

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.222.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСТРОЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В НАПРЯЖЕННЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/GaAsP МЕТОДОМ  
СПЕКТРОСКОПИИ ФОТООТРАЖЕНИЯЛ. П. Авакянц, П. Ю. Боков, Т. П. Колмакова<sup>\*)</sup>, А. В. Червяков

(кафедра общей физики)

E-mail: avakants@genphys.phys.msu.su

Методом спектроскопии фотоотражения исследованы напряженные сверхрешетки GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>, выращенные вдоль направлений [100] и [111]. Из анализа осцилляций Франца–Келдыша, наблюдаемых в спектрах фотоотражения, определены величины встроенных полей в сверхрешетках. Они составили 80 кВ/см для ориентации (100) и 430 кВ/см для ориентации (111). Различие указанных величин объяснено наличием деформационно-индуцированного пьезоэлектрического поля в напряженных сверхрешетках, выращенных вдоль направления [111].

## Введение

Совершенствование технологий изготовления гетерофазных полупроводниковых структур сделало возможным выращивание пленок толщиной в несколько нанометров без образования дислокаций несоответствия. Одним из примеров напряженных гетероструктур (НГС) являются структуры на основе гетеропары GaAs/GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>. Недавние исследования показали [1], что лазеры инфракрасного и красного диапазонов на базе НГС GaAs/GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> имеют лучшие характеристики, чем приборы, изготовленные на основе ненапряженных гетероструктур GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, в частности у лазеров на основе НГС меньше пороговые токи и больше квантовый выход. Одно из объяснений этого явления связывают с большими величинами встроенных электрических полей в НГС. В этой работе методом спектроскопии фотоотражения (ФО) исследованы встроенные поля в напряженных сверхрешетках GaAs/GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> с ориентацией (100) и (111).

## Методика эксперимента

В случае ФО модуляция коэффициента отражения  $R$  осуществляется изменением электрического поля при генерации электронно-дырочных пар лазерным излучением, что дает возможность неразрушающей диагностики и получения данных об особенностях зонной структуры полупроводников. Спектры ФО регистрировались на установке, описанной ранее [2]. Модуляция отражения осуществлялась He-Ne лазером. Частота модуляции составляла 370 Гц. Спектральная ширина щелей монохроматора составляла 1.0 мэВ. Измерения проводились при комнатной температуре.

## Образцы

Образцы выращивались методом газовой фазной эпитаксии на подложках GaAs (100) и (111) соответственно и представляли собой структуры из 40 чередующихся слоев потенциальной ямы GaAs и барьера GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>. Толщина каждого слоя составляла 6 нм. Концентрация фосфора  $x$  в тройном соединении составляла 40%.

## Результаты и обсуждение

Спектры ФО полуизолирующей подложки GaAs (100) и НГС GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> в области фундаментального перехода GaAs приведены на рис. 1. Видно,

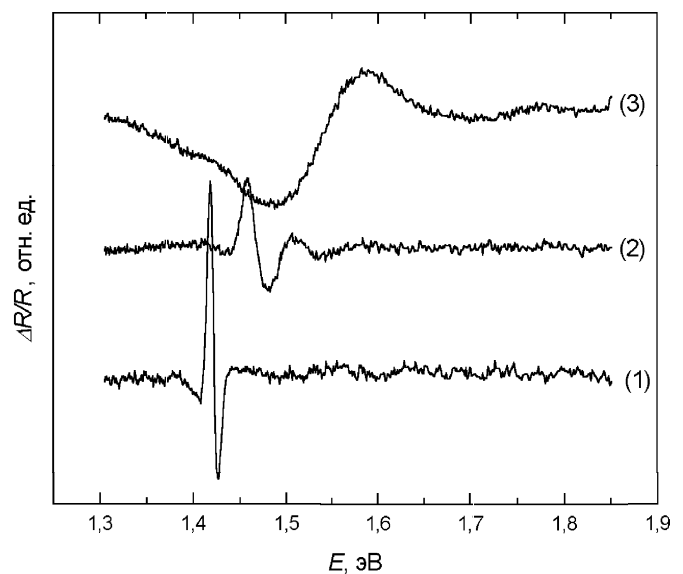


Рис. 1. Спектры ФО подложки GaAs (100) (1) и НГС GaAs/GaAsP (100) (2) и (111) (3) в области фундаментального перехода GaAs

<sup>\*)</sup> НИИ «Сапфир».

что спектральные особенности в НГС, связанные с фундаментальным переходом в GaAs, смещены в область больших энергий. Сдвиг спектральных особенностей в область больших энергий можно объяснить механическими напряжениями, обусловленными различием периодов кристаллических решеток GaAs (0.565 нм) и GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> (0.557 нм). Спектры ФО НГС представляют собой осцилляции Франца–Келдыша (среднеполевая форма линий ФО), период которых определяется величиной встроенного электрического поля [3]. Непосредственный анализ среднеполевых спектров ФО с использованием электрооптических функций Эйри довольно сложен. Мы пользовались простой асимптотикой, предложенной в [3]:

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \cos \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega} \right)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4} \right], \quad (1)$$

где  $\hbar\omega$  — энергия зондирующего излучения,  $E_g$  — энергия фундаментального перехода,  $\hbar\Omega$  — электрооптическая энергия:

$$\hbar\Omega = \left( \frac{e^2 E_s^2 \hbar^2}{8\mu} \right)^{1/3}.$$

Здесь  $\mu$  — приведенная межзонная эффективная масса:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*},$$

$m_e^*$ ,  $m_h^*$  — эффективные массы электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне,  $E_s$  — встроенное поле полупроводника. Если  $\hbar\Omega$  превышает величину феноменологического параметра уширения в модели Аспнеса [3], то спектр ФО представляет собой среднеполевую форму с осцилляциями Франца–Келдыша,  $d$  — размерность критической точки. Для прямых межзонных переходов в GaAs  $d = 3$ . Форма спектральных особенностей (1) представляет собой осцилляции Франца–Келдыша. Позиции экстремумов осцилляций  $(\hbar\omega)_j$  даются выражением

$$(\hbar\omega)_j = \hbar\Omega \cdot (F_j) + E_g, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где

$$F_j = \left[ 3\pi \frac{j-1/2}{2} \right]^{2/3}.$$

На рис. 2 приведено указанное построение для осцилляций Франца–Келдыша НГС с ориентацией (100) и (111). Как видно из рисунка, зависимость  $(\hbar\omega)_j$  от  $F_j$  есть прямая линия. Ее наклон определяется величиной электрооптической энергии  $\hbar\Omega$ , а точка пересечения оси ординат равна энергии перехода  $E_g$ . Считая межзонную эффективную массу  $\mu$  равной  $0.055 m_e$  [3], можно определить величину встроенного поля и энергию фундаментального перехода.

Из анализа осцилляций в рамках модели (2) вычислены величины встроенных электрических

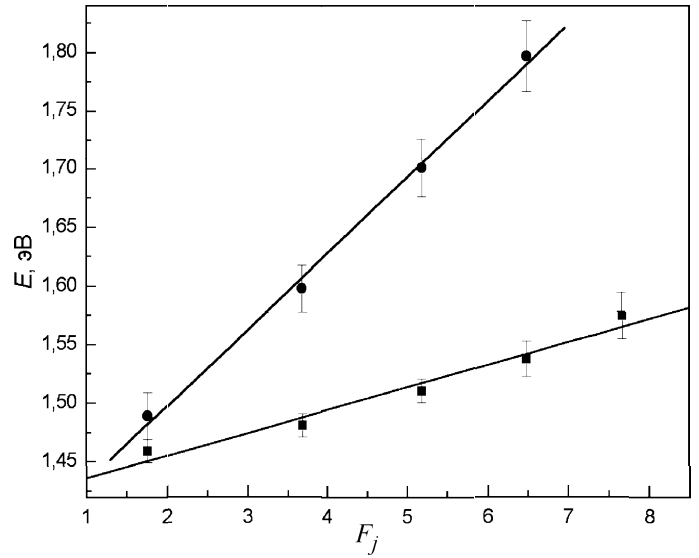


Рис. 2. Анализ спектров ФО НГС GaAsP/GaAs в рамках модели (1)–(2). Квадраты и круги для образцов с ориентацией (100) и (111) соответственно. Линия — результат обработки по методу наименьших квадратов

полей. Они составили  $(80 \pm 10)$  кВ/см для НСР GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> (100) и  $(430 \pm 20)$  кВ/см для НГС GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> (111). Также вычислены энергии наблюдаемых переходов:  $(1.430 \pm 0.05)$  эВ и  $(1.427 \pm 0.08)$  эВ для (100) и (111) НГС соответственно. Для сравнения: величина встроенного поля для полуизолирующей подложки GaAs (100) составляет несколько кВ/см, а энергия фундаментального перехода 1.414 эВ.

Существенное различие встроенных полей для НГС (100) и (111) может быть объяснено следующим образом. На величину встроенного поля в полупроводниковых структурах влияют концентрация носителей, значение поверхностного потенциала и в определенных случаях пьезоэлектрические поля. Последнее существенно в напряженных структурах, выращенных вдоль направления, отличного от [100], так как только не равные нулю недиагональные компоненты тензора напряжений приводят к возникновению деформационных пьезоэлектрических полей [4]. Направление указанных полей зависит от вида механической деформаций (сжатие или растяжение) и от того, на катионной (А) или анионной (В) стороне подложки (111) выращена НГС [4], т.е. в барьере GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> и яме GaAs электрическое поле направлено в противоположные стороны. Схематически зонная структура НГС (100) и (111) изображена на рис. 3, где показан изгиб зон, вызванный областью пространственного заряда для структур с ориентацией (100), и модификация зонной структуры деформационно-индуцированными пьезоэлектрическими полями для напряженных структур с ориентацией (111).

Деформационно-индуцированные компоненты вектора поляризации  $P_i$  определяются как [4]

$$P_i = 2 e_{14} \epsilon_{jk},$$

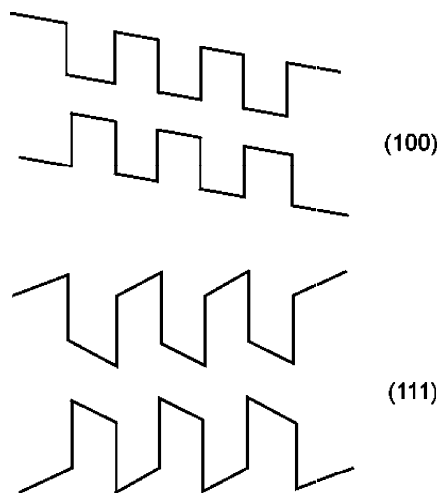


Рис. 3. Зонная структура НГС (100) и (111)

где  $e_{14}$  — пьезоэлектрическая константа (для GaAs  $e_{14} = -0.16$  Кл/м<sup>2</sup> [4]),  $\epsilon_{jk}$  — недиагональные компоненты тензора напряжений, определяемые рас-  
согласованием периодов кристаллических решеток:

$$\epsilon_{jk} = -\frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}} \frac{a_1 - a_2}{a_1},$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  — периоды кристаллических решеток GaAs и GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> соответственно,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  — упругие константы [5]. В случае (111) ориентированных НГС и диагональные компоненты тензора напряжений, и недиагональные, равны:

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = \epsilon_{-}, \quad \epsilon_{xy} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{||}.$$

Деформационно-индуцированное электрическое поле определяется из соотношения:

$$E_i = -\frac{2e_{14}\epsilon_{jk}}{\epsilon_0\epsilon},$$

где  $\epsilon$  — статическая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon = 12.8$  для GaAs),  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Для слоев GaAs НГС GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> (111)  $E_i = 170$  кВ/см и общее поле, направленное вдоль оси [111]:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

равно 295 кВ/см. В силу различия пьезоэлектрической константы  $e_{14}$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и упругих констант  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  в слоях GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> величины  $E_i$  и  $E$  составляют 120 кВ/см и 210 кВ/см соответственно.

Таким образом, приведенный расчет показывает, что в НГС GaAs/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>, выращенных вдоль направления [111], основной вклад во встроенное поле дают деформационно-индуцированные пьезоэлектрические поля. Спектроскопия ФО позволяет проводить оценки встроенных электрических полей в НГС.

**Литература**

1. Кузьменко Р.В., Ганжа А.В., Бочурова О.В. и др. // ФТП. 1999. **41**, № 4. С. 725.
2. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 4. С. 48. (Moscow University Phys. Bull. 2002. N 4. P. 48).
3. Hughes P.J., Weiss B.L., Hosea T.J.S // J. Appl. Phys. 1995. **77**, N 12. P. 6472.
4. Mailhot C., Smith D.L. // Phys. Rev. B. 1987. **35**, N 3. P. 1242.
5. Zhang X., Ishikawa M., Yaguchi H. // Surf. Sci. 1997. **387**. P. 371.

Поступила в редакцию  
26.06.03