

Фотоотражение полупроводниковой лазерной структуры при локальной оптической накачке

М.А.Черников, А.Е.Сотников, О.А.Рябушкин, П.Трубенко, И.Берищев, А.Овчинников

Лазерная AlGaAs/GaAs-гетероструктура с InGaAs-квантовой ямой исследуется бесконтактным методом фотоотражения при локальной оптической накачке. В отличие от традиционного метода фотоотражения области на поверхности образца, освещаемые зондирующим светом и светом накачки, пространственно разнесены. Метод позволяет эффективно разделять сигналы фотолуминесценции и фотоотражения и даёт возможность построить трёхмерное распределение энергетической зонной диаграммы лазерной структуры.

Ключевые слова: фотоотражение, полупроводниковый лазер, гетероструктуры.

Всё возрастающие требования, предъявляемые к характеристикам разнообразных современных полупроводниковых лазеров, делают актуальной задачу поиска новых эффективных методов диагностики полупроводниковых лазерных структур. Эти методы должны позволять измерять пространственное распределение параметров слоёв вдоль полупроводниковых структур. Такую возможность дают методы оптической спектроскопии с пространственным сканированием при локальном возбуждении и оптическом зондировании вдоль структуры.

Среди методов оптической модуляционной спектроскопии наибольшее распространение получили методы электроотражения (ЭО) (с использованием специальных контактов, нанесённых на образец) и бесконтактного фотоотражения (ФО). В классическом методе ЭО [1] на противоположных сторонах исследуемого образца создаются два плоских металлических электрода, один из которых является полупрозрачным. Зондирующий свет падает на образец со стороны полупрозрачного электрода. Прикладываемое к электродам напряжение, выступающее в качестве внешнего воздействия, модулирует так называемые встроенные электрические поля исследуемой структуры.

В полупроводниках диэлектрическая проницаемость в спектральном диапазоне вблизи края фундаментального поглощения зависит от встроенного электрического поля из-за эффекта Франца – Келдыша [2–4]. Таким образом, прикладываемое напряжение, изменяя встроенные поля, изменяет спектр отражённого зондирующего света. Помимо этого существуют и другие эффекты, обуславливающие влияние прикладываемого напряже-

ния на диэлектрическую проницаемость полупроводников. Наиболее сильно диэлектрическая проницаемость зависит от энергии связи и времени жизни экситонных состояний [5].

Энергия связи и время жизни экситонных состояний изменяются под действием встроенного электрического поля в силу эффекта Штарка. Эти изменения особенно значительны в низкоразмерных структурах, таких как квантовые ямы, нити или точки [6]. Спектр модуляционного отражения света от полупроводниковой структуры с одиночной квантовой ямой содержит уникальную информацию о рекомбинационных процессах, происходящих в квантовой яме, о её температуре и концентрации неравновесных носителей. Изменения энергии связи могут быть вызваны и неравновесными носителями, возникающими в квантовой яме из-за процессов инжекции, которые изменяют степень дебаевского экранирования экситонов. Эти неравновесные носители могут также влиять на время жизни экситонных состояний из-за процессов рассеяния. Более того, электрическое поле меняет не только уровни энергий экситонных состояний в квантовой яме, но и волновые функции свободных электронов и дырок, находящихся в ней.

Главным недостатком классического метода ЭО является необходимость нанесения металлического электрода на исследуемую сторону образца, что делает метод деструктивным и, тем самым, практически неприменимым для диагностики. Кроме того, барьеры Шоттки, возникающие при контакте металлических электродов с полупроводниковым образцом, искажают встроенные электрические поля в исследуемой структуре. Однако при исследовании полупроводниковых лазерных структур эти недостатки метода ЭО можно обойти.

В работах [7, 8] нами исследовалась полупроводниковая лазерная GaAs/AlGaAs-гетероструктура с напряжённой InGaAs-квантовой ямой. Подобные структуры широко используются для создания мощных полупроводниковых лазеров [9, 10]. Схематическая зонная диаграмма этой структуры изображена на рис.1. Структура выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs (толщиной 500 мкм) и состоит из буферного слоя n -GaAs (0.2 мкм), переходного слоя n -

М.А.Черников, А.Е.Сотников. НТО «ИРЭ-Полнос», Россия, 141190 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1; e-mail: fire@inbox.ru
О.А.Рябушкин. Фрязинское отделение Института радиотехники и электроники РАН, Россия, 141190 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1
P.Trubenko, I.Berishchev, A.Ovtchinnikov. IPG Photonics Corporation, 50 Old Webster Road, Oxford, MA 01540, USA

Поступила в редакцию 25 февраля 2004 г., после доработки – 1 июля 2004 г.

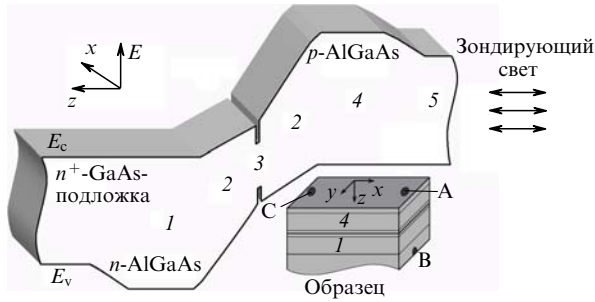


Рис.1. Зонная диаграмма исследуемого образца (на вставке показана геометрия образца):

1, 4 – эмиттеры; 2 – градиентный волновод; 3 – квантовая яма; 5 – слой p^+ -GaAs; A, B, C – металлические контакты.

$Al_{0.03-0.2}Ga_{0.97-0.8}As$ (0.15 мкм), n - и p - $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ -эмиттеров (1.2 мкм) 1, 4, градиентного $Al_{0.2-0.1-0.2}Ga_{0.8-0.9-0.8}As$ -волновода (общей толщиной 0.5 мкм) 2, в центре которого находится $In_{0.14}Ga_{0.86}As$ -квантовая яма (8 нм) 3, переходного слоя p - $Al_{0.2-0.03}Ga_{0.8-0.97}As$ (0.15 мкм) и приповерхностного слоя p^+ -GaAs (0.15 мкм) 5. В работе [7] на поверхности структуры и на её подложке создавались два точечных металлических контакта А и В (см. вставку на рис.1). При этом в качестве электродов использовались слой подложки и n -эмиттера с одной стороны и p -эмиттера и сильнолегированного слоя – с другой. Почти всё прикладываемое к контактам напряжение падало в волноводном слое и квантовой яме, что приводило к эффективной модуляции их оптических свойств по всей плоскости структуры.

В работе [8] два металлических контакта А и С формировались на поверхности структуры. Прикладываемое к ним электрическое напряжение вызывало модуляцию встроенного поля в слоях 2 и 3 за счёт эффекта, аналогичного изменению поперечного электрического поля в канале полевого транзистора при пропускании электрического тока между стоком и истоком [11]. В отличие от традиционного метода ЭО, методы работ [7, 8] позволяют тестировать выращенные лазерные структуры, незначительно изменяя свойства поверхности (полупроводниковые свойства области контактов). Контакты в этих методах искажают встроенные электрические поля в подложке и p -эмиттере структуры лишь на расстоянии порядка дебаевского радиуса экранирования. Однако полностью бесконтактная методика тестирования полупроводниковых лазерных структур была бы более предпочтительна.

При традиционной реализации бесконтактного метода ФО [12] в качестве внешнего воздействия используется свет накачки с энергией квантов $h\nu$, превышающей ширину запрещённой зоны E_g исследуемого полупроводника. Создаваемые этим светом электрон-дырочные пары перераспределяются встроенными электрическими полями, существующими даже в однородных полупроводниках. Пространственное перераспределение носителей заряда на частоте модуляции накачки приводит к возникновению внутренних фото-ЭДС, которые модулируют встроенные поля на этой же частоте. Модуляция встроенных полей, так же как и в методе ЭО, приводит к модуляции спектра отражения зондирующего света. Тем не менее метод ФО не свободен от недостатков. При снятии спектров ФО может возникать сигнал фотолюминесценции (ФЛ). Спектры ФО и ФЛ, как правило, на-

ходятся в одном диапазоне длин волн, и их разделение может быть чрезвычайно затруднено [13].

В настоящей работе для исследования полупроводниковой лазерной структуры (рис.1) мы используем нетрадиционную модификацию метода ФО, позволяющую эффективно разделять сигналы ФО и ФЛ. Основная особенность используемого метода заключается в том, что области на поверхности образца, освещаемые зондирующим светом и светом накачки, разнесены в пространстве. Такая модификация метода ФО применялась ранее при исследовании структур для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов [14, 15].

Экспериментальная установка аналогична описанной в работе [16]. Для измерения ФЛ и ФО интенсивность света накачки, излучаемого полупроводниковым лазером ($\lambda = 670$ нм), модулировалась импульсами тока на частоте $f = 330$ Гц. Пройдя через оптическое волокно диаметром 300 мкм, свет накачки с интенсивностью $\sim 0.1 - 1$ Вт/см² падал на образец. Два аналогичных, жёстко зафиксированных относительно друг друга оптических волокна использовались для подведения к образцу и регистрации отражённого от образца зондирующего света. Эти волокна могли двигаться в плоскости исследуемого образца относительно волокна, по которому проходит свет накачки. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Измеренные спектры ФЛ и ФО представлены на рис.2. Когда области, освещаемые зондирующим светом и светом накачки, были пространственно совмещены, наблюдалась интенсивная ФЛ в том же спектральном диапазоне, что и сигнал ФО. В этом случае было необходимо вычитать сигнал ФЛ из переменной составляющей ΔR сигнала ФО. Отметим, что такая процедура не всегда позволяет разделить сигналы ФЛ и ФО, т.к. сигнал ФЛ может на порядки превышать сигнал ФО. Во время измерений спектров ФЛ и ФО свет накачки сильно поглощался в слоях 4, 5 (рис.1).

Рекомбинация электронов и дырок, созданных светом накачки в этих слоях, проявлялась в виде сигнала ФЛ с основными пиками вблизи 1.63 и 1.39 эВ соответственно. Свободные электроны и дырки, созданные светом накачки в слое 2, пространственно разделяются встроенным электрическим полем, что приводит к модуляции этого поля в областях 2 и 3 возникающей фото-ЭДС. Причём до области 2 со встроенным электрическим полем доходит только небольшая часть света накачки, поэтому сигнал ФЛ больше сигнала ΔR .

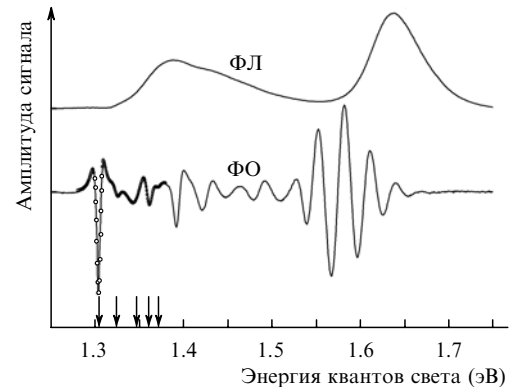


Рис.2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (точки) спектры ФЛ и ФО исследуемого образца. Стрелками указаны энергии электрон-дырочных переходов в квантовой яме.

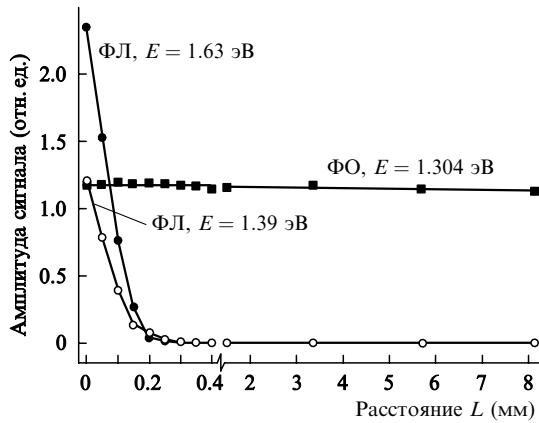


Рис.3. Пространственная зависимость амплитуд сигналов ФЛ и ФО.

Осцилляции на спектре ФО в диапазоне 1.52–1.67 эВ являются осцилляциями Франца–Келдыша, формируемыми в слое 2. По периоду этих осцилляций можно определить встроенное электрическое поле в волноводной области структуры. Основной пик вблизи 1.304 эВ соответствует энергии электронного перехода $1hh-1e$ в квантовой яме. Осцилляции в спектральном диапазоне 1.31–1.38 эВ обусловлены модуляцией возбуждённых электронных и дырочных состояний в квантовой яме в силу квантового эффекта Штарка.

Аппроксимация экспериментальной кривой формулой Аспнеса [17] позволяет установить энергии электронных переходов в яме (указаны стрелками на рис.2). Поскольку квантовая яма имеет конечную глубину и находится во встроенном электрическом поле $p-n$ -перехода, в спектре ФО проявляются запрещённые в модели бесконечно глубокой симметричной квантовой ямы переходы, в том числе и с участием лёгких дырок, для которых слой InGaAs представляет собой квантовый барьер [18]. Отметим, что в спектрах ФЛ такие переходы обычно не видны.

На рис.3 представлены зависимости амплитуд сигналов ФЛ и ФО от расстояния L между центрами областей, освещаемых зондирующим светом и светом накачки. Сигнал ФЛ не возникает за пределами области, освещаемой светом накачки. В то же время амплитуда сигнала ФО практически неизменна на ограниченном размерах образца сантиметровом расстоянии от области, освещаемой светом накачки. Это расстояние на четыре порядка превышает длину диффузии неравновесных носителей в объёмном полупроводнике. Расстояние, на котором наблюдается сигнал ФО, достигает таких больших значений благодаря энергетическому барьеру $p-n$ -перехода, препятствующему рекомбинации электронов и дырок, и высокой проводимости эмиттерных слоёв. Электроны и

дырки, разделённые встроенным полем в слое 2, растекаются по эмиттерным n - и p -слоям 1, 4 соответственно.

Фактически эмиттерные слои представляют собой обкладки конденсатора. Переменное напряжение, возникающее между этими обкладками из-за зарядов, созданных светом накачки, приводит к изменению встроенных электрических полей в волноводном слое и квантовой яме по всей плоскости структуры, а следовательно, и к изменению спектра отражённого зондирующего света. Форма сигнала ФО при сканировании вдоль поверхности структуры не изменялась, что свидетельствовало о высокой однородности исследуемого образца. Распространение сигнала ФО по поверхности образца при локальном фотовозбуждении аналогично распространению сигнала ЭО [7]. Однако методика, применяемая в настоящей работе, полностью бесконтактна.

Авторы благодарят В.П.Гапонцева за внимание и поддержку, оказанные при проведении этих исследований. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-02-16942).

- Cardona M. *Modulation Spectroscopy* (New York: Academic Press, 1969).
- Franz W. *Zs. Naturf.*, **13**, 484 (1958).
- Келдыш Л.В. *ЖЭТФ*, **34**, 1138 (1958).
- Tharmalingam K. *Phys. Rev.*, **130**, 2204 (1963).
- Tanguy Ch. *J. Appl. Phys.*, **80**, 4626 (1996).
- Miller D.A.B., Chemla D.S., Damen T.C., Gossard A.C., Wiegmann W., Wood H., Burrus C.A. *Phys. Rev. B*, **32**, 1043 (1985).
- Chernikov M.A., Sotnikov A.E., Ryabushkin O.A., Trubenko P., Berishev I., Ovtchinnikov A. *Conf. Abstr. CLEO/Europe-EQEC* (Munich, 2003, 27ECC4M).
- Ryabushkin O.A., Romanyuk A.Yu., Chernikov M.A., Sotnikov A.E., Trubenko P., Moshegov N., Ovtchinnikov A. *Tech. Digest of CLEO/QELS* (Baltimore, Md, USA, 2003, CtuM35).
- Лифшиц Д.А., Егоров А.Ю., Кочнев И.В., Капитонов В.А., Лантратов В.М., Леденцов Н.Н., Налет Т.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **35**, 380 (2001).
- Александров С.В., Алексеев А.Н., Демидов Д.М., Дудин А.Л., Кацавец Н.И., Коган И.В., Погорельский Ю.В., Тер-Мартirosyan А.Л., Соколов Э.Г., Чальый В.П., Шкурко А.М. *Письма в ЖТФ*, **28**, 71 (2002).
- Shur M. *GaAs Devices and Circuits* (New York: Plenum Press, 1987).
- Nahory R.E., Shay J.L. *Phys. Rev. Lett.*, **21**, 1569 (1968).
- Glembocki O.J., Shanabrook B.V., in *Semiconductors and Semimetals* (Boston: Acad. Press, 1992, v. 36, p. 221).
- Ryabushkin O.A., Sablikov V.A., Volkov A.O., Mokerov V.G., in *Inst. Phys. Conf. Ser.* (Bristol, UK, Philadelphia, USA, 1997, v. 155, p. 137).
- Сабликов В.А., Поляков С., Рябушкин О.А. *ФТП*, **31**, 393 (1997).
- Сотников А.Е., Черников М.А., Рябушкин О.А., Трубенко П., Мошегов Н., Овчинников А. *Квантовая электроника*, **34**, 871 (2004).
- Aspnes D.E., in *Handbook on Semiconductors* (Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., v. 2, 1980).
- Krystek W., Leibovitch M., Sun W.D., Pollak F.H., Gumbs G., Burnham G.T., Wang X. *J. Appl. Phys.*, **84** (4), 2229 (1998).