

# Поперечный перенос носителей заряда в полупроводниковых селективно-легированных гетероструктурах GaAs/AlGaAs при продольном протекании тока

Е. И. Лонская<sup>+1</sup>, О. А. Рябушкин<sup>+\*</sup>

<sup>+</sup> Институт радиотехники и электроники РАН, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>\*</sup> Московский физико-технический институт (Государственный Университет) 141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 17 октября 2005 г.

Исследовались спектры фотоотражения селективно-легированных гетероструктур GaAs/AlGaAs при пропускании постоянного электрического тока вдоль слоев структуры. Разработанная модель спектров позволила вычислить изменения внутренних поперечных электрических полей при протекании продольного тока. Экспериментально доказано, что даже слабый разогрев электронов в таких структурах приводит к пространственному перераспределению электронов в направлении, поперечном слоям гетероструктуры.

PACS: 73.40.Kp, 78.40.Fy, 78.66.Fd

Развитие технологии создания и прецизионных методов диагностики полупроводниковых гетероструктур с селективным легированием с начала 80-х годов и по настоящее время позволяют разрабатывать уникальные быстродействующие полевые транзисторы на основе GaAs/AlGaAs, InGaAs/AlGaAs, GaN/AlGaN и других гетероструктур [1–4]. Несмотря на разнообразие исследований селективно-легированных гетероструктур, вопрос о поведении электронов при протекании тока большой плотности в таких структурах остается открытым [5]. Разогрев электронов в селективно-легированных гетероструктурах изучался теоретически во многих работах [5–7], в которых было показано, что разогретые продольным электрическим током носители заряда могут пространственно перемещаться из области структуры с высокой проводимостью (канал) в слой с низкой проводимостью. Такой перенос заряда связывали с экспериментально наблюдаемыми областями отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) гетероструктур [5]. Однако измерения ВАХ не могут предоставить детальной информации об изменении электронных состояний и зонной диаграммы гетероструктуры при разогреве носителей заряда. Для решения этой задачи мы предлагаем воспользоваться методами модуляционного отражения [8–10], позволяющими измерять величины встроенных электрических полей и характерные энергии зонной структуры. Спектры модуляцион-

ного отражения также содержат в себе информацию как о свободных, так и о связанных (экситонных и примесных) электронных состояниях.

В статье сообщается об исследовании методом фотоотражения изменений энергетических состояний электронов и зонной диаграммы селективно-легированной гетероструктуры GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \approx 0.2$ ) в условиях разогрева носителей заряда. Гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии и состояла из: 100 Å защитного слоя нелегированного GaAs (обл. 1 на рис.1), 600 Å слоя легированного *n*-AlGaAs ( $N_D \approx 0.7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) (обл. 2 и 3), 100 Å слоя нелегированного AlGaAs спейсер (обл. 4), 1 мкм нелегированного буферного слоя GaAs (обл. 5–7), GaAs/AlGaAs технологической сверхрешетки, выращенной на полуизолирующей подложке из GaAs. Зонная диаграмма гетероструктуры схематично показана на рис.1. Длина образца составляла

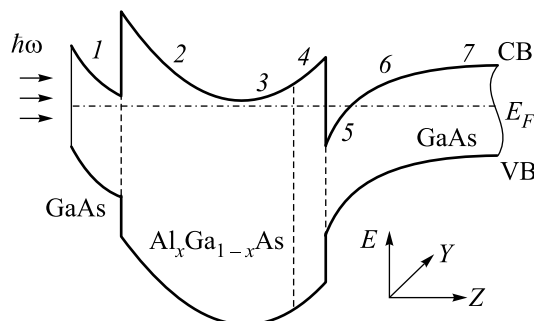


Рис.1. Профиль дна зоны проводимости (CB) и потолка валентной зоны (VB) активной части исследуемой гетероструктуры,  $E_F$  — уровень Ферми

<sup>1</sup>) e-mail: e.lonskaya@mail.ru

10 мм, а ширина 3 мм. Измерения для этого образца проводились при комнатной температуре. Разогрев носителей осуществлялся постоянным электрическим током, протекающим вдоль слоев гетероструктуры (по оси  $Y$ , рис.1) через индиевые омические контакты, сформированные на поверхности образца. Рассеиваемая в образце электрическая мощность  $P_{dc}$  изменялась от 0 до 110 мВт, при этом величина тока варьировалась от 0 до 10 мА. В этом диапазоне внешнего тока на ВАХ исследуемого образца отсутствовали участки с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Для регистрации спектров фотоотражения (ФО) [9–11] образец освещался зондирующим светом постоянной интенсивности, с энергией фотонов  $\hbar\omega$  вблизи характерных энергетических особенностей слоев гетероструктуры, и светом накачки с модулированной интенсивностью, с энергией квантов  $\hbar\nu$ , большей ширины запрещенной зоны полупроводниковых слоев структуры. Зондирующий свет от лампы накаливания проходил через оптический фильтр и с помощью многомодового оптического волокна  $F1$  подводился к образцу. В качестве света накачки использовалось излучение гелий-неонового лазера с энергией  $\hbar\nu = 1.96$  эВ ( $\lambda = 632.8$  нм), которое подводилось к образцу таким же волокном  $F3$ . Модуляция интенсивности света накачки осуществлялась механическим прерывателем с частотой 2 кГц. На поверхности образца области, освещенные зондирующим светом и светом накачки, пространственно совмещались (рис.2). Отраженный от образца зондирующий

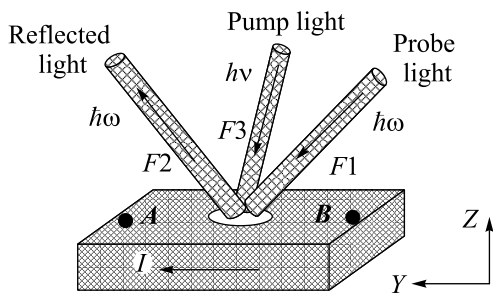


Рис.2. Расположение волокон и образца с контактами при регистрации спектров ФО с током. Диаметр волокон  $F1$ ,  $F2$  и  $F3$  составлял 300 мкм

свjet направлялся в волокно  $F2$ . Интенсивность отраженного от образца зондирующего света имела постоянную  $I(\omega)$ , и переменную  $\Delta I(\omega)$ , составляющие. Выходная апертура волокна  $F2$  согласовывалась с входной апертурой спектрометра. На выходе спектрометра спектральные составляющие зондирующего света регистрировались фотодиодом. Свет накачки

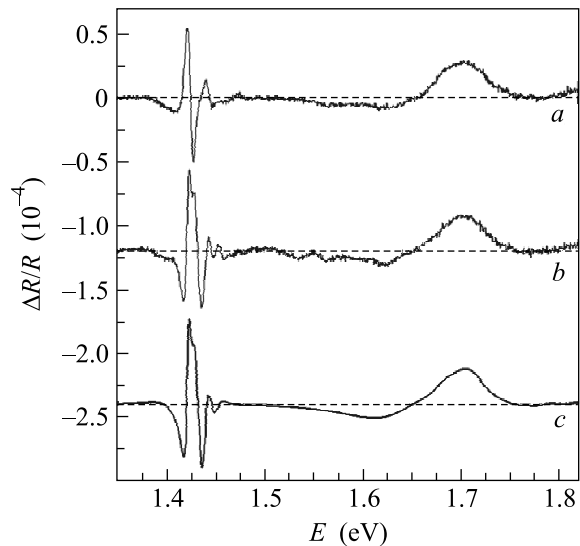


Рис.3. Экспериментальные спектры ФО: (а) без тока, (б) при рассеиваемой электрической мощности в образце  $P_{dc} = 12$  мВт. (с) Модельный спектр ФО при  $P_{dc} = 12$  мВт

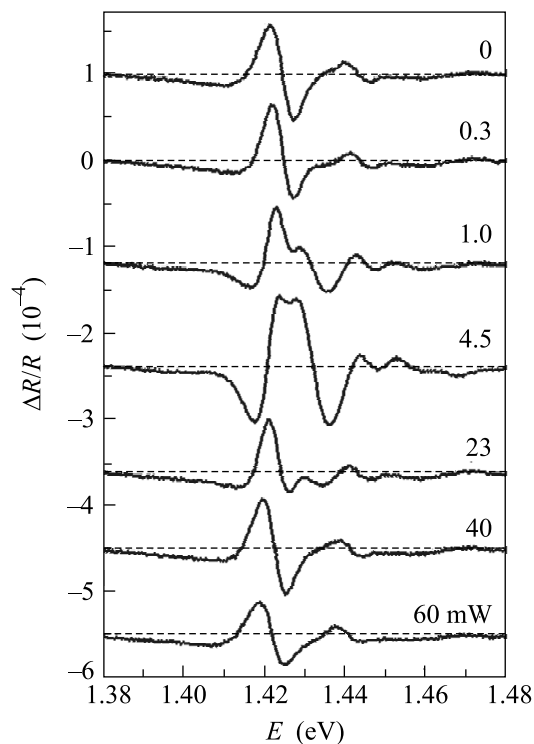


Рис.4. Экспериментальные спектры ФО в области энергий  $E \sim E_g$  GaAs при разных значениях  $P_{dc}$  от 0 до 60 мВт

с интенсивностью  $\sim 1$  Вт/см<sup>2</sup> создавал неравновесные электроны и дырки как в слоях GaAs, так и в слоях AlGaAs. Как известно, для полупроводников в спектральном диапазоне энергий вблизи края фунда-

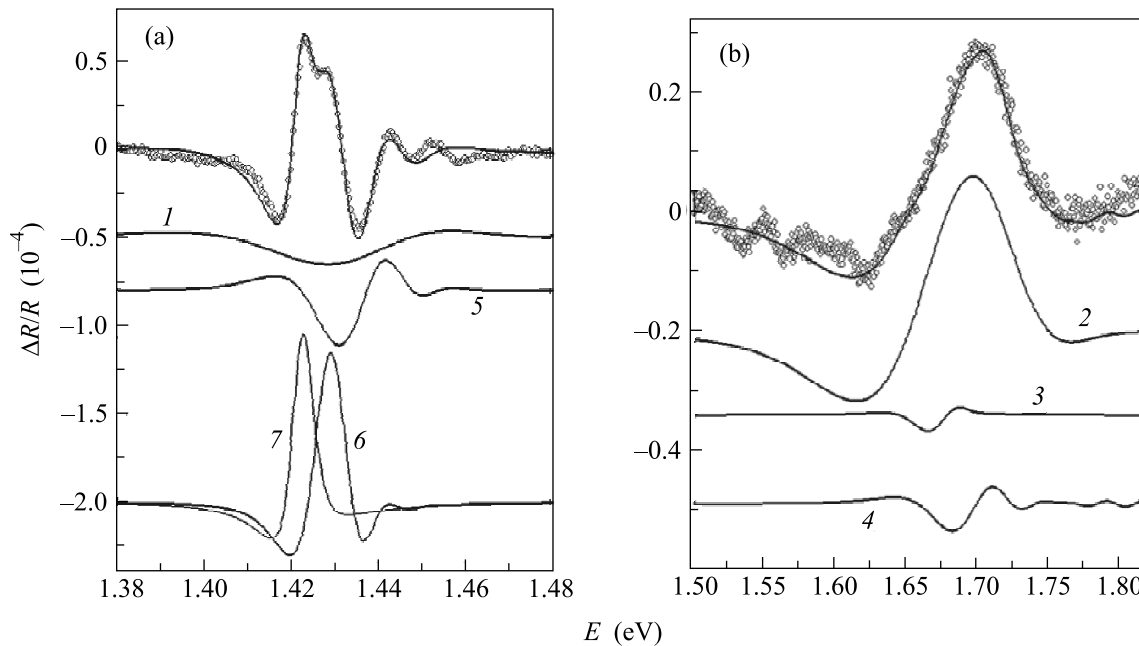


Рис.5. Пример модельного спектра ФО при  $P_{dc} = 12$  мВт: вклады в спектр ФО (а) от различных слоев GaAs, (б) от слоев AlGaAs. Нумерация слоев приведена согласно рис.1. Сверху показано сравнение измеренного спектра ФО (о) и модельного спектра (—)

ментального поглощения  $\hbar\omega \sim E_g$  коэффициент отражения  $R(\omega)$  света зависит от величины встроенного электрического поля [12]. Модуляция света накачки приводила к модификации внутренних электрических полей и, в результате, к модуляции коэффициента отражения зондирующего света  $\Delta R(\omega)$ . Относительное изменение интенсивности отраженного света  $\Delta I(\omega)/I(\omega)$ , пропорциональное  $\Delta R(\omega)/R(\omega)$ , измерялось на частоте модуляции света накачки с помощью синхронного детектирования.

На рис.3а приведен измеренный спектр ФО в отсутствие тока. В этом спектре можно выделить особенности в области энергий  $E$  1.38–1.48 эВ вблизи энергии ширины запрещенной зоны GaAs ( $E_g = 1.4273$  эВ), которые характеризуют несколько слоев GaAs. Особенности в области энергий 1.6–1.8 эВ ( $E_g = 1.67$  эВ) обусловлены слоем AlGaAs. Пропускание электрического тока, продольного слоям образца, существенно изменяет спектры ФО, см. рис.3б, рис.4. Как видно из рисунков, в области энергий 1.38–1.48 эВ спектр явно “разделяется” на две части: в левой части спектра при энергии  $E < E_g$  GaAs характерная осцилляция изменяет ширину и амплитуду с увеличением мощности тока, в правой же части спектра при энергии  $E > E_g$  GaAs появляются дополнительные осцилляции, амплитуда которых также изменяется. В области энергий 1.6–1.8 эВ заметных изменений спектра ФО при пропускании тока не

происходит. Уже из качественного сравнения спектров ФО в этих энергетических диапазонах можно сделать вывод, что при разогреве током электроны в слоях GaAs пространственно перераспределяются.

Для детального описания измеренных спектров ФО была разработана физическая модель, в которой рассматривались два основных механизма [10, 13, 14]: 1) значения встроенных электрических полей в слоях GaAs с полями 1, 5, 6 (рис.1) и в слоях AlGaAs с полями 2–4 изменяются за счет перераспределения разогретых электронов; 2) изменение энергии связи свободных экситонов в слое 7 GaAs разогретыми электронами. Непосредственно при расчете спектров ФО использовались традиционные аналитические выражения и параметры [15–18]. Пример модельного спектра ФО при рассеиваемой электрической мощности в образце  $P_{dc} = 12$  мВт продемонстрирован на рис.3с и на рис.5. Рассчитанные величины встроенных полей из модельных спектров ФО при протекании продольного тока различной мощности в слоях образца 4–6 показаны на рис.6. Внутренние поля в слоях 1, 2 и 3 практически не меняются с током и равны по модулю соответственно 30, 165, 14 кВ/см. Энергия связи свободных экситонов уменьшается от  $4.1 \pm 0.1$  мэВ без тока до  $3.6 \pm 0.1$  мэВ при  $P_{dc} = 60$  мВт. Разогрев свободных электронов и экситонов приводит и к незначительному разогреву решетки, который составил  $\Delta T \sim 5$  К при  $P_{dc} = 60$  мВт. Таким

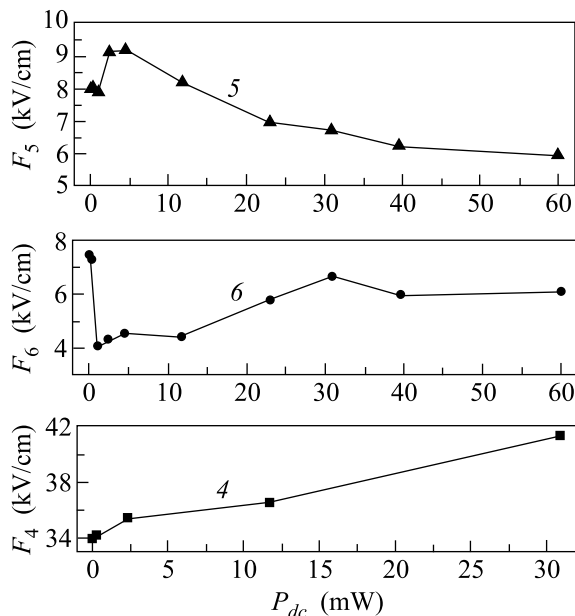


Рис.6. Рассчитанные изменения внутренних (поперечных) электрических полей  $F_5$ ,  $F_6$ ,  $F_4$  в областях гетероструктуры 5, 6, 4 при различных значениях рассеиваемой электрической мощности в образце  $P_{dc}$ . Нумерация областей приведена согласно рис.1. При определении внутренних полей погрешность вычислений составляла 5%

образом, из полученных результатов видно, что при разогреве носителей заряда электроны переходят из слоя AlGaAs (слой 4) и канала GaAs (слой 5) в глубь буферного слоя GaAs (слои 6, 7), приводя к модификации экситонных состояний [14]. Следует подчеркнуть, что незначительные изменения спектров ФО в диапазоне энергий вблизи  $E_g$  AlGaAs, по всей видимости, обусловлены тем, что слабо разогретые электроны из канала GaAs не могут преодолеть барьер в зоне проводимости AlGaAs и уходят из области разогрева в глубь буфера GaAs.

Для исследования влияния разогретых электронов на легированный слой AlGaAs исследовались аналогичные селективно-легированные гетероструктуры GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \approx 0.12$ ) с дополнительной сверхрешеткой в буферном слое GaAs, которая находилась на расстоянии 225 Å от активной гетерограницы [10]. Зонная диаграмма такой гетероструктуры схематично показана на рис.7. Для увеличения разогрева электронов измерения спектров ФО этого образца при пропускании продольного тока проводились при температуре 77 К.

Экспериментальный спектр ФО без тока представлен на рис.8а. Энергия ширины запрещенной зоны GaAs составляла 1.51 эВ. Пик вблизи энергии 1.506 эВ

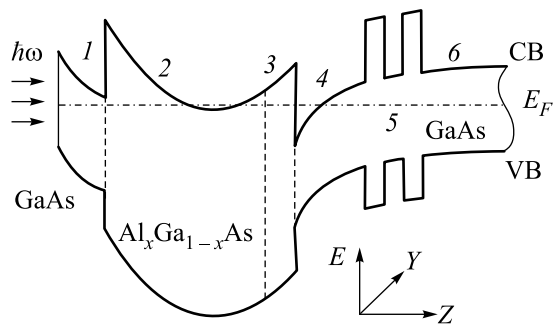


Рис.7. Зонная диаграмма образца с дополнительной сверхрешеткой в буферном слое GaAs (область 5)

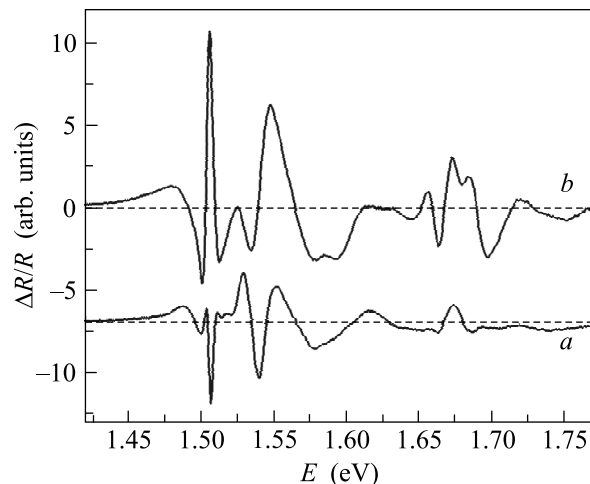


Рис.8. Экспериментальные спектры ФО для гетероструктуры с дополнительной сверхрешеткой: (а) в отсутствие тока, (б) при рассеиваемой электрической мощности в образце  $P_{dc} = 160$  мВт

обусловлен модуляцией экситонных состояний в области  $b$  буферного слоя GaAs (рис.7) светом накачки. Модуляция экситонов в квантовых ямах (область 5 на рис.7) и встроенных полей в слоях GaAs 1 и 4 приводит к формированию спектральных особенностей в диапазоне энергий 1.52–1.63 эВ. Спектральные особенности в области энергий 1.66–1.72 эВ обусловлены модификацией внутренних полей в слоях AlGaAs 2, 3. Как видно на рис. 8b, спектр ФО этой гетероструктуры также существенно изменяется во всем измеренном диапазоне энергий при протекании продольного тока. В области энергий вблизи  $E_g$  AlGaAs (1.67 эВ) простой по форме пик спектра ФО “расщепляется” на два вида осцилляций с различными периодами и амплитудами. Это связано с увеличением внутренних полей в областях 2, 3 слоя AlGaAs, то есть с переносом носителей заряда в направлении, поперечном слоям гетероструктуры. Такое поведение спектра ФО позволило нам экспериментально разделить два зна-

чения измеряемых встроенных полей (справа и слева) в слое AlGaAs (области 2 и 3 на рис.7). Таким образом, мы видим, что для каждой гетероструктуры проявляются свои особенности разогрева носителей заряда, которые надежно регистрируются методами модуляционного отражения света.

В заключение отметим, что нами экспериментально подтвержден перенос носителей заряда в реальном пространстве для селективно-легированных гетероструктур GaAs/AlGaAs. Показано, что даже при комнатной температуре слабый разогрев электронов существенно влияет на зонную диаграмму гетероструктуры.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 03-02-16942).

1. Ж. Алферов, УФН **172**, 1068 (2002).
2. T. Mimura, S. Hiyamizu, and T. Fujii, Jap. J. of Appl. Phys. **19**, L225 (1980).
3. T. Drummond, W. Masselink, and H. Morkoc, Proc. of IEEE **74**, 773 (1986).
4. S. Karmalkar, M. Shur, and R. Gaska, in: *Wide energy bandgap electronic devices*, Eds. F. Ren and J. Zolper, World Scientific, 2003, p. 173.
5. Z. Gribnikov, K. Hess, and G. Kosinovsky, J. Appl. Phys. **77**, 1337 (1995).
6. А. Гарматин и А. Кальфа, ФТП **19**, 1147 (1985).
7. А. А. Кальфа и А. С. Тагер, ФТП **21**, 1353 (1987).
8. О. А. Рябушкин и В. А. Сабликов, Письма в ЖЭТФ **67**, 217 (1998).
9. J. Misiewicz, P. Sitarek, G. Sek et al., Materials Science **21**, 263 (2003).
10. О. А. Ryabushkin, E. I. Lonskaya, A. E. Sotnikov et al., Phys. Stat. Sol. (a) **202**, 1282 (2005).
11. О. А. Ryabushkin and E. I. Lonskaya, Physica E **13**, 374 (2002).
12. D. E. Aspnes and N. Bottka, in: *Semiconductors and Semimetals*, v. **9**, Modulation techniques. Academic Press, 1972, ch. 6.
13. О. А. Ryabushkin and V. A. Sablikov, Proc. SPIE **3732**, 137 (1999).
14. О. А. Ryabushkin, in: *Proc. of Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, St.Petersburg, 1997, p. 270.
15. R. A. Batchelor, A. C. Brown, and A. Hamnett, Phys. Rev. B **41**, 1401 (1990).
16. C. Tanguy, Phys. Rev. Lett. **75**, 4090 (1995); **76**, 716 (1996).
17. S. Adachi, Phys. Rev. B **41**, 1003 (1990).
18. M. El Allali, C. B. Sorensen, E. Veje et al., Phys. Rev. B **48**, 4398 (1993).