

## МОДУЛИРОВАННОЕ РАДИОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

О.А.Рябушкин<sup>1)</sup>, В.А.Сабликов

Институт радиотехники и электроники РАН  
141120 Фрязино, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 5 января 1998 г.

Реализован бесконтактный метод модуляционной спектроскопии полупроводниковых гетероструктур, использующий воздействие радиочастотного или СВЧ поля с модулированной интенсивностью на отражение зондирующего света. Метод позволяет исследовать эффекты электрон-дырочного взаимодействия в различных слоях гетероструктуры. Предложена модель, объясняющая особенности спектров модулированного радиочастотным полем оптического отражения, наблюдаемые на селективно легированных гетероструктурах GaAs/AlGaAs.

PACS: 78.66.-w

1. Оптические методы, такие как спектроскопия фотолюминесценции (ФЛ) и модуляционная спектроскопия, применяются для исследования полупроводников и полупроводниковых структур уже более сорока лет. В модуляционной спектроскопии наиболее распространен метод электроотражения (ЭО), применяемый в широком диапазоне температур, и его бесконтактная модификация – фотоотражение (ФО). Несмотря на очевидные достоинства этих методов, они обладают недостатками, ограничивающими их применимость. В методе ЭО – это необходимость создания электрических контактов, а при исследовании ФО при низких температурах возникает проблема разделения спектров ФО и ФЛ, связанная с сильным (на несколько порядков) возрастанием амплитуды ФЛ, что затрудняет измерение отражения. Эта проблема особенно актуальна для современных гетероструктур, при исследовании которых ФО используется для определения встроенных и фотоиндуцированных электрических полей [1]. В настоящей работе предлагается бесконтактный метод модуляционной спектроскопии, сохраняющий преимущества методов ФО и ЭО и применимый вплоть до сверхнизких температур. Метод основан на модуляции отражения зондирующего света под действием электрического поля радиочастотного (РЧ) или СВЧ диапазона. Возможны два режима измерений:

1) если амплитуда поля постоянна во времени, то изменение оптического отражения регистрируется на частоте этого поля, которая может быть достаточно велика (вплоть до  $\sim 10^{12}$  Гц). По-существу это есть случай электроотражения в РЧ или микроволновом диапазоне;

2) если же используется высокочастотное поле, модулированное по амплитуде, то оптический отклик регистрируется на частоте модуляции; в этом случае реализуется метод радиочастотного или микроволнового модуляционного отражения – РМО или ММО [2–4].

2. Эксперименты проводились на полупроводниковых гетероструктурах GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с двумерным электронным газом (2МЭГ). Гетероструктура располагалась между пластинами плоского конденсатора, к которым приложено модулированное по амплитуде напряжение  $U_{rf}(1 + \sin(\Omega t)) \sin(2\pi ft)$ . Частота

<sup>1)</sup> e-mail: roa228@ire216.msk.su

поля,  $f$ , изменялась от  $10^5$  до  $3 \cdot 10^7$  Гц. Амплитуда радиочастотного поля  $E_{rf}$  была  $\sim 10^3$  В/см, а частота модуляции  $10^2 - 10^4$  Гц. Зондирующий луч света подводился к образцу и выводился с помощью световодов  $F_2$  и  $F_3$  через малое отверстие в пластине конденсатора (рис.1). Интегральная по спектру интенсивность зондирующего светового луча изменялась в диапазоне  $10^{-5} - 1$  Вт/см<sup>2</sup>. Сигнал РМО измерялся методом синхронного детектирования на частоте модуляции. Кроме РМО, проводились измерения ФО и ФЛ. Оптическое возбуждение осуществлялось с помощью He-Ne-лазера ( $\lambda = 633$  нм), излучение которого подводилось через световод  $F_1$ . Интенсивность возбуждения модулировалась с низкой частотой  $10^2 - 10^3$  Гц. Существенно, что в рассматриваемом методе РМО отсутствует какая-либо оптическая накачка и по этой причине нет сигналов ни ФЛ, ни ФО.

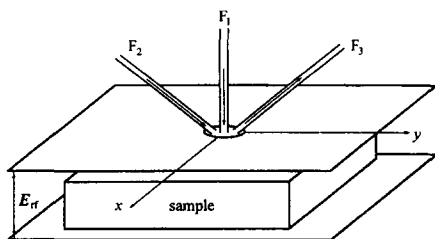


Рис.1. Пространственное расположение гетероструктуры, волоконных световодов ( $F_1, F_2, F_3$ ) и радиочастотного поля  $E_{rf}$

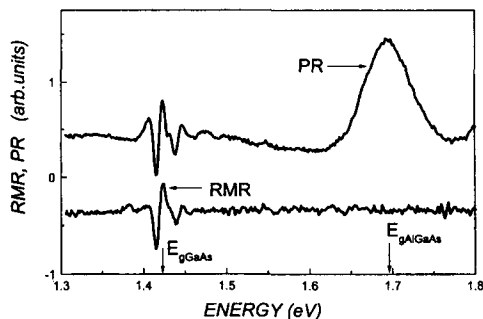


Рис.2. Спектры фотоотражения (PR) и радиочастотного модуляционного отражения (RMR) при комнатной температуре. Вертикальные стрелки указывают значения энергии ширины запрещенных зон GaAs и AlGaAs. Для наглядности спектр РМО (RMR) смещен относительно нулевого уровня на  $-0.5$  единицы

На рис.2 приведены спектры ФО и РМО для гетероструктуры GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \sim 0.2$ ) с толщиной буферного слоя GaAs  $\sim 0.7$  мкм при температуре 290 К и поле  $E_{rf} \sim 10^3$  В/см. Используемый в настоящей работе метод получения спектров РМО при низкочастотной модуляции РЧ поля является наиболее простым для реализации и в случае исследований медленно меняющихся во времени внутренних полей наиболее информативным. В случае же исследований быстро протекающих процессов в гетероструктурах предпочтительнее измерения спектров на высокой частоте, синхронные с РЧ или СВЧ полем.

На рис.3 приведены спектры РМО и ФЛ при 77 К. Характерная особенность спектра РМО заключается в большой амплитуде осцилляций при  $\hbar\nu < E_g\text{GaAs}$ . Эти осцилляции обусловлены экситонными состояниями в буферном слое GaAs. Также обращают на себя внимание осцилляции в широком диапазоне энергий  $\hbar\nu$  от 1.505 до 1.85 эВ, обусловленные эффектом Франца – Келдыша. Было бы интересно сравнить эти спектры со спектрами ФО. Однако характерные амплитуды сигнала ФО при 77 К чрезвычайно малы на уровне сигнала ФЛ. В отличие же от спектров ФО, характерные амплитуды сигналов РМО при понижении температуры до 77 К возрастают на несколько порядков. Именно при низких температурах, на наш взгляд, проявляются основные преимущества метода РМО, при регистрации спектров которого отсутствуют фотоиндуцированные носители заряда, а значит, и их рекомбинация.

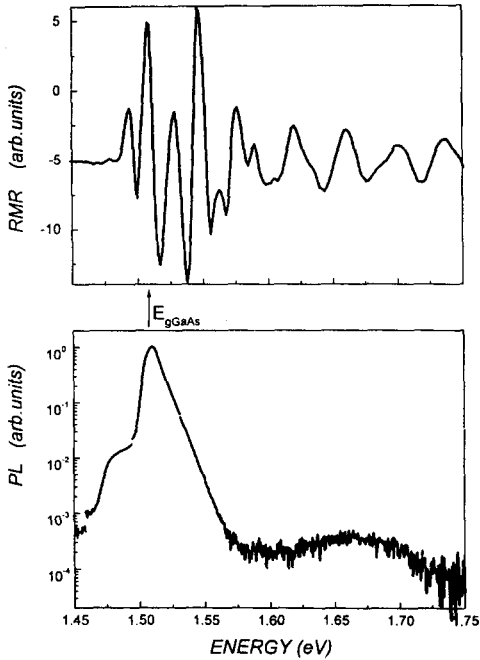


Рис.3. Спектры РМО (RMR) ( $E_{rf} = 3 \cdot 10^3$  В/см) и ФЛ (PL) при 77 К

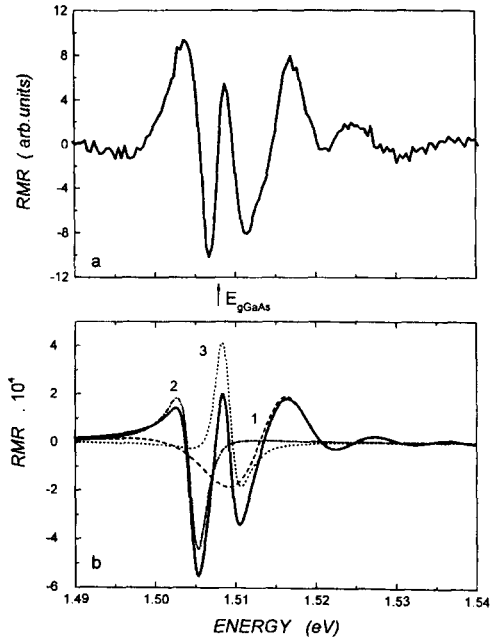


Рис.4. *a* – Спектр РМО при 77 К и  $E_{rf} \sim 5 \cdot 10^2$  В/см, спектральное разрешение 0.5 мэВ; *b* – Вычисленный спектр РМО гетероструктуры (сплошная линия) и составляющие, обусловленные слоями 1, 2 и 3 (кривые – 1, 2 и 3)

**3.** Проанализируем сигнал РМО на примере селективно легированной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Спектр сигнала РМО вблизи края поглощения показан на рис.4а. Достаточно сложный вид спектра указывает на вовлечённость нескольких процессов, происходящих на глубине формирования оптического отражения. Эта глубина порядка обратного коэффициента поглощения света при  $h\nu \sim E_g$ , которая для GaAs составляет  $\sim 1 - 2$  мкм. Таким образом, регистрируемый сигнал определяется буферным слоем и прилегающей к нему областью подложки.

Сигнал РМО обусловлен изменением электрического поля в этих частях гетероструктуры под действием РЧ поля. Поскольку измерения проводятся в режиме низкочастотной модуляции, РМО связано с низкочастотной составляющей поля, возникающей в результате детектирования внешнего высокочастотного поля. Осцилляции в спектре РМО при энергии фотонов выше 1.51 эВ, очевидно, обусловлены эффектом Франца – Келдыша в области сильного поля в буферном слое. Резкие линии при  $h\nu < E_g$  связаны с электрон-дырочным кулоновским взаимодействием. Такое взаимодействие, как известно [1, 4–11], приводит к изменению диэлектрической проницаемости и резким особенностям в модуляционных спектрах, которые наблюдаются при достаточно малом (по сравнению с  $E_x \sim e/a_x^2$ , где  $a_x$  – экситонный радиус) электрическом поле. Поле  $E_x \sim 10^3$  В/см, и, следовательно, такой экситонный эффект может быть обусловлен только той частью буферного слоя GaAs, в котором поле невелико, то есть вблизи слоя сверхрешетки (рис.5). Однако ни экситонная ”ли-

ния”, ни франц-келдышевские осцилляции не позволяют полностью описать структуру наблюдаемого спектра при  $h\nu \sim 1.51$  эВ. Наблюдаемый здесь пик РМО связан с межзонными переходами в слабом поле при отсутствии экситонного эффекта. Такая ситуация реализуется в слое подложки, прилежащем к слою сверхрешетки.

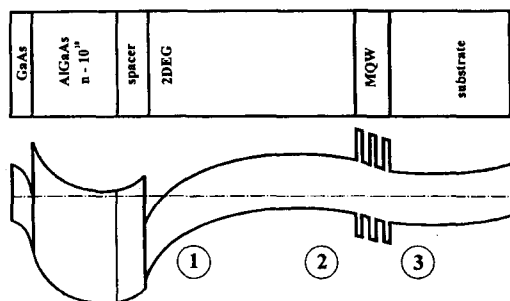


Рис.5. Схематическое расположение слоев и энергетическая диаграмма исследуемой структуры. Буферный слой GaAs условно делится на три области: 1) область сильного поля (область локализации 2МЭГ), 2) экситонная область, 3) область слабого поля, область GaAs, содержащая границу буферного слоя и подложки

Таким образом, для описания наблюдаемого спектра можно принять следующую трехслойную модель той части гетероструктуры, которая определяет оптическое отражение (рис.5):

- 1) прилежащий к двумерным электронам слой 1, в котором сосредоточено сильное поле  $E_1$ ;
- 2) граничащий со сверхрешеткой слой 2 с малым электрическим полем  $E_x$ , не разрушающим экситонные состояния;
- 3) слой 3, граничащий с подложкой, в котором также имеется встроенное электрическое поле  $E_3$ , направленное, как видно из рис.5, противоположно полю  $E_1$ .

На рис.4б приведен спектр отражения, рассчитанный для этой модели. Вклад слоя 1 получен согласно теории Аспнеса [9] с учетом уширения и оптических переходов из подзоны тяжёлых дырок. Вклад слоя 2 с сильным экситонным эффектом был найден путем вычитания экситонного спектра при отсутствии и при наличии внешнего поля с учетом изменения ширины и положения экситонного уровня [1,5,6,10]. Вклад межзонных переходов в слое 3 рассчитан как третья производная [9] по энергии от диэлектрической функции для критической точки  $M_0$ . При этом существенно, что соответствующая эксперименту форма спектра получается, если фаза низкочастотной составляющей поля в слоях 2 и 3 противоположна фазе поля в слое 1. Это указывает на то, что встроенное электрическое поле в областях 2 и 3 скорее всего направлено противоположно полю в слое 1. Полный коэффициент оптического отражения вычислялся с учетом расположения слоев в образце, поглощения и интерференции света. При этом для достижения количественного соответствия рассчитанных спектров с наблюдаемыми потребовалось учесть температурную модуляцию диэлектрической проницаемости. С тепловым эффектом связано уширение низкоэнергетического края ( $h\nu \sim 1.4 - 1.5$  эВ) спектра. Наилучшее соответствие рассчитанного спектра РМО с экспериментально наблюдаемым в диапазоне энергий 1.48 – 1.54 эВ достигается при следующих параметрах: уширения в областях 1, 2 и 3 равны, соответственно,  $\Gamma_1 = 5$  мэВ,  $\Gamma_2 = 2.0$  мэВ и  $\Gamma_3 = 2.2$  мэВ; встроенное электрическое поле в области 1  $E_1 = 2 \cdot 10^3$  В/см; амплитуды НЧ составляющей РЧ поля:  $E_1 = 2 \cdot 10^3$  В/см (в области 1),  $E_2 = 10^3$  В/см (в области 2) и  $E_3 = 10^3$  В/см (в

области 3); индуцированный РЧ полем разогрев  $\Delta T$  составлял  $3 \cdot 10^{-3}$  К. Остальные параметры необходимые для расчетов, взяты из литературы [6-8,11].

Таким образом, наблюдаемые спектры имеют ясную физическую природу и допускают количественное описание в рамках достаточно простой физической модели. Качественное отличие спектров РМО от ФО объясняется тем, что спектр ФО определяется теми областями образца, где имеются встроенные электрические поля, обуславливающие пространственное перераспределение неравновесных носителей заряда и создающие, таким образом, фотоиндуцированное электрическое поле, ответственное за модуляцию коэффициента отражения. По этой причине, например, экситонные эффекты в спектре ФО выражены достаточно слабо, так как они существенны в областях со слабым полем. В случае же РМО низкочастотное переменное электрическое поле возникает во всем образце, в том числе и там, где внутренние электрические поля малы. В наших экспериментах это привело к появлению оптических откликов от слоев 2 и 3, отсутствующих в спектре ФО.

Предлагаемая методика позволяет исследовать электрон-дырочное взаимодействие в слоях полупроводниковых структур с сильно отличающимися встроенными электрическими полями. Благодаря низкой интенсивности зондирующего света и отсутствию света накачки, не возникают неравновесные носители заряда и отсутствует ФЛ. Именно поэтому предложенная методика перспективна для создания методов неразрушающей диагностики и исследования полупроводниковых гетероструктур в широком диапазоне температур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-18476-а) и Министерства науки России по программе "Физика твердотельных наноструктур" (грант 97-1054).

- 
1. O.J.Glembocki and B.V. Shanabrook, in: *Semiconductors and Semimetals.*, vol. 36, *The Spectroscopy of Semiconductors*, Academic Press, INC, 1992, p.222.
  2. O.A.Ryabushkin, V.A.Sablikov, M.P.Meleshkevich, and A.N.Pershinov, *European Quantum Electronics Conference*, Technical Digest, Hamburg, 1996, p.73.
  3. O.A.Ryabushkin, V.A.Sablikov, M.P.Meleshkevich, and A.N.Pershinov, *Compound Semiconductors* 1996, Proc. 23-th Intern. Symposium on compound semiconductors, St. Petersburg, Russia, 23-27 Sept., 1996. Inst. Phys. Conf. Ser. No 155, (1997), p.93.
  4. O.A.Ryabushkin, Abstracts of Invited Lectures and Contributed Papers of the International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, 1997, p. 270.
  5. Ch.Tanguy, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4090 (1995).
  6. Ch.Tanguy, *Appl. Phys.* **80**, 4626 (1996).
  7. S.Pond and P.Handler, *Phys. Rev.* **B 8**, 2869 (1973).
  8. S.Adachi, *Phys. Rev.* **B 41**, 1003 (1991).
  9. D.E.Aspnes, in: *Handbook on Semiconductors*, vol. 2, *Opical Properties of Solids*, North-Holland Publishing Company, 1980.
  10. D.F.Blossey and P.Handler, in: *Semiconductors and Semimetals*, vol.9, Academic Press, New York and London, 1972.
  11. N.H.Lu and T.M.Hsu, *Phys. Rev.* **B 52**, 8191 (1995).