

06;07

## Определение концентрации свободных носителей заряда в сверхчистых эпитаксиальных слоях GaAs методом фотоотражения

© О.С. Комков, А.Н. Пихтин, Ю.В. Жилиев, Л.М. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: ANPikhtin@mail.eltech.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2007 г.

Предложен и реализован метод диагностики высококачественных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs, полученных методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе. При уменьшении концентрации свободных носителей заряда от  $10^{15}$  до  $10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$  и повышении качества эпитаксиальных слоев в спектрах фотоотражения GaAs наблюдался переход от традиционных осцилляций Франца–Келдыша, усиленных экситонными эффектами, к слабой осциллирующей структуре в области энергий экситонных переходов. Показано, что периоды этих осцилляций близки.

PACS: 71.55.Eq, 78.20.Jq, 78.30.Fs, 78.66.Fd, 78.68.+m.

Успехи современной технологии позволяют выращивать эпитаксиальные слои арсенида галлия высокой степени совершенства. Такие слои необходимы, в частности, для создания детекторов  $\alpha$ -частиц и рентгеновского излучения. Хорошо известен факт: чем совершеннее и чище материал, тем сложнее осуществить его диагностику. Определение концентрации свободных носителей заряда ( $n$ ) как важнейшего электрофизического параметра полупроводника в этом случае наталкивается на ряд принципиальных трудностей. Использование традиционных методов исследования, таких как измерение эффекта Холла или вольт-фарадные измерения, в большинстве случаев не дает адекватных результатов уже при  $n$  ниже  $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ . Кроме того, при исследовании упомянутыми методами эпитаксиальных слоев,

выращенных на  $n^+$ -подложке, сильнолегированная подложка оказывает шунтирующее действие и делает измерение  $n$  невозможным.

Развитый в последнее время метод диагностики чистых слоев GaAs по спектрам низкотемпературной фотолюминесценции [1] весьма трудоемок, требует охлаждения образцов до  $T = 2$  К и, как все люминесцентные методы, слишком чувствителен к так называемым „третьим“ компонентам (наличие остаточных акцепторов в материале  $n$ -типа, неконтролируемых безызлучательных центров, глубоких ловушек и т.п.).

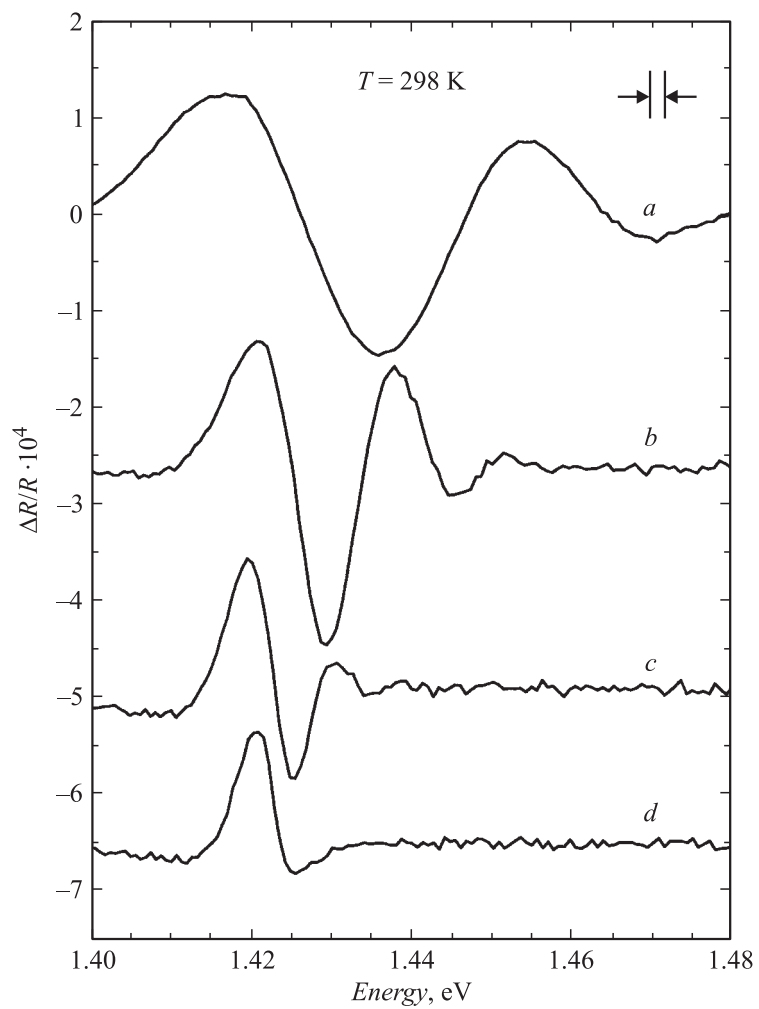
Предпринятые ранее попытки использования метода фотоотражения (ФО) для диагностики арсенида галлия ограничивались диапазоном концентраций  $n$  от  $10^{14}$  до  $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$  [2–4].

В настоящей работе приведены результаты исследований эпитаксиальных слоев GaAs электронного типа с концентрацией свободных носителей заряда от  $10^{11}$  до  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ , полученных методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе. Толщина слоев варьировалась от 20 до 240  $\mu\text{m}$ . На некоторых образцах с  $n > 10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ , специально выращенных на полуизолирующей подложке GaAs, были проведены контрольные измерения традиционным методом Холла при  $T = 77$  К. Кроме этого, оценка качества всех эпитаксиальных слоев арсенида галлия проводилась по спектрам низкотемпературной экситонной фотолюминесценции [1].

Методика измерения фотоотражения была аналогична описанной в [4]. Спектр ФО представляет собой зависимость отношения изменения коэффициента отражения  $\Delta R$  под действием модулирующего лазерного излучения к коэффициенту отражения  $R$  от энергии фотонов  $E$  зондового пучка света. Типичные спектры для эпитаксиальных слоев GaAs с различным уровнем легирования и различной степенью чистоты приведены на рис. 1. Для образцов с концентрацией  $n > 10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$  отчетливо наблюдаются характерные осцилляции Франца–Келдыша (ОФК), период которых уменьшается с уменьшением  $n$ . Осциллирующая составляющая спектров ФО описывается выражением [5]

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

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны GaAs,  $\varphi$  — фаза, а характеристическая электрооптическая энергия  $\hbar\Omega$  связана с напряженностью



**Рис. 1.** Спектры фотоотражения эпитаксиальных слоев GaAs с концентрацией свободных носителей заряда  $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (a),  $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (b),  $9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  (c) и  $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  (d), измеренные при комнатной температуре.

электрического поля  $F$  как

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

Приведенная эффективная масса  $\mu$  соответствует переходам с участием тяжелой дырки.

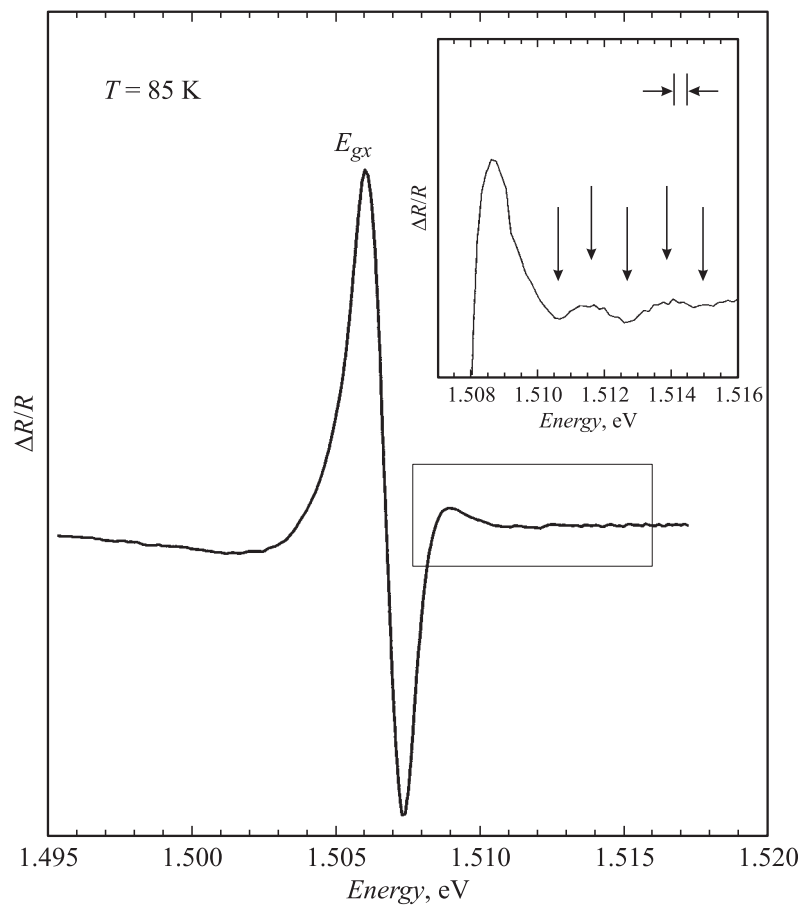
Согласно (1), в спектре ФО экстремумы с номером  $j = 0, 1, 2, \dots$  наблюдаются при выполнении условия

$$[E_j - E_g]^{3/2} = \frac{3}{2} (\hbar\Omega)^{3/2} (j\pi - \varphi). \quad (3)$$

Используя стандартную процедуру [6], по периоду осцилляций можно найти электрооптическую энергию (2) и, следовательно, напряженность электрического поля вблизи поверхности образца или интерфейса, от которого происходит отражение зондового светового луча.

Как видно из рис. 1, в чистых образцах превалирует сильный экситонный пик и сигнал ФО определяется не ОФК, а экситонным эффектом Штарка. Спектр фотоотражения, измеренный при низкой температуре (рис. 2), подтверждает это утверждение. Именно отсутствие осцилляций не позволяло ранее использовать метод ФО для диагностики высококачественных слоев GaAs.

Соотношения (1)–(3) не учитывают экситонные эффекты и получены в рамках так называемой среднеполевой модели Аспнеса [5], а потому, казалось бы, не применимы для анализа данных ФО от чистых слоев GaAs. Учет экситонных эффектов значительно усложняет процедуру определения напряженности электрического поля  $F$ . Однако выполненные по [7,8] расчеты дали неожиданные результаты: учет электронно-дырочного взаимодействия существенно увеличивает амплитуду основной осцилляции и, в меньшей степени, амплитуды коротковолновых осцилляций, а также сдвигает фазу. Период экситонных осцилляций в широком диапазоне изменения полей был очень близок к периоду ОФК, определяемому выражением (1). Это позволяет предположить, что, по крайней мере, вблизи  $E_g$  экситонные эффекты усиливают амплитуды „классических“ ОФК, что дает возможность по наклону зависимости  $[E_j - E_g]^{3/2}$  от номера экстремума  $j$  определить электрооптическую энергию (2) и усредненную по области формирования сигнала ФО



**Рис. 2.** Спектр фотоотражения сверхчистого эпитаксиального слоя GaAs с  $n \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 85 \text{ K}$ . На вставке приведена коротковолновая часть спектра ФО того же образца. Стрелками показаны энергии характерных экстремумов  $E_j$ .

напряженность электрического поля  $F$ . Для слаболегированных образцов эта величина совпадает с приповерхностной напряженностью электрического поля, вызванной пиннингом уровня Ферми.

Искомая концентрация свободных носителей заряда вычислялась из решения уравнения Пуассона, куда подставлялись определенная выше напряженность поля  $F$  и величина пиннинга уровня Ферми ( $0.73 \pm 0.02$  eV ниже дна зоны проводимости) на (100)-поверхности GaAs [9]. Контрольные измерения, проведенные на легированных до  $n = 2 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  образцах, показали, что полученные по предлагаемому методу данные с точностью 20% совпадали с данными измерений эффекта Холла.

Определенные методом ФО концентрации сравнивались также с независимыми данными, полученными для этих же образцов методом экстраполяции измерений эффекта Холла по спектрам низкотемпературной фотолюминесценции [1]. В области концентраций  $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  результаты практически совпадали, в то время как для более низких  $n$  метод, основанный на измерении спектров фотолюминесценции, давал завышенные по сравнению с ФО данные.

Для сверхчистых нелегированных эпитаксиальных слоев GaAs прецизионные измерения спектров ФО при  $T = 85$  K позволили выявить теоретически предсказанную осциллирующую структуру в области энергий больше экситонной ширины запрещенной зоны  $E_{gx}$ . Это проиллюстрировано на вставке рис. 2. Здесь наблюдается пять осцилляций, положение которых указано стрелками. Они хорошо описывались соотношением (3), что позволило уверенно определить величину встроенного электрического поля  $F = 0.68$  kV/cm и концентрацию свободных носителей заряда  $n \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  в приведенном образце. Для самого чистого из исследованных эпитаксиальных слоев GaAs наблюдалось девять осцилляций, а их период соответствовал  $F = 0.16$  kV/cm и  $n \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

Таким образом, предложенный метод позволяет диагностировать высококачественные эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs и определять концентрацию свободных носителей заряда от  $10^{11}$  до  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

Авторы выражают благодарность Т.А. Орловой и Ш.А. Юсуповой за подготовку образцов, а также Г.Ф. Глинскому и Н.К. Полетаеву за полезную дискуссию.

Работа была выполнена при финансовой поддержке целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы Российской Федерации“ (проект РНП-2.1.2.1716) и INTAS Project 04-78-7193.

## Список литературы

- [1] Zhilyaev Yu.V., Poletaev N.K., Botnaryuk V.M., Orlova T.A., Fedorov L.M., Yusupova Sh.A., Owens A., Bavdaz M., Peacock A., O'Meara B., Helava H. // Phys. stat. sol. (c). 2003. V. 0. N 3. P. 1024–1027.
- [2] Peters L., Phaneuf L., Kapitan L.W., Theis W.M. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 11. P. 4558–4562.
- [3] Sydor M., Angelo J., Mitchel W., Haas T.W., Yen M.-Y. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 1. P. 156–160.
- [4] Пухтин А.Н., Тодоров М.Т. // ФТП. 1993. Т. 27. № 7. С. 1139–1145.
- [5] Aspnes D.E., Studna A.A. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 10. P. 4605–4625.
- [6] Пухтин А.Н., Комков О.С., Базаров К.В. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 5. С. 608–613.
- [7] Dow J.D., Lao B.Y., Newman S.A. // Phys. Rev. B. 1971. V. 3. N 8. P. 2571–2581.
- [8] Глинский Г.Ф. // Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГЭТУ, 1995.
- [9] Yin X., Chen H.-M., Pollak F.H., Chan Y., Montano P.A., Kirchner P.D., Pettit G.D., Woodall J.M. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 3. P. 260–262.