

## Комбинированная методика исследования многокомпонентных спектров фотоотражения полупроводников

© Р.В. Кузьменко<sup>¶</sup>, А.В. Ганжа, Э.П. Домашевская

Воронежский государственный университет,  
394693 Воронеж, Россия

(Получена 26 апреля 2001 г. Принята к печати 11 мая 2001 г.)

Предлагается новая методика комбинированного исследования многокомпонентных спектров фотоотражения полупроводников, включающая в себя измерение спектров при изменении плотности и длины волны лазерного возбуждения в комбинации с фазовым анализом спектра. Эффективность методики показана на примере анализа многокомпонентного спектра фотоотражения пассивированного гомоэпитаксиального образца  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$ .

Фотоотражение (ФО) — широко используемый модуляционно-оптический метод исследования электронных свойств полупроводников. Широкое применение метода обусловлено, с одной стороны, экспериментальной простотой реализации, а с другой стороны, разнообразием информации, получаемой при измерении спектра. Однако информация, содержащаяся в спектрах ФО может быть проинтерпретирована только путем проведения количественного анализа, заключающегося в модельном воспроизведении (подгонке) всей измеренной спектральной линии.

В работах [1–4] было показано, что спектры ФО кристаллических образцов GaAs, измеряемые при комнатной температуре в области фундаментального перехода  $E_0$ , как правило, многокомпонентны. Причиной многокомпонентности является, с одной стороны, присутствие в области перехода  $E_0$  набора близко лежащих электронно-оптических переходов различной природы, а с другой стороны, многообразие процессов, протекающих в образце при фотогенерации больших концентраций неравновесных носителей заряда. При измерении спектров ФО гомоэпитаксиальных или гетероэпитаксиальных структур ситуация дополнительно усложняется тем, что при определенных условиях спектр может содержать также вклады от границ раздела, находящихся на глубинах до 5–10 мкм. Таким образом, необходимыми условиями высокоточного количественного анализа многокомпонентных спектров ФО является экспериментальное определение числа спектральных компонент, энергетической области их измерения, типа электронно-оптических переходов и природы модуляционного механизма, ответственного за возникновение компоненты.

Одним из наиболее эффективных методов анализа многокомпонентных спектров ФО является фазовый анализ (ФА) [4,5]. В его рамках в случае различных характеристических временных постоянных компонент, представляющих собой в первом приближении время запаздывания модулированного сигнала отражения по отношению к сигналу возбуждения, многокомпонентность спектра ФО может быть установлена при помощи

построения фазовой диаграммы. Если для компонент спектра имеются спектральные области однокомпонентности, то построение фазовой диаграммы в этой спектральной области дает прямую линию, что позволяет из угла наклона этой линии легко определить значение характеристической временной постоянной компоненты. Путем сравнения получаемых в рамках ФА значений характеристических временных постоянных компонент в некоторых случаях могут быть сделаны предположения о природе модуляционного механизма или пространственном расположении областей возникновения компонент. Более того, в случае двухкомпонентного спектра ФО одна из компонент спектра может быть подавлена в  $x$ - или в  $y$ -составляющей спектра при помощи предустановки фазы фазочувствительного усилителя, что позволяет получить спектральную линию остающейся компоненты в неискаженном виде. Однако ФА не позволяет провести разделение спектрально перекрывающихся компонент в случае близких или одинаковых значений их временных постоянных. Неэффективно применение ФА и в случае, если в какой-то спектральной области происходит наложение трех и более спектральных компонент. Таким образом, выше сформулированная задача анализа многокомпонентного спектра в общем случае не может быть решена только в рамках ФА.

В качестве второй возможности анализа многокомпонентного спектра ФО, имеющейся в распоряжении экспериментатора, является изменение длины волны лазерного возбуждения. Модуляция сигнала отражения, связанная с генерацией неравновесных носителей заряда при лазерном освещении, может быть вызвана двумя механизмами: 1) прямой генерацией неравновесных носителей заряда в области возникновения сигнала ФО; 2) диффузией или дрейфом генерированных неравновесных неосновных носителей заряда к области возникновения сигнала. Если компонента спектра возникает в области лежащей в глубине образца границы раздела, то путем уменьшения длины волны лазерного возбуждения можно вначале исключить первый механизм модуляции, а затем, при дальнейшем уменьшении длины волны, может быть достигнута ситуация, когда основная

<sup>¶</sup> E-mail: roman@ftt.vsu.ru

генерация неравновесных носителей заряда происходит в области пространственного заряда вблизи поверхности образца. Благодаря этому только незначительное число неравновесных неосновных носителей заряда достигнет границы раздела, и сигнал ФО, возникающий в ее области, будет либо ослаблен, либо полностью подавлен. Наоборот, использование коротковолнового лазера должно привести к усилению в спектре компонент, возникающих в приповерхностной области. Таким образом, изменение длины волны лазерного возбуждения является одной из наиболее надежных методик определения пространственной области происхождения модуляционных компонент.

Интересная возможность открывается и при использовании одного из лазеров для постоянной подсветки образца. Например, использование коротковолнового лазерного излучения для постоянной подсветки при одновременно включенном модулирующем длинноволновом излучении должно привести к ослаблению спектрального вклада из приповерхностной области образца [6,7].

В качестве третьей методики анализа многокомпонентных спектров ФО выступает измерение серии спектров с различными значениями плотности лазерного возбуждения (ПЛВ) [8]. Поскольку ПЛВ определяет количество генерируемых неравновесных носителей заряда, а компоненты многокомпонентного спектра ФО возникают в области различных электронно-оптических переходов или в различных пространственных областях исследуемого образца, естественно предположить, что изменение ПЛВ в одном и том же диапазоне значений должно вызвать различное изменение параметров соответствующего модуляционного процесса и, следовательно, величины спектрального вклада различных фотоотражательных компонент [9–11]. Это означает, что, проводя измерение серии спектров с различными значениями ПЛВ и наблюдая за поведением спектральной линии, можно в большинстве случаев сделать вывод об энергетической области измерения компонент и модуляционном механизме, ответственном за их появление.

Таким образом, объединив ФА с проведением серии измерений спектров ФО при различных значениях длины волны и плотности лазерного возбуждения в рамках одного эксперимента, можно не только определить число спектральных компонент и энергетические области их измерения, но и сделать выводы о природе модуляционных механизмов, что способствует выбору адекватной модели для описания их спектральной формы и тем самым существенно повышает достоверность многокомпонентного количественного анализа спектров ФО.

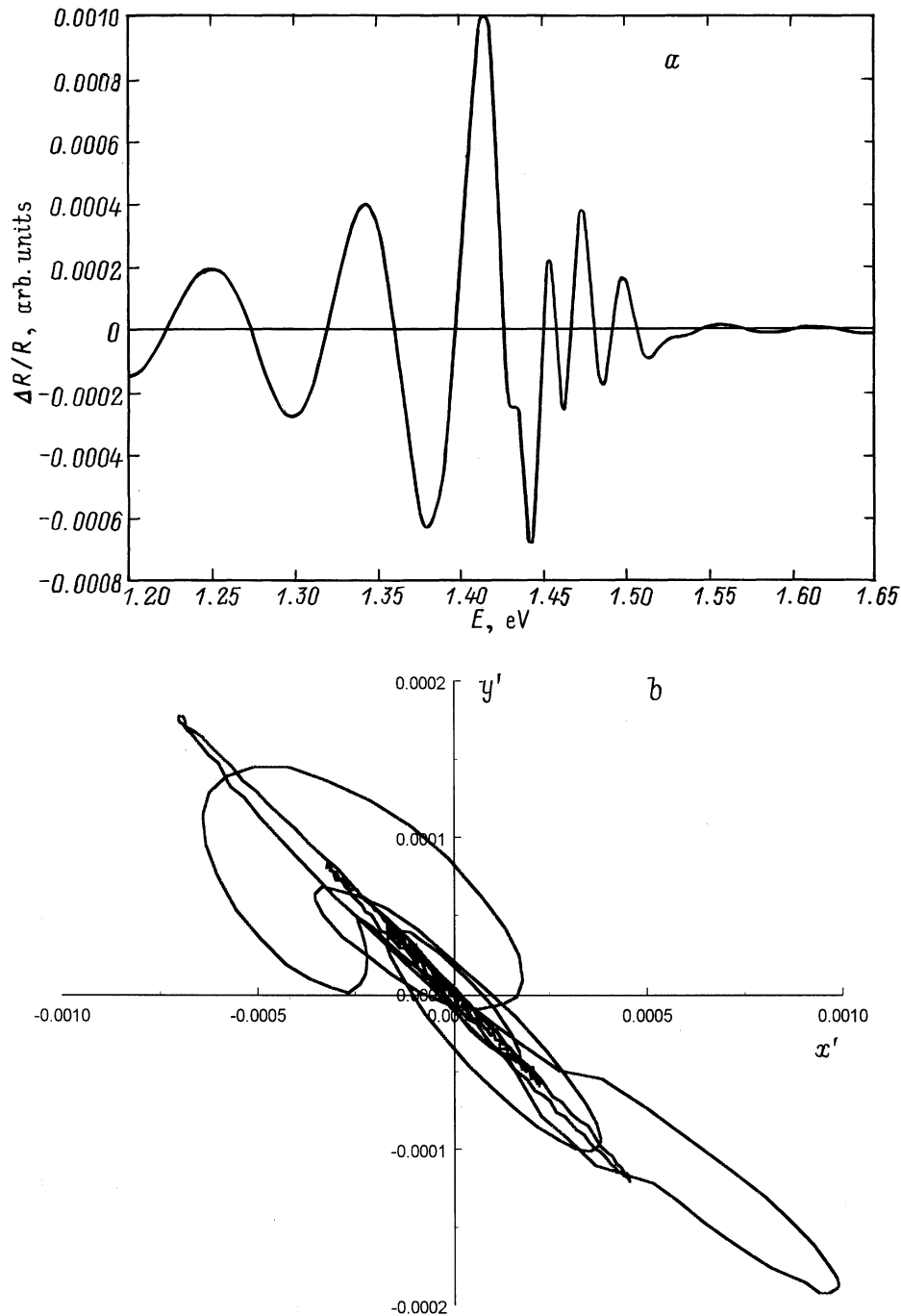
Эффективность предлагаемой методики комбинированного анализа спектров ФО будет показана на примере  $E_0$ -спектра ФО образца  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  (100) (концентрации электронов в эпитаксиальном слое и подложке GaAs соответственно  $n = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $n^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_0(\text{GaAs}) = 1.424 \text{ эВ}$ ). Гомоэпитаксиальный образец был изготовлен методом молекулярно-лучевой эпитаксии и подвергнут операции плазмо-

химического нанесения слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Толщина эпитаксиального слоя GaAs, указанная изготовителем (Институт физики твердого тела, Технический университет, г. Берлин, Германия), составляет 1 мкм, толщина слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4 \sim 100 \text{ нм}$ . Измерения проводились при комнатной температуре на установке, устройство и способ действия которой описаны в [11]. Для проведения фазового анализа спектров использовался двухканальный фазочувствительный усилитель SR850. Значения ПЛВ лежали в диапазоне  $L = 0.1\text{--}1 \text{ Вт/см}^2$ . Частота модуляции варьировалась в пределах 50–500 Гц.

На рис. 1, *a, b* представлен экспериментальный спектр фотоотражения  $\Delta R/R = f(E)$ , измеренный при модуляции красным He–Ne-лазером (длина волны излучения  $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ , глубина поглощения  $1/\alpha = 250 \text{ нм}$  для GaAs) с  $L = 1 \text{ Вт/см}^2$  и его фазовая  $x'y'$ -диаграмма (см. [5]). Как видно из рис. 1, *a*, спектр ФО обладает весьма сложной структурой. В низкоэнергетической области спектра наблюдаются так называемые низкоэнергетические осцилляции. В [12] было показано, что эти осцилляции представляют собой вклад в спектр уширенной электромодуляционной  $E_0$ -компоненты, возникающей в области границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  на стороне высоколегированной подложки. При эпитаксиальном росте пленок  $n\text{-GaAs}$  на  $n$ -подложке происходит захват (пиннинг) уровня Ферми на состоянии ловушек в области границы раздела. Для положения уровня Ферми в литературе приводятся значения  $\sim 0.5 \text{ эВ}$  ниже края зоны проводимости [7]. Исходя из этого значения можно сделать вывод, что для исследованного образца электрическое поле в области границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  будет захватывать неосновные носители заряда. Таким образом, присутствие в спектре компонент, возникающих в области границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$ , не является неожиданным.

В высокоэнергетической области спектра наблюдаются осцилляции Франца–Келдыша, что указывает на наличие в спектре среднеполевой электромодуляционной  $E_0$ -компоненты, возникающей в области пространственного заряда эпитаксиальной пленки GaAs у границы раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$ . Однако нарушение плавного хода осцилляций Франца–Келдыша позволяет предположить, что в этой энергетической области присутствует еще одна компонента. Фазовая диаграмма (рис. 1, *b*) также однозначно подтверждает многокомпонентность данного спектра (наблюдение петлевых структур), но не дает возможности сделать вывод о количестве компонент.

В качестве следующего шага нами была предпринята попытка подавления компонент, возникающих в области границы раздела, с помощью использования голубого He–Cd-лазера (длина волны излучения  $\lambda = 442.5 \text{ нм}$ , глубина поглощения  $1/\alpha = 30 \text{ нм}$  для GaAs). Результаты измерений с двумя значениями плотности лазерного возбуждения представлены на рис. 1, *c, d*. Как можно видеть из рисунка, низкоэнергетические осцилляции в спектре полностью подавлены. Это указывает на отсутствие в спектре вкладов из области границы раздела.



**Рис. 1.** Спектры фотоотражения (*a, c*) и фазовые диаграммы (*b, d*) для структуры  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaAs}/\text{GaAs}$ . *a, b* — модуляция He–Ne-лазером,  $L = 1 \text{ Вт/см}^2$ . *c, d* — модуляция He–Cd-лазером,  $L = 0.2 \text{ Вт/см}^2$  (сплошная линия) и  $L = 0.5 \text{ Вт/см}^2$  (пунктирная линия).

Неожиданным результатом является резкое упрощение структуры спектра ФО и в области осцилляций Франца–Келдыша. Это означает, что изменение плавного хода осцилляций Франца–Келдыша в этой области, наблюдаемое при измерении спектра с красным лазером, вызывается наложением компоненты, возникающей в области гомозитаксиальной границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$ . Фазовая диаграмма спектра (рис. 1, *d*) продолжает сохра-

нять сложный характер, указывающий на его многокомпонентность. Тем не менее наблюдаемое при изменении плотности возбуждения изменение спектральной структуры в области главного пика (наблюдение ”плечевой” структуры) позволяет идентифицировать присутствие в спектре экситонной компоненты, за возникновение которой ответственна электромодуляция (см. подробнее [4,11,13]). Проведение двухкомпонентного модели-

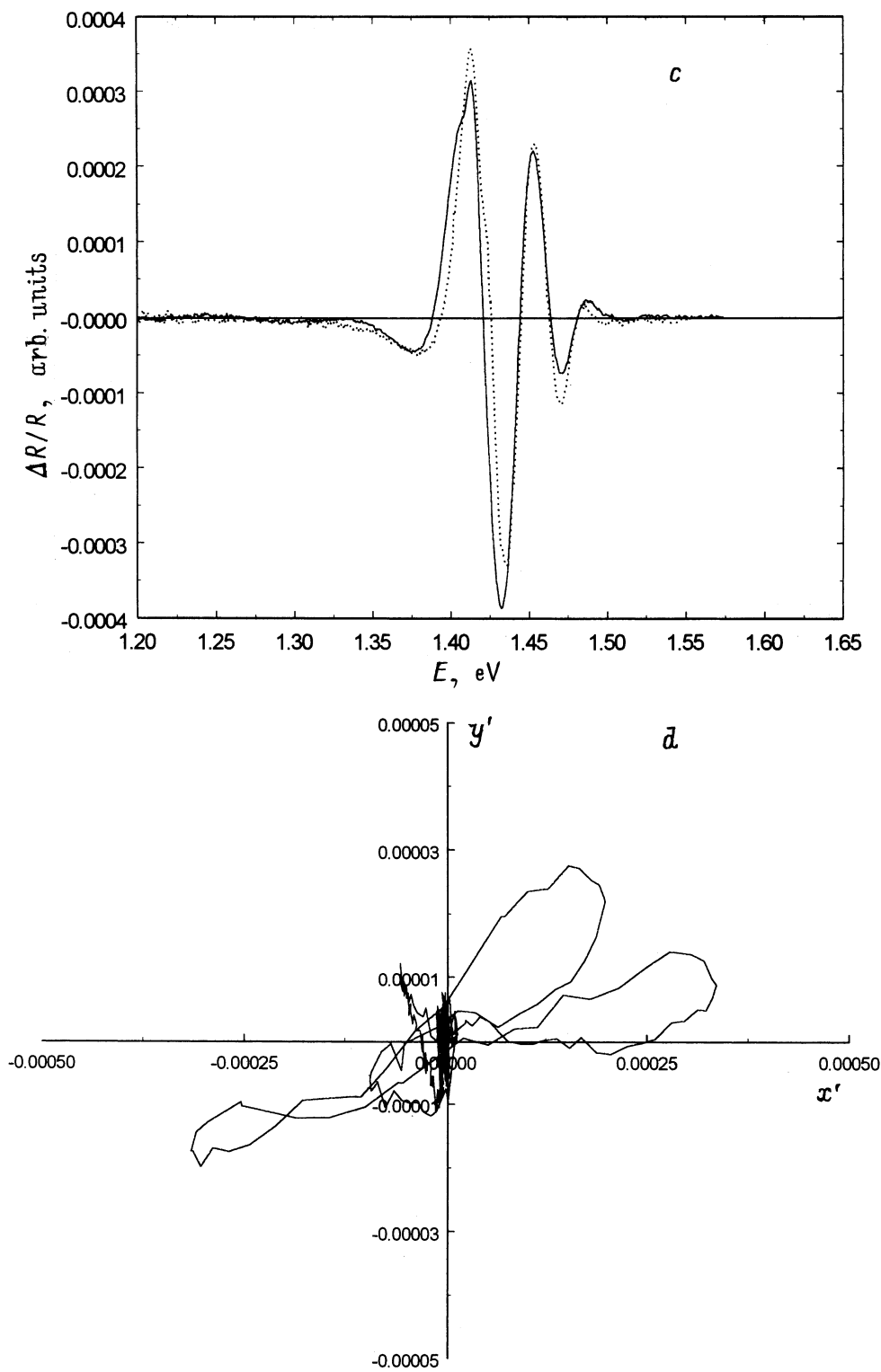
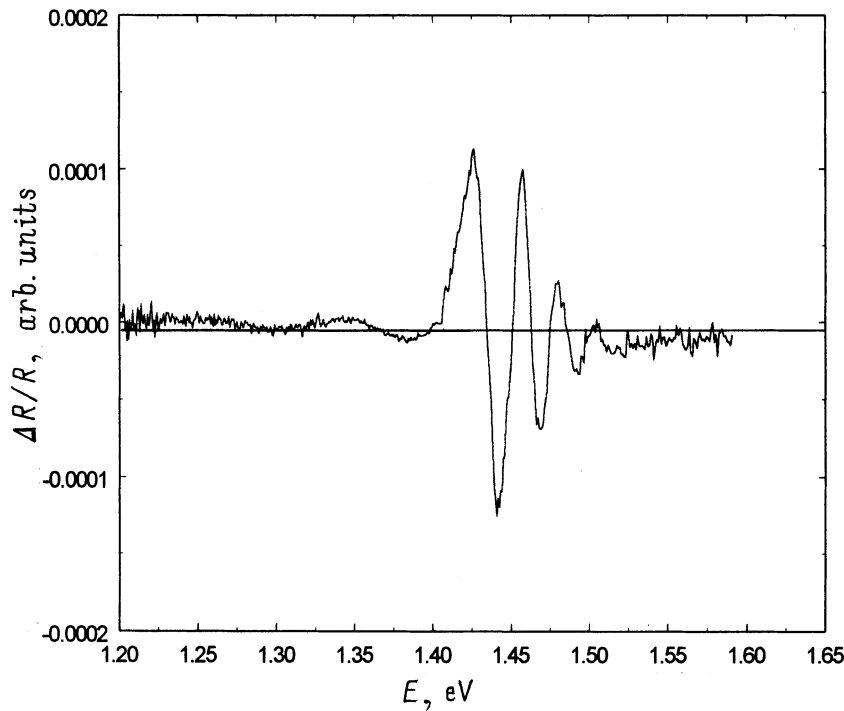


Рис. 1 (продолжение).

рования действительно подтверждает, что измеряемый спектр состоит в этом случае из двух компонент — среднеполевой электромуляционной компоненты и экситонной компоненты. Таким образом, при применении голубого лазера были идентифицированы компоненты

спектра ФО, возникающие в приповерхностной области образца.

Для дальнейшей идентификации были проведены измерения с использованием модулирующего красного He-Ne-лазера при постоянной подсветке голубым

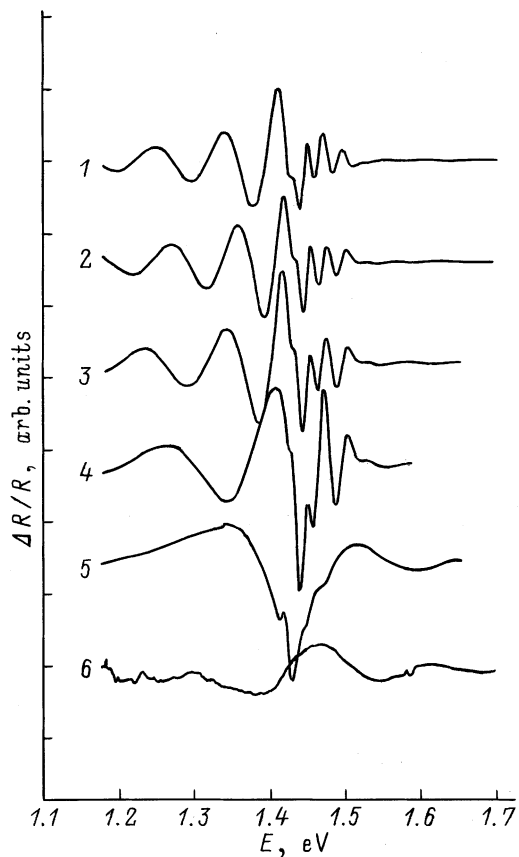


**Рис. 2.** Спектр фотоотражения структуры  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaAs}/\text{GaAs}$  при модуляции He–Ne-лазером с постоянной подсветкой He–Cd-лазером.

He–Cd-лазером. Постоянная подсветка позволяет уменьшить значение напряженности электрического поля в области границы раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$  или даже полностью подавить его, что приводит к ослаблению или исчезновению спектральных компонент из этой области образца. Результаты измерения представлены на рис. 2. Данный спектр ФО был интерпретирован как двухкомпонентный спектр, возникающий в области границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  и содержащий среднеполевую электромультипликационную компоненту и уширенную электромультипликационную компоненту, приводящую в результате интерференции в пленке к наблюдению низкоэнергетических осцилляций. Действительно, поскольку среднеполевая электромультипликационная компонента имеет много осцилляций Франца–Келдыша, то очевидно, что ее энергетическое уширение должно быть мало [14]. Следовательно, эта компонента не может быть причиной возникновения низкоэнергетических осцилляций. Эта компонента не может возникнуть в области пространственного заряда подложки, поскольку высоколегированная подложка дает спектры с большим значением энергии уширения  $\Gamma$ . Следовательно, эта компонента возникает в области гомоэпитаксиальной границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  в области пространственного заряда эпитаксиального слоя. С другой стороны, причиной возникновения низкоэнергетических осцилляций может быть только структура с большим значением энергии уширения. Такая структура может возникнуть только в области подложки.

Таким образом, граница раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  дает два спектральных вклада в результирующий спектр. Фазовая диаграмма измеренного спектра ФО представляет собой в пределах экспериментальной ошибки прямую линию, что указывает на одинаковые характеристические временные постоянные электромультипликационных процессов, протекающих по обе стороны границы раздела.

Очевидно, что наблюдаемая форма линии среднеполевой электромультипликационной компоненты, возникающей в области скрытой в глубине образца границы раздела, может искажаться за счет интерференционных эффектов в эпитаксиальной пленке. Однако энергетическое положение осцилляций Франца–Келдыша не должно быть сильно искажено за счет процессов интерференции. Благодаря этому можно было приблизительно определить основные параметры среднеполевой компоненты [14]. Оценка напряженности электрического поля для границ раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$  и  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  дает примерно одинаковые значения  $F_s = 4.23 \cdot 10^6$  В/м и  $F_i = 3.87 \cdot 10^6$  В/м. Однако среднеполевая компонента, возникающая в области границы раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$ , смещена в низкоэнергетическую область (оценки энергии перехода  $E_0$  для компонент — 1.415 и 1.424 эВ) и обладает значительно большей энергией уширения ( $\Gamma_s = 16.5$  мэВ и  $\Gamma_i = 4.5$  мэВ). Меньшая энергия уширения в области скрытой в глубине образца границы раздела может быть объяснена лучшими структурными характеристиками границы раздела по сравнению с приповерхностной областью  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$ . Причина энер-



**Рис. 3.** Спектры фотоотражения структуры  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaAs}/\text{GaAs}$  при послойном травлении образца.

гетического сдвига компоненты из приповерхностной области  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$  будет выяснена далее.

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать вывод, что измеряемая на образце спектральная структура (см. рис. 1, *a*) представляет собой наложение 4 компонент: двух среднеполевых электромультипликационных компонент, возникающих в эпитаксиальной пленке в области пространственного заряда у границ раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}$  и  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$ , экситонной компоненты, возникающей в приповерхностной области гомоэпитаксиальной пленки, и электромультипликационной компоненты, возникающей в области гомоэпитаксиальной границы раздела  $n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  в области пространственного заряда высоколегированной подложки.

Для проверки полученных результатов было предпринято измерение спектров с красным He-Ne-лазером при послойном травлении образца (шаг травления 200 нм). Результаты измерений приведены на рис. 3. Спектр 1 был измерен перед травлением. Энергетический сдвиг спектра ФО (спектр 2) в сторону больших энергий после удаления слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  объясняется исчезновением механического напряжения, существовавшего в области гетероэпитаксиальной границы раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaAs}$ . Рост периода низкоэнергетических осцилляций (спектры 2–4) указывает на уменьшающуюся толщину гомоэпитакси-

ального слоя GaAs. В дальнейшем процесс травления приводит к исчезновению низкоэнергетических осцилляций, а затем к исчезновению среднеполевой и экситонной компонент из приповерхностной области. Одновременно в спектре усиливается вклад уширенной спектральной структуры, возникающей в области пространственного заряда подложки (спектры 4–6). Дальнейшее травление образца не приводит к изменению спектра. Спектр 6, фазовая диаграмма которого имела однокомпонентный характер, был идентифицирован как уширенная среднеполевая электромультипликационная  $E_0$ -компонента. Количественный анализ дает для нее чрезвычайно высокие значения напряженности электрического поля ( $F > 10^7$  В/м) и энергии уширения ( $\Gamma > 50$  мэВ). Кроме того, эта компонента обладает широким низкоэнергетическим "хвостом", существование которого необходимо для возникновения низкоэнергетических осцилляций.

Обнаруженная уширенная электромультипликационная компонента вносит, конечно, некоторый вклад и в высокоэнергетическую область результирующего спектра исходного гомоэпитаксиального образца, однако из-за малости этого вклада им при анализе можно пренебречь.

Таким образом, подтверждается, что причиной возникновения низкоэнергетических осцилляций является модуляция области пространственного заряда подложки, а наблюдаемых в спектре двух среднеполевых компонент — модуляция областей пространственного заряда эпитаксиального слоя. Тем не менее мы видим, что травление не дало никакой новой информации и смогло только частично подтвердить данные, полученные в рамках комбинированных исследований.

Итак, нами предлагается комбинированная методика анализа многокомпонентных спектров ФО, включающая измерение спектров при изменении плотности и длины волны лазерного возбуждения в сочетании с фазовым анализом спектра. В рамках этой методики может быть проведено определение числа спектральных компонент, энергетической области их измерения, пространственной области их возникновения в образце, типа электронно-оптических переходов и природы модуляционного механизма, ответственного за возникновение компоненты. Эффективность методики показана на примере анализа многокомпонентного спектра ФО гомоэпитаксиального образца GaAs.

## Список литературы

- [1] J.M.A. Gilman, A. Hamnett, R.A. Batchelor. *Phys. Rev. B*, **46**, 13 363 (1992).
- [2] O.J. Glembocki, N. Bottka, J.E. Furneaux. *J. Appl. Phys.*, **57** (2), 432 (1985).
- [3] E.G. Seebauer. *J. Appl. Phys.*, **66**, 4963 (1989).
- [4] Р. Кузьменко, А. Ганжа, Й. Шрайбер, С. Хильдебрандт. *ФТТ*, **39**, 2123 (1997).
- [5] А.В. Гаржа, В. Кирхер, Р.В. Кузьменко, Й. Шрайбер, С. Хильдебрандт. *ФТП*, **32**, 272 (1998).

- [6] M. Sydor, A. Badakhshan, J.R. Engholm, D.A. Dale. Appl. Phys. Lett., **58**, 948 (1991).
- [7] Y. Mochizuki, T. Ishii, M. Mizuta. Japan. J. Appl. Phys., pt 1, **34**, 6106 (1995).
- [8] R.E. Nahory, J.L. Shay. Phys. Rev. Lett., **21**, 1569 (1968).
- [9] R. Ditchfield, D. Llera-Rodriguez, E.G. Seebauer. Phys. Rev. B, **61**, 13 710 (2000).
- [10] E.R. Wagner, A. Manselis. Phys. Rev. B, **50**, 14 228 (1994).
- [11] S. Hildebrandt, M. Murtagh, R. Kusmenko, W. Kircher, G.M. Crean, J. Schreiber. Phys. St. Sol. (a), **152**, 147 (1995).
- [12] Р.В. Кузьменко, А.В. Ганжа, Э.П. Домашевская. Опт. и спектр., **89**, 601 (2000).
- [13] Р.В. Кузьменко, А.В. Ганжа, О.В. Бочурова, Э.П. Домашевская, Й. Шрайбер, С. Хильдебрандт, Ш. Мо, Э. Пайнер, А. Шлахетцкий. ФТП, **34**, 73 (2000).
- [14] Р. Кузьменко, А. Ганжа, Э.П. Домашевская, В. Кирхер, Ш. Хильдебрандт. ФТП, **34**, 1086 (2000).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **A combined technique for investigation of multicomponent photoreflectance spectra of semiconductors**

R.V. Kuzmenko, A.V. Ganzha, E.P. Domashevskaya

Voronezh State University,  
394693 Voronezh, Russia

**Abstract** A new technique for the combined investigation of multicomponent photoreflectance spectra of semiconductors is proposed in the work including spectral measurements under the change of the density and wavelength of laser excitation alongside with the phase analysis of the spectrum. Efficiency of the technique is demonstrated by analyzing a multicomponent photoreflectance spectrum of the passivated homoepitaxial sample  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}$  taken as an example.