

# Радиационно-стимулированная релаксация внутренних механических напряжений в гомоэпитаксиальных пленках фосфида галлия

© П.А. Генцарь<sup>¶</sup>

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина

(Получена 19 декабря 2005 г. Принята к печати 9 февраля 2006 г.)

Методом электроотражения исследованы электронные переходы  $E_0$ ,  $E_0 + \Delta_0$  в гомоэпитаксиальных пленках  $n$ -GaP (111) с концентрацией электронов  $5.7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  до и после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  в интервале доз  $10^5$ – $10^6$  рад при комнатной температуре с использованием электролитической методики. Наблюдалось расщепление низкоэнергетического экстремума после облучения. Уменьшение внутренних механических напряжений в пленке под действием  $\gamma$ -облучения оценивалось по изменению энергии электронного перехода и столкновительного параметра уширения. Оценено также увеличение времени энергетической релаксации носителей заряда после облучения.

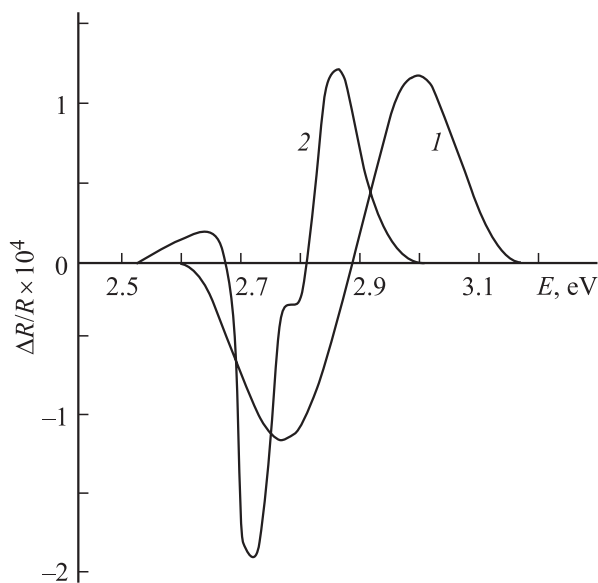
PACS: 61.80.Ed, 71.70.Ej, 78.20.Jq, 81.40.Wx

В современной электронной технике и физических исследованиях используется гетероэпитаксиальное осаждение полупроводниковых пленок. Характерной чертой гетеросистем является присутствие в них внутренних механических напряжений. Эти напряжения, возникающие из-за несоответствия параметров решетки пленки и подложки, а также различия коэффициентов их термического расширения, приводят к различным эффектам: от изменения структуры энергетических зон до возникновения технологических дефектов на границе раздела [1]. Эти эффекты в процессе работы полупроводниковых приборов снижают стабильность последних [2]. Однако внутренние механические напряжения могут возникать также в гомоэпитаксиальных системах из-за различия концентраций носителей заряда в пленке и в подложке [3]. Модуляционная спектроскопия электроотражения занимает ведущее место в исследовании зонной структуры твердого тела вследствие высокой разрешающей способности. В сравнении с классической спектроскопией электроотражение более чувствительно к изменениям в энергетическом спектре полупроводника [4,5]. В данном сообщении метод электроотражения использовался для изучения влияния  $\gamma$ -облучения на внутренние механические напряжения в гомоэпитаксиальных пленках фосфида галлия.

Исследованы спектры электроотражения гомоэпитаксиальных пленок  $n$ -GaP (111) с концентрацией электронов  $5.7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  до и после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  в интервале доз  $10^5$ – $10^6$  рад. Пленки были получены методом газофазной эпитаксии на подложках  $n$ -GaP с концентрацией носителей  $10^{24} \text{ м}^{-3}$  и имели толщину  $(0.1\text{--}5) \cdot 10^{-6}$  м. Сигнал электроотражения измеряли при комнатной температуре с использованием электролитической методики (электролит — водный раствор 1N KCl) на частоте первой гармоники модуляции 2.2 кГц с пороговой чувствительностью  $5 \cdot 10^{-6}$  и спектральным разрешением 0.003 эВ. Измерения проведены в

спектральной области 2.5–3.2 эВ, включающей прямые переходы  $E_0$  ( $\Gamma_{8V}$ – $\Gamma_{6C}$ ) и  $E_0 + \Delta_0$  ( $\Gamma_{7V}$ – $\Gamma_{6C}$ ) в неполяризованном свете, поскольку для поверхности (111) поляризационная зависимость электроотражения отсутствует.

На рис. 1 показаны спектры электроотражения пленки до (кривая 1) и после (кривая 2) облучения  $\gamma$ -квантами. Для устранения влияния эффекта полевого уширения измерения спектров электроотражения выполнены при одинаковых напряженностях электрического поля в образцах (одинаковом постоянном смещении  $-0.6$  В). Спектр электроотражения необлученной пленки (кривая 1) состоит из двух пиков — отрицательного и положительного. Высокий уровень механических напряжений на гетерогранице и в пленке привел к тому, что



**Рис. 1.** Спектры электроотражения пленки  $n$ -GaP (111) до (1) и после (2) облучения  $\gamma$ -квантами дозой  $2 \cdot 10^5$  рад. Постоянное смещение  $-0.6$  В. Модулирующее напряжение: 1 — 0.9, 2 — 0.5 В. Потенциал плоских зон 2.1 В.

<sup>¶</sup> E-mail: gentsar@isp.kiev.ua

наблюдается размытый спектр. В нем не разрешаются электронные переходы  $E_0$  с энергией 2.74 эВ и  $E_0 + \Delta_0$  с энергией 2.84 эВ для GaP [6]. В этом случае ширина запрещенной зоны  $E_0$  определялась по энергии первого экстремума в спектре, а столкновительный параметр уширения  $\Gamma$  определялся по полуширине данного пика. Полученные значения  $E_0$  и  $\Gamma$  для необлученного образца равны 2.772 и 0.146 эВ соответственно. После облучения пленок дозой  $2 \cdot 10^5$  рад (кривая 2) механические напряжения уменьшились, система приблизилась к структурно-равновесному состоянию. Наблюдалось возрастание амплитуды пиков и заметное сужение спектра электроотражения. Следует отметить, что кривая 1 получена при модуляции 0.9 В, а кривая 2 — при модуляции 0.5 В. Как известно, при увеличении модулирующего напряжения амплитуда пиков должна возрастать [4]. На эксперименте после облучения наблюдается большая амплитуда сигнала при меньшем модулирующем напряжении (кривая 2).

При увеличении напряженности электрического поля в слое истощения облученной пленки (постоянное смещение  $-0.2$  В) амплитуда пиков еще более возрастает (рис. 2). Кроме того, изменяются энергетическое положение пиков в спектре электроотражения и энергетическое расстояние между пиками. Пик экстремума  $E_0$  после облучения пленок (рис. 1, кривая 2) сместился на величину  $\Delta E_0 = 0.043$  эВ в сторону меньших энергий. Это значит, что для исходной гомоэпитаксиальной системы в пленке GaP присутствовали внутренние механические напряжения сжатия.

При гидростатическом давлении  $P$  изменение электронного перехода  $\Delta E_0$  равно [5]

$$\Delta E_0 = \frac{a_c - a_v}{V} \Delta V, \quad (1)$$

где  $a_c$  и  $a_v$  — деформационные потенциалы зоны проводимости и валентной зоны соответственно;  $\Delta V/V$  — относительное изменение объема, которое можно записать в виде

$$\frac{\Delta V}{V} = -3\Delta P(S_{11} + 2S_{12}), \quad (2)$$

где  $S_{11}$  и  $S_{12}$  — компоненты тензора упругости, которые связаны с компонентами тензора жесткости  $C_{11}$  и  $C_{12}$  соотношением

$$(S_{11} + 2S_{12})^{-1} = C_{11} + 2C_{12}. \quad (3)$$

Используя соотношения (1)–(3), получаем

$$\frac{\Delta E_0}{\Delta P} = \frac{-3(a_c - a_v)}{(C_{11} + 2C_{12})}. \quad (4)$$

Для GaP  $a_c - a_v = -9.3$  эВ;  $C_{11} = 1.412 \cdot 10^{11}$  Па;  $C_{12} = 0.625 \cdot 10^{11}$  Па [5]. Отсюда получаем значения коэффициента изменения энергии перехода GaP при гидростатическом давлении  $\Delta E_0/\Delta P = 1.05 \cdot 10^{-10}$  эВ/Па. Оценка изменения величины внутренних механических напряжений в пленке GaP при  $\Delta E_0 = 0.043$  эВ дает значение  $\Delta P = 4.1 \cdot 10^8$  Па.

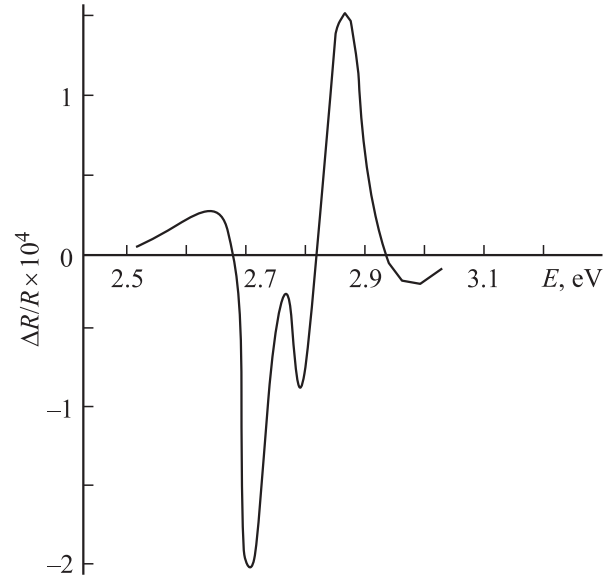


Рис. 2. Спектр электроотражения пленки  $n$ -GaP после облучения  $\gamma$ -квантами дозой  $2 \cdot 10^5$  рад. Постоянное смещение  $-0.2$  В. Модулирующее напряжение 0.5 В.

Для одноосного сжатия в направлении [111]

$$\frac{\Delta E_0}{\Delta P} = -\frac{1}{\sqrt{3}} d \frac{1}{C_{44}}, \quad (5)$$

где  $d$  — сдвиговой деформационный потенциал;  $C_{44}$  — модуль жесткости;  $d = -4.5$  эВ;  $C_{44} = 0.705 \cdot 10^{11}$  Па для GaP [5]. Тогда  $\Delta E_0/\Delta P = 0.369 \cdot 10^{-10}$  эВ/Па, и изменение внутренних механических напряжений в результате  $\gamma$ -облучения при  $\Delta E_0 = 0.043$  эВ равно  $11.7 \cdot 10^8$  Па. Следовательно, под действием  $\gamma$ -облучения дозой  $2 \cdot 10^5$  рад механические напряжения в пленке GaP уменьшились на величину, среднюю между  $4.1 \cdot 10^8$  Па (гидростатическое давление) и  $11.7 \cdot 10^8$  Па (одноосное сжатие по направлению [111]), т. е. на  $7.9 \cdot 10^8$  Па.

При приложении постоянного смещения  $-0.2$  В после облучения, кроме возрастания амплитуды спектра, также наблюдается более четкое спектральное разрешение переходов  $E_0$  и  $E_0 + \Delta_0$ . На рис. 2 хорошо видно расщепление низкоэнергетического экстремума вследствие уменьшения рассеяния носителей заряда и благодаря этому возрастанию амплитуды сигнала электроотражения, обусловленного переходами из спин-орбитально отщепленной валентной зоны. Разность энергий основного и отщепленного пиков на рис. 2 соответствует величине спин-орбитального расщепления  $\Delta_0 = \Gamma_{8V} - \Gamma_{7V} = 0.11$  эВ, что хорошо согласуется со значением 0.10 эВ, приведенным в [6]. Уменьшение столкновительного параметра уширения  $\Gamma$  после облучения от значения 0.146 до 0.080 эВ свидетельствует о возрастании времени энергетической релаксации носителей заряда  $\tau = \hbar/\Gamma$  от  $4.5 \cdot 10^{-15}$  до  $8.2 \cdot 10^{-15}$  с и о стремлении исходной гомоэпитаксиальной системы с механическими напряжениями к структурно-равновесному состоянию.

При увеличении дозы облучения до  $10^6$  рад энергии переходов практически не изменялись, а параметр уширения слегка уменьшался.

Таким образом, результаты исследования спектров электроотражения гомоэпитаксиальных пленок  $n$ -GaP показали, что в выращенных газофазной эпитаксией пленках имелись достаточно большие внутренние механические напряжения сжатия. Под влиянием  $\gamma$ -облучения дозой  $2 \cdot 10^5$  рад они уменьшились на величину  $7.9 \cdot 10^8$  Па, т.е. произошла радиационно-стимулированная релаксация внутренних механических напряжений. В результате уменьшилось рассеяние возбужденных светом носителей заряда и возросло время их энергетической релаксации от  $4.5 \cdot 10^{-15}$  до  $8.2 \cdot 10^{-15}$  с.

Неразрешенные электронные переходы  $E_0$  и  $E_0 + \Delta_0$  в исходных гомоэпитаксиальных пленках GaP из-за размытия спектра электроотражения вследствие присутствия в них внутренних механических напряжений разрешились только после радиационно-стимулированной релаксации напряжений. Определенная величина спин-орбитального расщепления  $\Delta_0 = \Gamma_{8V} - \Gamma_{7V} = 0.11$  эВ совпадает с литературными данными. Полученные результаты могут быть использованы при разработке радиационной технологии изготовления приборов нового поколения на основе гомоэпитаксиальных пленок фосфида галлия.

## Список литературы

- [1] Е.Ф. Венгер, Л.А. Матвеева. Неорг. матер., **33**(2), 153 (1997).
- [2] Ю.А. Тхорик. *Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах* (Киев, Наук. думка, 1994).
- [3] О.Ю. Борковская, С.А. Груша, Н.Л. Дмитрук и др. ЖТФ, **55**(10), 1977 (1985).
- [4] В.А. Тягай, О.В. Снитко. *Электроотражение света в полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1980).
- [5] П. Ю. М. Кардона. *Основы физики полупроводников* (М., Физматлит, 2002).
- [6] M. Cardona, K.L. Shaklee, F.H. Pollak. Phys. Rev., **154**(3), 696 (1967).

Редактор Т.А. Полянская

## Radiation-stimulated relaxation of an internal mechanical strain in homoepitaxial GaP films

P.A. Gentsar

V.E. Lashkarev Institute of Semiconductors Physics,  
National Academie of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

**Abstract** An electroreflectance method based on the electrolyte technique is used for the investigation of electron transitions  $E_0$ ,  $E_0 + \Delta_0$  in homoepitaxial films  $n$ -GaP (111) having the electron concentration  $5.7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  before and after irradiation by  $^{60}\text{Co}$  gamma quanta within the dose range of  $10^5 - 10^6$  rad at the room temperature. The authors observed the low-energy extremum splitting after irradiation. The decrease in internal mechanical strains inside the films as a result of gamma irradiation was estimated via changes of the electron transition energy and collision parameter of widening. Also estimated is the time of charge carrier energy relaxation after the irradiation.