

ДЕЙСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs, ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© В.Д.Азметов, Е.Б.Горохов, Н.Т.Мошегов, А.И.Торопов

Институт физики полупроводников

Сибирского отделения Российской академии наук,

630090 Новосибирск, Россия

(Получена 16 мая 1994 г. Принята к печати 31 января 1995 г.)

Исследованы изменения темнового тока, фототока, спектров фотопроводимости, инфракрасного поглощения на межподзонных переходах в структурах на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs, происходящие под действием облучения электронами с энергией 3.5 МэВ.

Обнаружено, что по мере увеличения дозы облучения наблюдаются: 1) снижение темнового тока, 2) рост отношения фототока к темновому току, 3) уменьшение межподзонного поглощения, 4) неизменность формы спектра фоточувствительности с максимумом на длине волны 8.5 мкм.

Представлено качественное объяснение наблюдаемых явлений, базирующееся на введении компенсирующих центров в ямах и барьерах при облучении. Предполагается использовать радиационные воздействия для локальной и общей корректировки параметров многоэлементных фотоприемников с квантовыми ямами.

Введение

В настоящее время достигнут существенный прогресс в создании дискретных и матричных фотоприемников для инфракрасной (ИК) области спектра на основе межподзонных переходов в структурах с квантовыми ямами на GaAs/AlGaAs, Si/SiGe и других полупроводниковых соединениях [1-6].

Одним из основных условий создания высококачественных матричных фотоприемников ИК излучения является высокая латеральная однородность электрических и фотоэлектрических свойств эпитаксиально выращенных гетероструктур с квантовыми ямами, используемых для изготовления ИК-фоточувствительных приборных структур [2,3,5].

В связи с этим представляется актуальной разработка методов локальной модификации электрических параметров ИК-фоточувствительных структур на основе квантовых ям после завершения ростовых процессов. В качестве модифицирующего воздействия могут быть использованы радиационные обработки, которые в зависимости от вида облучения способны обеспечить как высокую пространственную однородность, так и высокую локальность воздействия [7].

Цель данной работы — экспериментальное исследование действия электронного облучения на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства ИК-фоточувствительных многослойных структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

Методика эксперимента

Исследуемые ИК-фоточувствительные структуры изготавливались на слоях GaAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.25 \div 0.26$), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке «Катунь С», на подложках из полуизолирующего GaAs с ориентацией (100). Последовательность расположения (от подложки) и толщины выращенных слоев следующие: GaAs (буферный слой), n^+ -GaAs (нижний контактный слой, 1 мкм), $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (барьер, 500 Å), 40 периодов из GaAs (яма, 45 Å) и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (барьер, 500 Å), n^+ -GaAs (верхний контактный слой, 0.5 мкм). Контактные слои и ямы однородно легировались кремнием до концентрации $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На выращенных слоях фотолитографическим способом формировались меза-структуры диаметром 200 мкм. На нижнем и верхнем контактных слоях формировались омические контакты из Au/Ni/AuGe. Для возбуждения межподзонных переходов при нормальном падении света на подложку [8] на обратной стороне подложки травлением создавался периодический рельеф.

Измерения темнового тока, тока при засветке структуры от абсолютно черного тела, а также спектральной зависимости фотопроводимости проводились при 77 К. Регистрировались темновой ток в условиях фонового освещения, соответствующего 77 К, и ток при засветке от абсолютно черного тела с температурой 373 К со стороны подложки в телесном угле 0.8 ср. Спектры фотопроводимости регистрировались на частоте модуляции потока излучения 400 Гц с использованием призмённого монохроматора. Приведенные далее спектры фотопроводимости нормированы на фотоотклик неселективного теплового ИК фотоприемника (термостолбика).

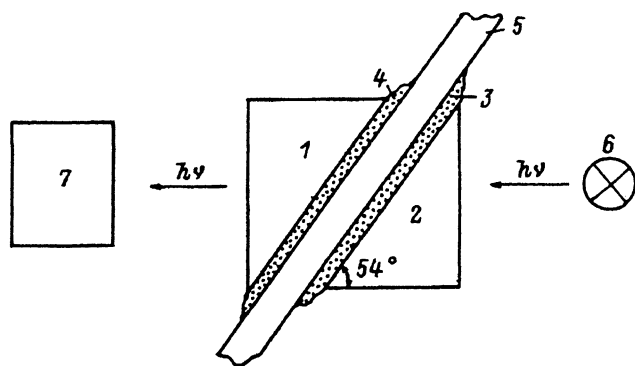


Рис. 1. Усилительная ячейка для измерений спектров межподзонного поглощения в квантовых ямах. 1, 2 — призмы из полуизолирующего GaAs; 3, 4 — прослойки из легкоплавкого инфракрасного стекла ИКС-35; 5 — исследуемый образец, 6 — источник ИК излучения; 7 — монохроматор.

Измерения ИК поглощения на межподзонных переходах проводились на сплошных слоях многослойных структур с квантовыми ямами GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As без контактных слоев, с толщинами ям и барьеров 75 и 280 Å соответственно, с количеством периодов 50. Центральная часть барьеров шириной 100 Å была легирована кремнием до уровня $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Спектры пропускания регистрировались при комнатной температуре на спектрофотометре Spexord-751R в *p*-поляризованном излучении с использованием усилительной ячейки, схематический вид которой приведен на рис. 1. Измеряемый образец помещался между двумя призмами из полуизолирующего GaAs с прокладками из инфракрасного легкоплавкого стекла ИКС-35, имеющего температуру размягчения 80°C и коэффициент преломления 2.4. Применение ячейки позволяло увеличить амплитуду пика в спектре пропускания в 5 раз по сравнению с пиком, регистрируемым в обычных условиях [9], за счет увеличения угла ввода излучения в образец.

Облучение исследуемых структур проводилось при комнатной температуре электронами с энергией 3.5 МэВ со стороны эпитаксиальных слоев. Измерения проводились спустя 0.5÷2 ч после облучения. Выборочные измерения спустя несколько дней после облучения показали, что измеряемые характеристики облученных структур остаются неизменными с точностью до нескольких процентов.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведено семейство вольт-амперных характеристик, измеренных как в темноте, так и в условиях освещения излучением абсолютно черного тела на меза-структуре, подвергнутой облучению в различных дозах. Положительная полярность напряжения на рисун-

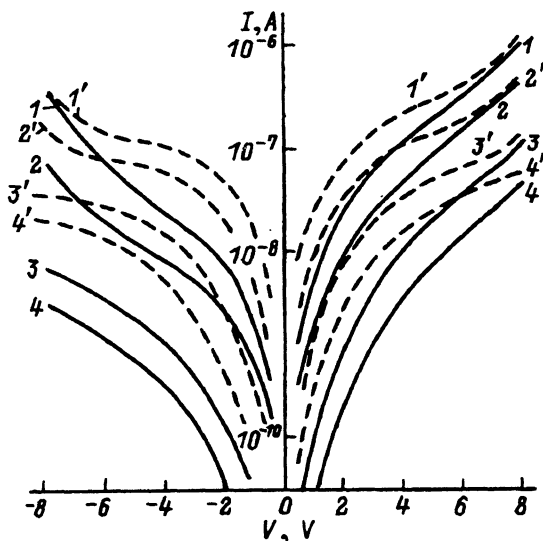


Рис. 2. Темновые (сплошные линии) и световые (штриховые линии) вольт-амперные характеристики исходных и облученных электронами ИК-фоточувствительных многослойных структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. $T = 77 \text{ K}$. Доза облучения, 10^{15} см^{-2} : 1, 1' — 0; 2, 2' — 2; 3, 3' — 4; 4, 4' — 5.

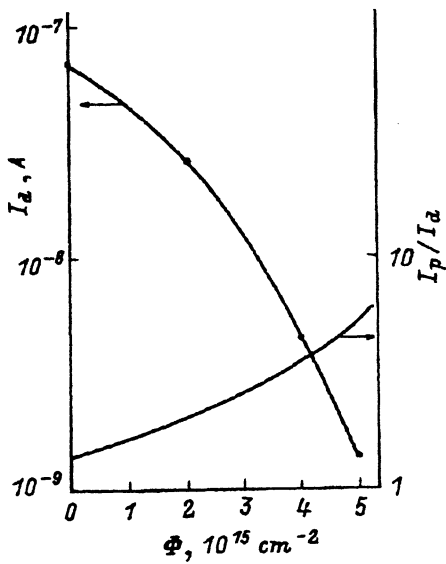


Рис. 3. Зависимости от дозы облучения Φ темного тока I_d и отношения фототока к темному току I_p/I_d в ИК-фоточувствительных многослойных структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. $T = 77$ К. Напряжение на верхнем контакте $+3$ В.

ке соответствует положительному потенциалу на верхнем контактном слое меза-структуры относительно нижнего контактного слоя. Видно, что во всем исследованном диапазоне напряжений, подаваемых на структуру, и во всем диапазоне доз наблюдается монотонное снижение по мере увеличения дозы облучения как темного тока, так и тока в условиях освещения. Обращает на себя внимание тот факт, что уменьшение темного тока с ростом дозы облучения происходит более стремительно, нежели уменьшение тока, измеренного при воздействии излучением абсолютно черного тела; особенно это заметно при больших отрицательных напряжениях на структуре (рис. 2).

На рис. 3 приведены дозовые зависимости темного тока I_d и отношения фототока I_p к темному току I_d для напряжения на структуре $+3$ В, близкого к рабочему при использовании структур с квантовыми ямами на GaAs/AlGaAs в качестве фотодетекторов [5]. (Фототок I_p определялся как разность между током в условиях воздействия излучением абсолютно черного тела и темновым током). Видно, что с увеличением дозы облучения наблюдается возрастание в несколько раз отношения I_p/I_d , в то время как I_d спадает почти на 2 порядка.

Относительные изменения обнаружительной способности D^* облученных структур приведены на рис. 4. По оси ординат отложено отношение фототока к квадратному корню из темного тока $I_p/\sqrt{I_d}$ (данное отношение пропорционально D^* [10]). Из рис. 4 видно, что диапазон изменений D^* невелик по сравнению с наблюдаемыми изменениями в темновом токе после облучения (рис. 3). При напряжениях на структуре в интервале примерно от -5 В до $+5$ В наблюдается уменьшение D^* по мере набора дозы облучения, в то время как при больших напряжениях смещения на структуре наблюдается увеличение D^* после облучения.

Несмотря на значительные изменения в темновом токе структур, повергнутых облучению, форма и положение спектральной полосы фототовета остаются практически неизменными, с максимальным фототокликом на длине волны 8.5 мкм, что отображено на рис. 5.

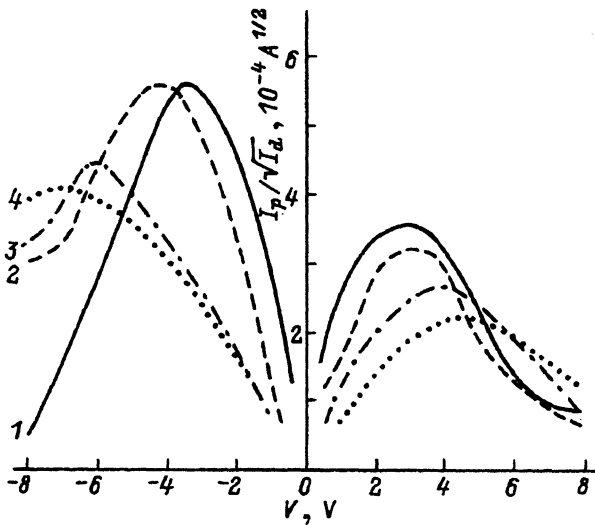


Рис. 4. Зависимости отношения $I_p/\sqrt{I_d}$ от напряжения на структуре. Доза облучения, 10^{15} см^{-2} : 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 5.

Таким образом, наиболее сильно изменяющейся при облучении характеристикой является темновой ток, а наиболее стабильной — спектр фотоотклика.

Основная причина наблюдаемых изменений электрических и фотоэлектрических характеристик облученных структур кроется, по-видимому, в радиационно-индуцированной перестройке примесно-дефектной подсистемы в эпитаксиальных слоях GaAs и AlGaAs, входящих в состав исследуемой структуры. Вклад краевых эффектов не представляется существенным, поскольку выборочные измерения темнового тока, приведенные на облученных структурах большей площади, показали аналогичные результаты.

Вызванные облучением изменения в примесно-дефектной подсистеме могут оказать влияние на поперечный электронный транспорт в многослойных структурах с квантовыми ямами по следующим причинам: 1) уменьшение заполнения подзон размерного квантования за счет введения компенсирующих уровней в запрещенной зоне GaAs, AlGaAs, на гетерогранице и (или) за счет уменьшения плотности донорных состояний; 2) модификация формы квантующего потенциала за счет добавки, создаваемой заряженными центрами, вводимыми облучением; 3) дополнительное рассеяние носителей заряда на введенных облучением ионизованных центрах. Основываясь только на вышеприведенных экспериментальных результатах, количественно оценить вклад каждой из причин представляется затруднительным. В настоящий момент мы склоняемся к тому, что обнаруженные эффекты обусловлены главным образом уменьшением заполнения подзон размерного квантования в результате облучения. В пользу того, что основной вклад в наблюдаемые явления вносит понижение концентрации носителей в ямах, говорят неизменность формы и положения спектральной полосы фотоотклика (рис. 5) и уменьшение интенсивности поглощения на межподзонных переходах при относительно небольших изменениях формы

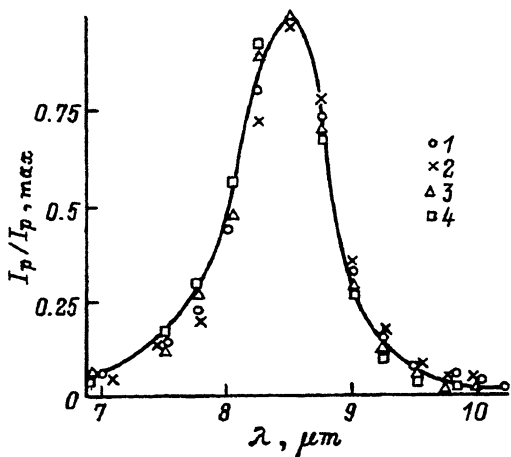


Рис. 5. Спектры фотоотклика ИК-фото-чувствительных многослойных структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs после различных доз облучения. $T = 77$ К. Спектры нормированы на максимальный фотоотклик $I_{p, \max}$. Доза облучения, 10^{15} см^{-2} : 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 5.

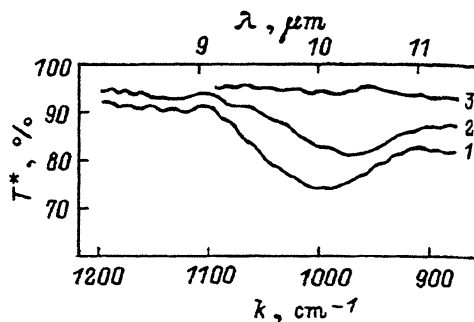


Рис. 6. Спектры межподзонного поглощения (T^* — оптическое пропускание) в облученных многослойных структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. $T = 300$ К. Доза облучения, см^{-2} : 1 — 0, 2 — $7.5 \cdot 10^{16}$, 3 — $1.5 \cdot 10^{17}$.

и положения полосы межподзонного поглощения (рис. 6) после облучения. При существенном вкладе двух других названных причин следовало бы ожидать заметного уширения и сдвига спектральных полос поглощения и фотопроводимости.

Снижением концентрации носителей в ямах при облучении структур качественно объясняется также и немонотонная зависимость обнаружительной способности от дозы облучения (рис. 4), поскольку в работе [11] установлено существование немонотонной зависимости D^* от уровня легирования.

Сравнительно быстрое уменьшение темнового тока с ростом дозы облучения может быть объяснено тем, что наряду с введением компенсирующих центров по всему объему эпитаксиальных слоев происходит ускоренная компенсация в отдельных местах — в областях, где содержание легирующей примеси повышено за счет сегрегации примеси на ростовых дефектах. Данные области имеют повышенный уровень заполнения подзон размерного квантования электронами и поэтому могут определять величину темнового тока в исходных структурах.

Количественное сопоставление скорости удаления электронов из ям при облучении электронами, сделанное в предположении, что фототок I_p пропорционален заполнению электронами нижней подзоны размерного квантования, с известными скоростями введения компенсирующих дефектов в объеме GaAs при облучении электронами [12] показывает, что учет введения компенсирующих радиационных дефектов только в ямах явно недостаточен для объяснения наблюдаемого уменьшения фототока в облученных структурах. Так, скорость введения компенсирующих центров в GaAs $\eta = dn/d\Phi$ (где n — концентрация центров, Φ — доза облучения) составляет около 7 см^{-1} [12], что должно привести к созданию около $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ компенсирующих центров после

облучения дозой $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Такая концентрация вводимых дефектов значительно ниже исходной концентрации доноров, $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и не может привести к наблюдаемому снижению фототока (рис. 2). Следовательно, ощутимый вклад в уменьшение заселенности подзон размерного квантования в облученных структурах вносят компенсирующие центры, создаваемые облучением в барьерных слоях и (или) на гетерограницах.

Выводы

Таким образом, в результате облучения высокоэнергетичными электронами ИК-фоточувствительных структур на основе легированных квантовых ям GaAs/AlGaAs происходят значительные, до двух порядков, снижение темнового тока, рост отношения фототока к темновому току при сохранении формы и положения спектральной полосы фотоотклика. Предложено объяснение наблюдаемых изменений за счет уменьшения заполнения подзон, экспериментально наблюдаемого в межподзонном поглощении. Снижение заселенности подзон вызвано в основном введением электрически активных радиационных дефектов. Обнаруженные эффекты могут быть использованы для локальной и общей корректировки параметров ИК-фотоприемных устройств с квантовыми ямами, изготовленных из полупроводниковых материалов, в которых имеет место компенсация при облучении.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Авторы благодарят А.М. Мищенко за любезно предоставленную возможность проведения предварительных тестовых измерений, О.П. Пчелякова, проф. Л.С. Смирнова за плодотворные дискуссии и поддержку работы, Г.Н. Камаева за облучение образцов.

Список литературы

- [1] Z.F. Paska, J.Y. Andersson, L. Lindqvist, C.-O.A. Ollson. *J. Cryst. Growth*, **107**, 845 (1991).
- [2] C.G. Bethea, B.F. Levine, V.O. Shen, R.R. Abbot, S.J. Hsieh. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **38**, 1118 (1991).
- [3] L.J. Kozlowski, G.M. Williams, G.J. Sullivan, G.W. Farley, R.J. Anderson, J. Chen, D.T. Cheung, W.E. Tennant, R.E. DeWames. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **38**, 1124 (1991).
- [4] R.P.G. Karunasiri, J.S. Park, K.L. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2588 (1991).
- [5] B.F. Levine. *J. Appl. Phys.*, **74**, R1 (1993).
- [6] В.А. Горбылев, И.Д. Залевский, А.И. Петров, А.А. Чельный, Г.Х. Аветисян, В.Б. Куликов, В.В. Чукичев, А.Э. Юнович. *ФТП*, **27**, 1453 (1993).
- [7] *Вопросы радиационной технологии*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1980).
- [8] G. Hasnain, B.F. Levine, C.G. Bethea, R.A. Logan, J. Walker, R.G. Malik. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2515 (1989).
- [9] L.C. West, S.G. Eglash. *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 1156 (1985).
- [10] B.F. Levine, A. Zussman, S.D. Gunapala, M.T. Asom, J.M. Kuo, W.S. Hobson. *J. Appl. Phys.*, **72**, 4429 (1992).
- [11] S.D. Gunapala, B.F. Levine, L. Pfeiffer, K. West. *J. Appl. Phys.*, **69**, 6517 (1991).
- [12] D.C. Look. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 843 (1987).

Effect of irradiation on optical and photoelectrical properties of IR-sensitive GaAs/AlGaAs quantum well structures

V.D. Akhmetov, E.B. Gorokhov, N.T. Moshegov, A.I. Toropov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Changes in the dark current, photocurrent, photoconductivity spectra and IR intersubband absorption caused by 3.5 MeV electron bombardment were observed in GaAs/AlGaAs quantum well structures. As the dose increased, the following processes were found to occur: 1) diminution of the dark current; 2) rise of the photocurrent-dark current ratio; 3) the lessening of the intersubband absorption; 4. the uniformity of the photosensitivity spectrum having a maximum at a wavelength 8.5 μm .
