. Ремесник, Н. Х. Талипов

*(Новосибирск)***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА ПЛЕНОК  
CdTe/GaAs И КРИСТАЛЛОВ Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te**

Предложено использовать для оценки структурного совершенства полупроводниковых кристаллов параметр «резкости» дублета пиков  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$  в спектрах отражения  $Q = \Delta R / R_1$ . Проведено сравнение параметра  $Q$  с рентгеновскими кривыми качания для гетероэпитаксиальных пленок CdTe/GaAs и данными по радиационным нарушениям кристаллов Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te при имплантации ионов. Получено лучшее соответствие параметра  $Q$  и кристаллического совершенства гетероэпитаксиальных пленок CdTe/GaAs и кристаллов Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te.

**Введение.** Широкое применение кристаллов и эпитаксиальных пленок Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te для создания инфракрасных фотоприемников, а также существенный прогресс в технологии их роста и обработки требуют создания простых и надежных бесконтактных способов контроля стехиометрического состава и степени структурного совершенства. Одним из таких способов, несомненно, является измерение спектров оптического отражения полупроводников при энергиях, больших энергетического зазора запрещенной зоны  $E_g$  (видимая и ближняя ультрафиолетовые области спектра). Известно, что в этой области в спектрах отражения наблюдаются пики, связанные с переходами в различных точках зон Бриллюэна, и, в частности, наиболее острые – дублет пиков  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$ , которые связаны с переходами  $\Lambda_{4,5} \rightarrow \Lambda_6$  и  $\Lambda_6 \rightarrow \Lambda_6$  [1]. Энергетическое положение и форма пиков несут информацию о составе и структурном совершенстве кристалла. Поэтому изучению влияния различных факторов на дублет  $E_1, E_1 + \Delta_1$  посвящено множество работ (например, [2]).

Наиболее распространенным методом контроля дублета  $E_1, E_1 + \Delta_1$  является метод модуляционной спектроскопии – электроотражение [3, 4], который считается более чувствительным к изменению приповерхностных свойств полупроводника, чем, например, метод непосредственного измерения спектров отражения [5, 6]. Однако необходимость применения электролита и образование анодного окисла на поверхности в процессе измерения не позволяют использовать электроотражение в качестве бесконтактного неразрушающего метода контроля. Кроме того, существенное влияние величины

неоднородности электрического поля в полупроводнике всегда ставит под сомнение полученные результаты.

Целью данной работы является изучение возможности применения простого бесконтактного метода отражательной спектроскопии для оценки совершенства кристаллической структуры приповерхностного слоя полупроводника.

**Методика эксперимента.** Измерения спектров отражения проводились на спектрофотометре "Specord UV-VIS" с помощью двух специально изготовленных одинаковых приставок на отражение. Угол падения света на образец был выбран близким к нормальному ( $8^\circ$ ). Спектры отражения измерялись относительно неселективного алюминиевого зеркала с коэффициентом отражения, равным приблизительно 91 %. Для повышения чувствительности измерений применялся «растянутый» диапазон измерений (80–100 %) со смещением нуля. Точность отсчета волнового числа по нониусу шкалы составляла  $20 \text{ см}^{-1}$ , т. е.  $\Delta\lambda \cong 0,5 \text{ нм}$  в области 500 нм.

Типичный вид дублета  $E_1, E_1 + \Delta_1$  в спектре отражения монокристаллического  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  показан на рис. 1. Энергетическое положение пиков  $E_1, E_1 + \Delta_1$  монотонно зависит от состава: значение более острого пика  $E_1$  меняется от 2,08 эВ для  $\text{HgTe}$  до 3,31 эВ для  $\text{CdTe}$ . Это позволяет, зная калибровочную кривую  $E_1(x)$ , определять состав твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . В нашем случае точность определения  $x$  для КРТ с  $x \cong 0,2-0,3$  оценивается величиной  $\Delta x = \pm 0,003$ . Толщина анализируемого приповерхностного слоя полупроводника определяется при этом глубиной проникновения света, т. е. составляет около 50 нм. Штриховой линией на рис. 1 показано изменение формы дублета, происходящее при увеличении дефектности кристаллической структуры (например, в результате имплантации тяжелых ионов). Видно, что введение радиационных дефектов приводит к «уширению» пиков и «размытию» дублета  $E_1, E_1 + \Delta_1$ . «Уширение» пика  $E_1$  при имплантации кристаллов успешно используется в методе электроотражения при изучении распределения радиационных дефектов по глубине [4]. Мерой «уширения» пика  $E_1$  является параметр уширения  $\Gamma$ , определяемый достаточно сложно по специальной «трехточечной методике» [7]. В случае непосредственного измерения дублета пиков отражения нет необходимости, на наш взгляд, представлять дублет в виде суперпозиции двух пиков и вычислять отдельно

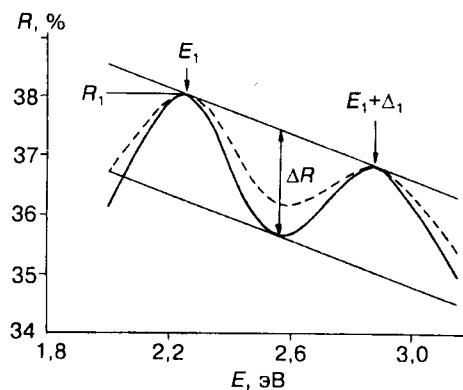


Рис. 1. Дублет пиков отражения  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$  в спектре отражения  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x \sim 0,2$ . «Резкость» пиков оценивается параметром  $Q = \Delta R/R_1$

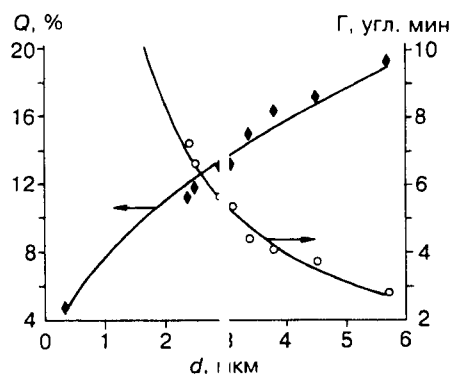


Рис. 2. Зависимость параметра  $Q$  и полуширины рентгеновских кривых качания  $\Gamma$  от толщины эпитаксиальной пленки  $\text{CdTe}$  на подложке  $(100) \text{GaAs}$

их полуширины. Мерой «размытия» дублета при увеличении дефектности кристаллической структуры может служить легко определяемый параметр «резкости» пиков  $Q = \Delta R/R_1$ , где  $\Delta R$  – величина провала между пиками,  $R_1$  – величина спектра отражения в пике  $E_1$  (см. рис. 1). Заметим, что такой способ оценки резкости пиков автоматически учитывает изменение величины отражения и наклона пиков, возникающее при появлении рассеяния.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 2 приведены результаты измерения параметра резкости пиков  $Q$  и полуширины рентгеновских кривых качания  $\Gamma$  для пленок  $\text{CdTe}/\text{GaAs}$  различной толщины. Пленки  $\text{CdTe}$  выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках  $(100) \text{GaAs}$ . Рост пленок проводился в оптимальных условиях со скоростью около  $1 \text{ мкм/ч}$ . Из зависимости  $\Gamma$  от толщины видно присутствие некоторого переходного слоя в эпитаксиальной пленке  $\text{CdTe}$ , связанного с рассогласованием параметров решеток  $\text{GaAs}$  и  $\text{CdTe}$ . Несовпадение кристаллической структуры переходного слоя  $\text{CdTe}$  наблюдается также в зависимости параметра резкости пиков  $Q$  от толщины. При толщине эпитаксиальной пленки  $\geq 6 \text{ мкм}$  параметры  $\Gamma$  и  $Q$  примерно соответствуют таковым для монокристаллического  $\text{CdTe}$ . Заметим, что нельзя ожидать полного соответствия кривых  $\Gamma$  и  $Q$  из-за разных глубин проникновения теллурида кадмия света и рентгеновского излучения. Энергетическое положение пиков  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$  не изменялось с толщиной эпитаксиальной пленки с точностью в пределах  $0,01 \text{ эВ}$ .

Параметр резкости пиков  $Q$  хорошо отражает степень разупорядочения кристалла при ионной имплантации. На рис. 3 представлена зависимость  $Q$  от дозы ионов  $\text{V}^+$  и  $\text{Xe}^+$ , имплантированных в кристаллы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0,22$ )  $p$ -типа с энергией  $135 \text{ кэВ}$ . Экспериментальные точки получены при имплантации различных участков в одного и того же кристалла. Видно, что параметр  $Q$  уменьшается с ростом дозы и массы имплантируемых ионов, что свидетельствует об увеличении степени разупорядочения кристаллической решетки.

На рис. 4 показаны результаты измерения параметра  $Q$  в сочетании с послойным травлением. Это позволяет определять профиль радиационных нарушений по глубине при имплантации и отжиге кристаллов. Два кристалла  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0,21$  и  $x = 0,22$  были закрыты защитным слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной  $45 \text{ нм}$  и имплантированы ионами  $\text{P}^+$  различной энергии. Затем образцы

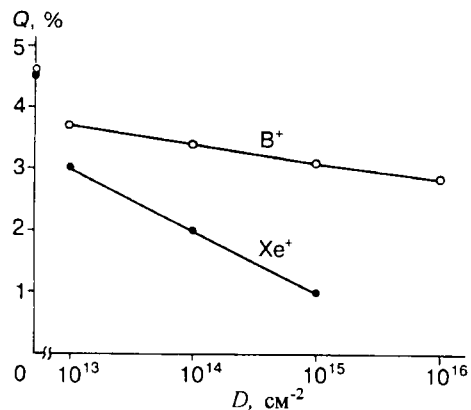


Рис. 3. Зависимость параметра  $Q$  от дозы ионов  $B^+$  и  $Xe^+$ , имплантированных в кристаллы  $Cd_xHg_{1-x}Te$   $p$ -типа ( $x = 0,22$ ) с энергией 135 кэВ

(кроме половины образца с  $x = 0,22$ ) подвергались кратковременному отжигу ( $250^\circ C$  в течение 30 мин). После удаления защитного слоя  $SiO_2$  путем анодного окисления на заданную глубину и удаления окисла были получены профили введенных структурных нарушений. Имплантация ионов  $P^+$  дозой  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ , энергией 200 кэВ в кристаллы  $Cd_{0,22}Hg_{0,78}Te$  привела к возникновению нарушений структуры на глубину, приблизительно равную 260 нм (кривая 5). В процессе постимплантационного отжига ( $250^\circ C$ , 30 мин) части этого же образца произошло восстановление кристаллической структуры (кривая 4). Кривые 1–3 показывают влияние имплантации и отжига при больших дозах и меньших энергиях ионов  $P^+$ . Кривая 1 соответствует неимплантированному участку кристалла  $Cd_{0,21}Hg_{0,79}Te$ , подвергнутому только отжигу ( $250^\circ C$ , 30 мин). Кривые 2 и 3 – имплантированные и отожженные участки (кривая 2 – ионы  $P^+$ , 50 кэВ,  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; кривая 3 – ионы  $P^+$ , 50 кэВ,  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ ). Из рисунка видно, что глубина нарушенного слоя определяется энергией ионов (кривые 2, 3 и 5). Отжиг при температуре  $250^\circ C$  в течение

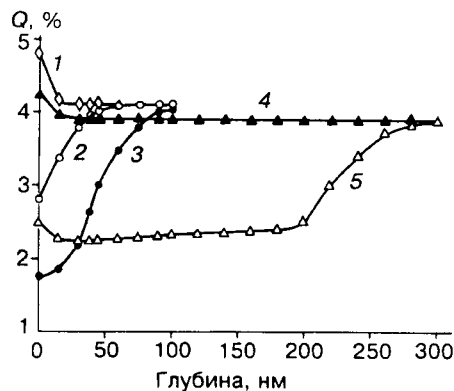


Рис. 4. Распределение значений параметра  $Q$  по глубине при имплантации и отжиге кристаллов  $Cd_xHg_{1-x}Te$

30 мин устраняет радиационные дефекты при дозе  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> (кривые 4 и 5) и является явно недостаточным при дозах  $10^{15} - 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (кривые 2 и 3).

**Заключение.** Приведенные результаты показывают, что предложенный метод оценки резкости пиков отражения дублета  $E_1, E_1 + \Delta_1$  позволяет получать достаточно хорошую информацию о степени совершенства гетероэпитаксиальных пленок CdTe и монокристаллов  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . Определение параметра резкости пиков  $Q$  по спектрам отражения является одним из простых бесконтактных методов оценки дефектности кристаллической структуры. Вероятно, он может быть полезен для исследования других полупроводниковых кристаллов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973.
2. Дагис Р., Бабонас Г., Кавалюскас Ю. и др. Электронная структура и оптические спектры полупроводников. Вильнюс: Меклос, 1997.
3. Moritani A., Taniguchi K., Hamaguchi S., Nakai J. Electroreflectance study of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // J. Phys. Soc. Jap. 1973. 34 N 1. P. 79.
4. Кавалюскас Ю. Ф., Эйджюнас Г. С., Седнев М. В., Шилейка А. Ю. Изучение радиационных дефектов и состояния поверхности имплантированных кристаллов  $Cd_{0,27}Hg_{0,73}Te$  // Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. № 10. С. 127.
5. Koppel P. Visible and ultraviolet reflectivity of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // J. Appl. Phys. 1985. 57, N 5. P. 1705.
6. Rodzik A., Kisiel A. Reflectivity spectra of monocrystalline  $Cd_xHg_{1-x}Te$  as a function of composition and temperature // J. Phys. C. Solid State Phys. 1983. 16. P. 203.
7. Aspnes D. E. Third-derivative modulation spectroscopy with low-field electroreflectance // Surf. Sci. 1973. 37. P. 418.

*Поступила в редакцию 26 мая 1998 г.*