

©1994 г.

ИЗУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР GaAs МЕТОДОМ АКУСТОМОДУЛЯЦИИ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

О.А.Коротченко

Киевский государственный университет им. Тараса Шевченко,
Киев, Украина
(Получена 9 августа 1993 г. Принята к печати 7 декабря 1993 г.)

Зарегистрированы спектры акустически модулированного отражения (АМО) света эпитаксиальных пленок GaAs, специально не легированных и с примесями Si и Te. Обнаружены пики АМО на $1.427 \div 1.407$ эВ и вблизи 2.9 эВ, соответствующие электронным переходам в критических точках M_0 и M_1 зонной схемы GaAs, а также сдвинутые на $35 \div 40$ мэВ ниже края фундаментального поглощения, соответствующие уровням мелких точечных центров. Интенсивные линии в спектрах АМО на 1.35 и 1.37 эВ предположительно связываются с несовершенствами структуры GaAs вблизи границы раздела подложка-эпитаксиальная пленка.

В настоящее время для исследования полупроводников широкое распространение получили методы модуляционной спектроскопии [1]. В их основе лежит исследование образцов при приложении к ним периодического внешнего возмущения — электрического или магнитного поля [2,3], гидростатического сжатия [4], световых [5] и тепловых импульсов [6]. При этом фиксируются изменения оптических спектров, обусловленные действием периодического возмущения, позволяющие избавиться от сильного сплошного фона при записи абсолютного спектра и выявить его слабую тонкую структуру. Как правило, исследуются спектры оптического поглощения и отражения с тонкой структурой, связанной с критическими точками электронных зон энергии. Развитие методов молекулярно-лучевой эпитаксии позволило в настоящее время конструировать заданную зонную структуру в гетеропереходах и квантово-размерных структурах. Это дало новый толчок совершенствованию модуляционных методик в последние годы [7,8]. В настоящей работе ставилась цель — исследование эпитаксиальных слоев GaAs при модуляции отражения света воздействием на образец ультразвука.

Эпитаксиальные слои GaAs n -типа, специально не легированные и с примесями Si и Te, выращивались на подложке GaAs (100). Концентрация свободных носителей при 300 К составляла от $2.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (нелегированные) до $(0.6 \div 5.0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (легированные слои). Типичная

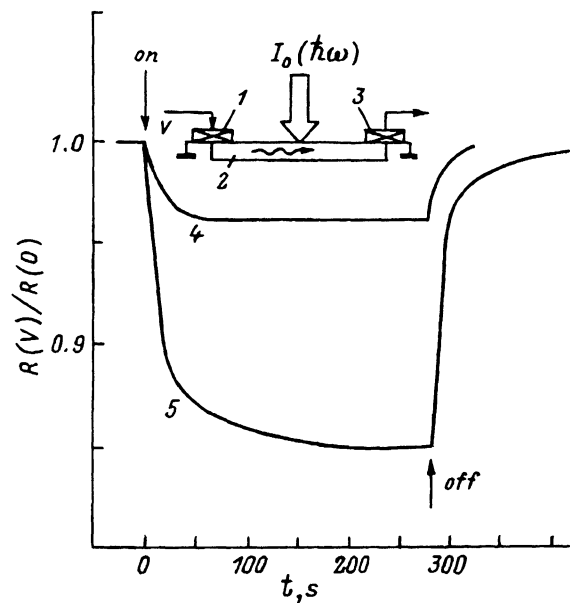


Рис. 1. Схема эксперимента (1-3) и временные зависимости (4, 5) изменения коэффициента отражения для света вблизи края фундаментального поглощения при включении и выключении ультразвука. 1, 3 — возбуждающий и приемный пьезопреобразователи; 2 — образец GaAs; 4 — эпитаксия GaAs:Te, $V = 14$ В, $f = 7.29$ МГц; 5 — GaAs:Si, $V = 15.5$ В, $f = 7.22$ МГц.

толщина эпитаксиального слоя и подложки изменялась от 2.5 до 9 мкм и от 310 до 390 мкм соответственно. Ультразвук в пластинах возбуждался с помощью пьезокерамических преобразователей с резонансной частотой вблизи 7.3 МГц, помещаемых на поверхности исследуемой пластины (см. схему на рис. 1). Приложение электрического напряжения V к преобразователю 1 возбуждало в пластине 2 волны Лэмба, регистрируемые преобразователем 3. В зависимости от толщины пластины $2d$ и частоты f ультразвуковой волны может возбуждаться ряд мод в соответствии с характером упругих смещений, называемых симметричными (s) и антисимметричными (a). Область частот УЗ в экспериментах составляла $2 \div 8$ МГц. Эффективно возбуждались моды вблизи критических частот их рождения. Оптическое отражение R образца регистрировалось обычным методом, $R(\hbar\omega) = I(\hbar\omega)/I_0(\hbar\omega)$, где I_0 и I — интенсивности падающего на образец и отраженного от его поверхности света. Для исключения возможного влияния искривления поверхности образца при распространении волны на коэффициент отражения света проводились исследования со стеклянными пластинками такой же, как и GaAs, толщины. Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре в неполяризованном свете.

Диэлектрическая постоянная ϵ вблизи трехмерной критической точки описывается выражением

$$\epsilon \sim i^{r+1} M_{cv}^2 (\omega - \omega_g)^{1/2}, \quad (1)$$

где ω — частота света, ω_g — ширина запрещенной зоны, r — индекс критической точки, M_{cv} — матричные элементы, отвечающие заданной паре зон, валентной (v) и проводимости (c). В этом случае особенность оптического спектра отражения вблизи рассматриваемой критической точки при возмущающем действии ультразвуковой волны можно представить в виде

$$\frac{d\epsilon}{d\omega_g} = -\frac{i^{r+1} M_{cv}^2}{2} (\omega - \omega_g)^{-1/2} + \frac{d(i^{r+1} M_{cv}^2)}{d\omega_g} (\omega - \omega_g)^{1/2}. \quad (2)$$

Поскольку второй член в выражении (2) при $\omega \rightarrow \omega_g$ пренебрежимо мал, окончательно можно записать

$$\frac{d\varepsilon}{d\omega_g} \approx -\frac{1}{2}i^{r+1}M_{cv}^2(\omega-\omega_g)^{-1/2}. \quad (3)$$

Полученное выражение свидетельствует о резком возрастании $|d\varepsilon/d\omega_g|$ в критической точке ω_g . Учитывая также обнаруженное ранее [9,10] влияние ультразвука на ширину запрещенной зоны полупроводников:

$$d\omega_g \approx \beta A, \quad (4)$$

где A — амплитуда УЗ ($A \sim V$), β — коэффициент, зависящий от механизма влияния ультразвука на ω_g , можно ожидать существенное изменение коэффициента отражения света вблизи критических точек зонной схемы.

Действительно, проведенными исследованиями установлено влияние ультразвука на коэффициент отражения света с энергией вблизи критических точек E_0 и E_1 зонной схемы GaAs. Введение ультразвука приводило к уменьшению коэффициента R , отключение УЗ практически полностью восстанавливало его значение. При этом изменение R во времени после включения и отключения УЗ (рис. 1, кривые 4 и 5) хорошо описывается экспоненциальными зависимостями с постоянной $\tau \approx 20$ с. Такая длинновременная кинетика характерна для ультразвукового воздействия на оптические и механические свойства кристалла. Она не позволяет регистрировать изменение R на частоте УЗ воздействия по стандартной модуляционной методике. Поэтому в работе экспериментально регистрировалась зависимость от частоты ω величины

$$\frac{\Delta R}{R(0)} = \frac{R(V)-R(0)}{R(0)}, \quad (5)$$

где $R(V)$ — коэффициент отражения света при амплитуде напряжения V .

Полученные спектральные зависимости акустически модулированного отражения (АМО) для трех из исследованных образцов и разных частот УЗ приведены на рис. 2, 3. Линии $E_0 = 1,427$ эВ (рис. 2, 3, кривые 1 и 2) и $E_1 = 2,884$ эВ (рис. 3, кривые 3 и 4) соответствуют электронным переходам в критических точках M_0 и M_1 между валентной зоной и зоной проводимости в точках $\Gamma(E_0)$ и $\Lambda(E_1)$. Они наблюдаются в соответствии с выражением (3) вследствие уменьшения энергии таких переходов под действием УЗ [формула (4)]. В представленных спектрах наблюдаются также линии, проявляющиеся как оптические переходы ниже края E_0 . При этом энергетическое положение пика, обозначенного E_0^s , существенно зависит от амплитуды УЗ (спектры 1-6 на рис. 2). Положение E_0^s при различных амплитудах УЗ показано штриховой линией на вставке рис. 2. Необходимо отметить, что УЗ воздействие вблизи резонансной частоты возбуждающего преобразователя, когда возрастает деформация в волне, приводит к размытию и практически полному исчезновению пика E_0 (рис. 2, кривые 4-6).

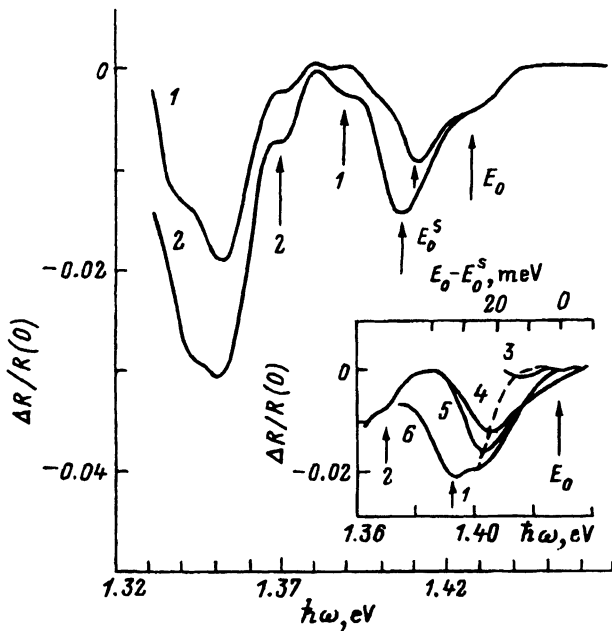


Рис. 2. Спектры АМО GaAs:Te ($2d = 320$ мкм) при частоте УЗ f , МГц: 1, 2 — 2.014, 3–6 — 7.220 и амплитуде V , В: 1 — 13, 2 — 20, 3 — 4, 4 — 8.5, 5 — 11, 6 — 12. Штриховая линия на вставке характеризует сдвиг E_0^s относительно E_0 (верхняя шкала) при увеличении V .

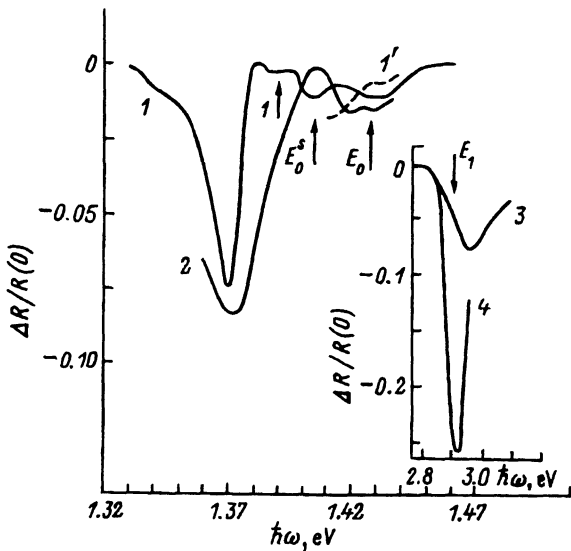


Рис. 3. Спектры АМО GaAs:Si (1, 1', 3) и GaAs (2, 4) с толщинами $2d = 390$ и 310 мкм соответственно. Частота УЗ f , МГц: 1 — 2.564 (мода s_2), 1' — 2.208 (мода s_1), 2, 4 — 7.322, 3 — 6.372. Амплитуда V , В: 2, 4 — 6, 3 — 7, 1, 1' — 18.

Аналогично увеличению деформации всестороннего сжатия [11] при переходе от моды s_2 к моде s_1 волн Лэмба вблизи критических частот их рождения вызывало уменьшение пика АМО на E_0 (спектры 1 и 1' на рис. 3). Отметим также, что максимальное смещение $E_0 - E_0^s \approx 25$ мэВ в спектре 6 на рис. 2 соответствует по порядку величины полученным ранее в других полупроводниках [9,10] изменениям ω_g под действием УЗ. Указанные особенности позволяют идентифицировать оба пика, E_0 и E_0^s , как оптические переходы в критической точке E_0 . Совместное их проявление в спектрах рис. 2, 3 может быть связано как со сложным характером влияния УЗ на частотную зависимость диэлектрической проницаемости вблизи E_0 , так и наличием в образце одновременно областей сжатия и растяжения в поле ультразвука.

В спектрах на рис. 2 наблюдаются также пики, сдвинутые на $35 \div 40$ мэВ относительно E_0 (пики 1) и E_0^s (пики 2). Полосы с энергией перехода на $30 \div 40$ мэВ ниже края E_0 типичны для спектров электро- и фотоотражения GaAs [1,12]. Они традиционно приписываются мелким примесным уровням, в частности примеси Si. Близкую по величине глубину залегания имеет и вакансия мышьяка V_{As} в GaAs — 30 мэВ ниже дна зоны проводимости [13]. Учитывая сказанное, можно связать рассматриваемые пики 1 и 2 с мелкими точечными центрами в GaAs. При этом их проявление в спектрах АМО может быть вызвано в общем случае как изменением заселенности уровней примесей при УЗ воздействии за счет их ионизации и перезарядки [14,15], так и возникновением собственных дефектов типа V_{As} в поле ультразвуковой волны. В нашем случае преобладающим, по-видимому, является первый механизм, учитывая отсутствие ярко выраженного пика 1 в спектре 2 на рис. 3 для специально не легированного GaAs.

В спектрах рис. 2, 3 наблюдаются также наиболее интенсивные полосы АМО при 1.35 эВ (эпитаксия GaAs:Te, спектры 1, 2 на рис. 2) и 1.37 эВ (эпитаксия GaAs:Si и GaAs, спектры 1, 2 на рис. 3). Особенностью этих полос является то, что они проявляются лишь в образцах с эпитаксиальными слоями и имеют существенно различную интенсивность в различных образцах. Это позволяет предположить их связь с состояниями (дефектами), локализованными вблизи границы раздела эпитаксиальная пленка — пластина подложки. Иными словами, рассматриваемые полосы могут определяться качеством нанесения эпитаксиальных покрытий, что требует, однако, дальнейшего изучения.

Таким образом, в работе показана возможность использования зарегистрированных спектров акустически модулированного отражения для: 1) изучения энергетических параметров зонной структуры кристалла. Преимуществом данного метода перед традиционными модуляционными методиками может служить комбинированный характер возмущающего воздействия высокочастотного ультразвука на кристалл, сочетающего деформационное, тепловое, пьезоэлектрическое воздействие, а также влияние на его дефектную структуру; 2) наблюдения мелких уровней дефектов, проявляющихся как оптические переходы ниже края E_0 ; 3) экспрессного контроля качества выращивания эпитаксиальных пленок на пластине-подложке.

Автор выражает признательность И.В.Островскому за инициативу в исследовании эпитаксиальных структур с использованием ультразвука, постоянное внимание к работе и обсуждение материалов статьи.

Список литературы

- [1] М. Кардона. *Модуляционная спектроскопия* (М., 1972).
- [2] В.О. Seraphin, N. Bottka. *Phys. Rev.*, **145**, 628 (1966).
- [3] А.Г. Жилич, Б.С. Монозон. *Магнито- и электропоглощение света в полупроводниках* (Л., 1984).
- [4] W. Garfinkel, J.J. Tiemann, W.E. Engeler. *Phys. Rev.*, **148**, 695 (1966).
- [5] J.L. Shay. *Phys. Rev. B*, **2**, 803 (1970).
- [6] B. Batz. *Sol. St. Commun.*, **4**, 241 (1966).
- [7] R.N. Bhattacharya, H. Shen et al. *Phys. Rev. B*, **37**, 4044 (1988).
- [8] Y.R. Lee, A.K. Ramdas. *Phys. Rev. B*, **41**, 8380 (1990).
- [9] И.В. Островский, О.А. Коротченков. *УФЖ*, **30**, 356 (1985).
- [10] И.В. Островский. *Письма в ЖЭТФ*, **34**, 467 (1981).
- [11] *Физическая акустика*, под ред. У. Мэзона (М., 1966) Т. 1, ч. А.
- [12] А.Н. Пихтин, В.М. Айраксинен, Х. Липсанен, Т. Туоми. *ФТП*. **23**, 1280 (1989).
- [13] K. Saarinen, P. Hautojärvi, P. Lanki, C. Corbel. *Phys. Rev. B*, **44**, 10585 (1991).
- [14] В.В. Попов, А.В. Чаплик. *ФТП*, **10**, 1780 (1976).
- [15] A. Abbate, K.J. Nan, I.V. Ostrovskii, P. Das. *Sol. St. Electron.*, **36**, 679 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

Study of Epitaxial GaAs Structures by the Light Reflection Acoustic Modulation Method

O.A. Korotchenkov

Kiev, Ukraine
