

Модуляция оптического поглощения квантовых ям GaAs / AlGaAs в поперечном электрическом поле

© Л.Е. Воробьев, Е.А. Зибик, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин, О.Н. Нащекина*, И.И. Сайдашев*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 декабря 1997 г. Принята к печати 23 декабря 1997 г.)

Экспериментально исследована трансформация спектров внутризонного поглощения света электронами в квантовой яме при воздействии поперечного электрического поля. В дополнение к известному эффекту Штарка были обнаружены осцилляции поглощения в полосе фотоионизации. Они соответствуют переходам электронов из основного состояния в квантовой яме на квазидискретные уровни, которые возникают на фоне континуума состояний над ямой благодаря линейному потенциалу внешнего электрического поля.

Процессы внутризонного оптического поглощения в квантовых ямах определяют работу приемников инфракрасного излучения нового типа, созданных на основе наноструктур [1]. Наиболее эффективны фотоприемники на квантовых ямах, близких к резонансным, в которых один из дискретных уровней расположен близко к потолку ямы. Целый ряд работ посвящен теоретическому анализу спектра внутризонного оптического поглощения таких ям как в равновесных условиях, так и в сильном поперечном электрическом поле (см., например, [2–4]). Экспериментальные исследования наноструктур выявили, что в сильных электрических полях линия межзонного поглощения испытывает штарковский сдвиг и уширение [1,5,6]. В то же время экспериментально пока не наблюдались квазипериодические осцилляции коэффициента поглощения в спектре фотоионизации квантовой ямы, которые, как было предсказано в теоретической работе [2], должны возникать в сильных поперечных электрических полях. Данная работа была нацелена на экспериментальное обнаружение указанных осцилляций.

Исследованная структура включала пятьдесят GaAs квантовых ям шириной $L_W = 5.1$ нм, разделенных $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ барьерами шириной $L_B = 25.4$ нм, выращенных на полуизолирующей подложке GaAs. Простейший расчет методом эффективной массы в одноэлектронном приближении (без учета непараболичности и коллективных эффектов) дает для таких ям два дискретных уровня: $E_1 = -174$ мэВ и $E_2 = -4$ мэВ (энергии отсчитываются от потолка ямы; глубина ямы $|V| = 247$ мэВ). Так как уровень E_2 является мелким, квантовая яма близка к резонансной. Концентрация электронов в ямах $n_s = 3 \cdot 10^{11}$ см⁻². Между подложкой и квантово-размерными слоями имелся легированный слой толщиной 0.5 мкм с концентрацией электронов 10^{18} см⁻³, к которому, после локального стравливания квантово-размерных слоев, были созданы четыре точечных омических контакта по углам образца (общая площадь образца составляла $6 \cdot 4$ мм²). Аналогичный легированный слой имелся на свободной поверхности

структуры, в его центральной части были созданы два точечных контакта. Точечные контакты на каждом из проводящих слоев были соединены между собой, сопротивление образца в слабом поле составляло 150 Ом при $T = 77$ К. При этой же температуре проводились оптические и электрооптические измерения. Сравнительно малая величина сопротивления структуры в поперечном поле указывает на наличие закорачивающих каналов в квантово-размерных слоях. Следовательно, поперечное поле в структуре не является однородным. Как определялась эффективная напряженность этого поля будет указано далее.

Оптическое излучение вводилось в структуру через скошенный под углом 45° торец подложки. Благодаря многократным полным внутренним отражениям суммарная длина оптического хода светового пучка по квантово-размерным слоям составляла 17 мкм.

Перед образцом был установлен поляризатор, поворачивая который можно было возбуждать в квантово-размерных слоях либо волну *s*-поляризации (т.е. обыкновенную волну, для которой вектор напряженности электрического поля перпендикулярен оптической оси структуры и, соответственно, параллелен плоскости квантовой ямы), либо волну *p*-поляризации (т.е. необыкновенную волну, линейно поляризованную в ортогональном направлении).

Равновесные спектры коэффициента оптического поглощения α (в отсутствие внешнего электрического поля) были исследованы для обеих поляризаций (α_p и α_s) в диапазоне $h\nu = 130$ – 280 мэВ. На рис. 1 представлена спектральная зависимость разности $\alpha_p - \alpha_s$, которая демонстрирует интенсивный пик поглощения при $h\nu \approx 170$ мэВ, соответствующий межуровневым переходам $E_1 \rightarrow E_2$. Пик поглощения заметно асимметричен, его коротковолновое крыло более интенсивно благодаря вкладу в поглощение процесса фотоионизации, т.е. переходов электронов под действием света с уровня E_1 в континуум состояний над ямой. В отсутствие внешнего поля фотоионизация имеет порог при энергии $h\nu_i = 174$ мэВ.

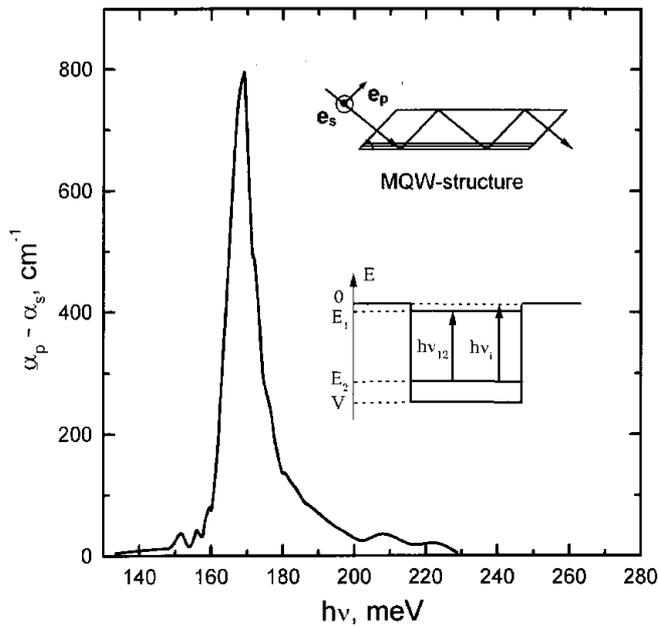


Рис. 1. Равновесный спектр оптического поглощения структуры с квантовыми ямами. На врезке показаны ход лучей в образце и направление электрического поля световых волн s - и p -поляризации, а также схема оптических переходов для квантовой ямы в отсутствие внешнего электрического поля.

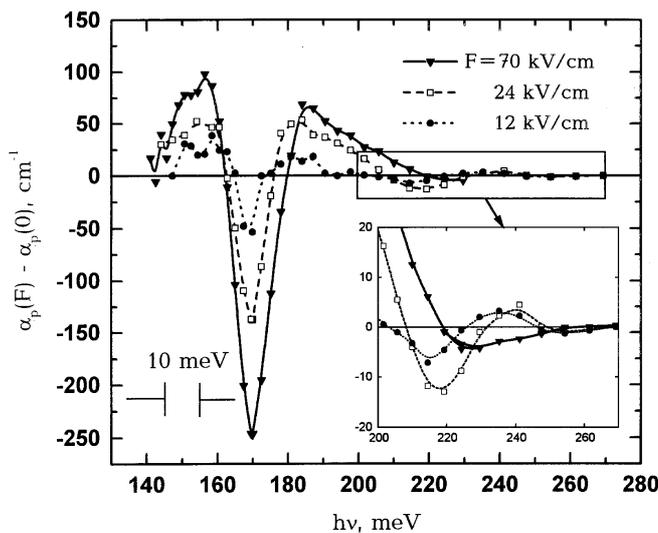


Рис. 2. Спектральные зависимости изменения коэффициента поглощения для света p -поляризации в поперечном электрическом поле.

Электрические измерения проводились в импульсном электрическом поле, чтобы избежать нагрева образца. Для повышения чувствительности измерительного тракта использовался синхронный детектор. Для волны s -поляризации электрооптическая модуляция отсутствовала во всем исследованном спектральном диапазоне. Измеренная спектральная зависимость модуляции поглощения для волны p -поляризации приведена на рис. 2.

В спектральной области $h\nu < 200 \text{ мэВ}$ характер наблюдавшихся спектров модуляции соответствует штарковскому сдвигу линии межуровневого поглощения $E_1 \rightarrow E_2$ в электрическом поле, а также ее уширению. На уширение линии указывает то, что для центральной части равновесного пика поглощения ($h\nu \approx 170 \text{ мэВ}$) увеличение напряженности внешнего электрического поля F приводит к оптическому просветлению образца: $\alpha_p(F) < \alpha_p(0)$, а слева и справа к полосе просветления примыкают области затемнения, в которых $\alpha_p(F) > \alpha_p(0)$. Это уширение связано с тем, что поперечное электрическое поле делает возможным туннелирование электронов с уровня E_2 в надбарьерное пространство. На рис. 3 показано, как увеличивается ширина линии межуровневого поглощения по мере возрастания поперечной разности потенциалов до $U = 17.5 \text{ В}$. Характер наблюдаемой зависимости качественно согласуется с расчетом [2]. Привязываясь к точке перегиба на этой кривой, которая соответствует полю $F^* = |E_2|/(eL_w)$, можно установить связь между величиной эффективной напряженности поперечного электрического поля F в структуре и измерявшейся в эксперименте разностью потенциалов U . Соответствующие значения F приведены на рис. 3 на верхней горизонтальной оси графика.

По равновесному спектру поглощения $\alpha_p(0)$ и по кривым модуляции $\alpha_p(F) - \alpha_p(0)$ можно восстановить неравновесные спектры поглощения в поперечном поле $\alpha_p(F)$. Анализ последних показывает, что максимальному электрическому полю, которое было достигнуто в эксперименте ($F = 70 \text{ кВ/см}$), соответствовал штарковский сдвиг линии межуровневого поглощения $+3 \text{ мэВ}$. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [6].

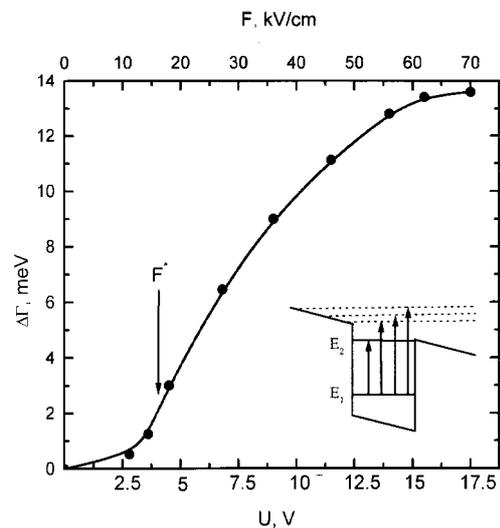


Рис. 3. Изменение ширины линии межуровневого поглощения ($E_1 \rightarrow E_2$) в зависимости от поперечной разности потенциалов U . На верхней горизонтальной оси указана напряженность поперечного поля в квантовых ямах. На врезке — схема оптических переходов для квантовой ямы, помещенной во внешнее электрическое поле.

Наиболее важным результатом работы, по нашему мнению, является экспериментальное обнаружение осцилляций в спектрах модуляции поглощения для поперечного поля при энергиях квантов $h\nu > 200$ мэВ. В отсутствие электрического поля в этой спектральной области наблюдается слабое оптическое поглощение, обусловленное оптическими переходами с уровня E_1 в континуум состояний над ямой. Согласно расчету [4], для ям, близких к резонансным, при $h\nu > |E_1| + |E_2|$ поглощение должно монотонно убывать с ростом энергии квантов, что и наблюдалось в эксперименте (рис. 1). Создание поперечного электрического поля приводит к трансформации энергетического спектра электронов в яме. На фоне континуума состояний над ямой в дополнение к редко расположенным уровням прямоугольной ямы возникает серия квазидискретных уровней, обусловленных линейным потенциалом внешнего поля. В результате в спектре оптического поглощения возникают пики, соответствующие переходам электронов с уровня E_1 на эти квазидискретные уровни. С увеличением напряженности поперечного поля расстояние между этими пиками увеличивается [2].

На вставке к рис. 2 показаны спектры электропоглощения в полосе фотоионизации вдали от линии межуровневого поглощения. При фиксированном поле электропоглощение квазипериодически меняет знак. С ростом напряженности внешнего поля F энергетический интервал между нулями на кривой модуляции монотонно увеличивается, что качественно соответствует расчету [2].

Варьируя модельные параметры в расчете и подгоняя его под эксперимент, можно в принципе независимо определить параметры квантовой ямы: ширину L_w и глубину V . Таким образом, с точки зрения метрики квантовых ям, исследования электропоглощения в поперечном поле являются достаточно информативными.

Авторы признательны А.Г.Петрову и А.Я.Шикю за обсуждение результатов исследований.

Работа поддержана частично РФФИ, гранты 96-02-17404 и 96-02-17961; РФФИ–INTAS, грант 00615i96; МНТРФ, грант 96-1029; МОПО, грант 95-0-7.2-159 и грант по программе "Университеты России", Государственной целевой программой "Интеграция", проект № 75.

Список литературы

- [1] V.F. Levine. J. Appl. Phys., **74**, R1 (1993).
- [2] А.Г. Петров, А.Я. Шик. ФТП, **24**, 1431 (1990).
- [3] Ф.Л. Серженко, В.Д. Шадрин. ФТП, **25**, 1579 (1991).
- [4] А.Г. Петров, А.Я. Шик. ФТП, **31**, 666 (1997).
- [5] A. Harwit, Jr. J.C. Harris. Appl. Phys. Lett., **50**, 685 (1987).
- [6] E. Rosencher, E. Martinet, F. Luc, Ph. Bois, E. Böckenhoff. Appl. Phys. Lett., **59**, 3255 (1991).

Редактор В.В. Чалдышев

Optical absorption modulation for GaAs/AlGaAs quantum wells in transverse electric field

L.E. Vorobjev, E.A. Zibik, D.A. Firsov, V.A. Shalygin, O.N. Nashchekina*, I.I. Saydashev*

St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia
* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract The results of experimental investigations of intraband light absorption spectra transformation due to effect of transverse electric field are presented. In addition to well-known Stark effect the absorption oscillations in photoionization band were found. They are caused by electron transitions from the ground state of the well to quasidiscrete levels, arising in continuum above the well due to linear potential of external electric field.

E-mail:vadim@phsc8.stu.neva.ru