

## ДИАГНОСТИКА БУФЕРНЫХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР ИЗ GaAs МЕТОДОМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© П.С.Белоусов, В.И.Гурюшев, А.С.Тагер, Ю.Ю.Федоров

Государственное научно-производственное предприятие «Исток»,  
141120 Фрязино, Россия  
(Получена 10 января 1996 г. Принята к печати 1 февраля 1996 г.)

Изучены спектры фотолюминесценции ( $T = 77$  и  $4.2$  К) многослойных эпитаксиальных структур из GaAs, выращенных на полуизолирующей подложке. Проведен сопоставительный анализ содержания фоновых примесей и дефектов в высокоомных буферных слоях с величиной их проводимости. Показано, что метод фотолюминесценции можно использовать для диагностики буферных слоев. Основным критерием совершенства слоев является отсутствие в них достаточно глубоких примесных и структурных дефектов типа  $D-V_{Ga}$ ,  $Ga_{As}(D-V_{Ga})$ ,  $V_{As}-Zn_{Ga}$ ,  $V_{As}-Si_{As}$  ( $D$  — дефект донорного типа), ответственных за полосы фотолюминесценции с энергией максимума излучения 1.20, 1.32, 1.35, 1.38 и 1.41 эВ соответственно.

Известно, что введение высокоомного буферного слоя между полуизолирующей подложкой арсенида галлия и активным слоем существенно улучшает параметры планарных полупроводниковых приборов. Во многом это связано с тем, что буферный слой экранирует активную область приборов от электрически активных дефектов, диффундирующих из подложки во время роста многослойных эпитаксиальных структур. При этом влияние подложки на характеристики приборов может быть полностью исключено.

Однако на эти характеристики влияет и качество самого буферного слоя, который также может содержать неконтролируемые примеси и дефекты, концентрация которых зависит от технологии его выращивания.

В настоящее время для контроля многослойных эпитаксиальных структур, как правило, используется вольт-фарадный метод [1]. При этом качество буферного слоя оценивается по виду (форме) восстанавливаемого профиля концентрации носителей заряда  $N(x)$  в области (активный слой-буфер) [2,3]. Однако именно здесь рассчитанные по данным измерений величины  $N$  и  $x$  существенно отличаются от ис-

тивных их значений. Это связано с отклонениями от используемой при расчетах модели идеального барьера Шоттки: нарушением приближения слоя обеднения, наличием примесных и структурных дефектов, образующих глубокие центры, последовательным сопротивлением необедненной части структуры, наличием потенциального барьера на границе раздела и т.д. [1,3].

В данной работе диагностика качества буферных слоев осуществлялась методом фотолюминесценции.

## 1. Методика эксперимента

Экспериментально исследовались структуры из арсенида галлия типа  $n^+ - n - n_{\sigma} - i$ , выращенные методом газофазной эпитаксии. Концентрации носителей заряда, определенные из вольт-фарадных измерений, лежали в пределах  $(1 \div 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в контактном слое,  $(1 \div 4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в активном слое, толщины этих слоев — в пределах  $100 \div 300 \text{ нм}$ . В буферных слоях в различных структурах величина концентрации носителей заряда была в пределах  $10^{12} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 1, а приведены типичные профили  $N(x)$  исследуемых структур, полученные вольт-фарадным методом. Кривая 1 соответствует эпитаксиальной структуре с высококачественным буферным слоем низкой проводимости. Кажущийся «всплеск» на зависимости  $N(x)$  (кривая 2) не является отражением реально существующего увеличения концентрации носителей заряда в переходной области между активным и буферными слоями, а указывает на наличие в исследуемой структуре потенциального барьера, который может быть обусловлен, в частности, прослойкой  $p$ -типа проводимости [2,3].

Величина и положение минимума  $N(x)$  определяются как концентрацией примесных и структурных дефектов, образующих потенциальный барьер, так и условиями эксперимента: частотой тестового сигнала, величинами паразитных емкостей и последовательного сопротивления необедненной части структуры. Это затрудняет диагностику буферных слоев.

В [4] показана возможность контроля качества буферных слоев многослойных эпитаксиальных структур путем измерения и анализа распределения по толщине структуры напряжения пробоя  $U_b$  обратного смещенного барьера электролит-полупроводник при фотостимулированном анодом окислении структуры. Установлено, что резкий рост восходящей ветви распределения  $U_b(x)$  соответствует высококачественному буферному слою с низкой проводимостью (рис. 1, б, кривая 1).

Наличие каких-либо аномалий (рис. 1, б, кривая 2) на этом участке профиля  $U_b(x)$  — насыщения, перегибов — вызвано присутствием дополнительного заряда в буферном слое и свидетельствует о его плохом качестве, так как наличие подобного заряда приводит к увеличению проводимости буферного слоя и ухудшает характеристики планарных приборов.

Для изучения спектров фотолюминесценции буферных слоев отбирались структуры с различной проводимостью буферного слоя, определяемой по описанной в [4] методике. Согласно [4], чем меньше проводимость и, следовательно, выше качество буферного слоя, тем большее

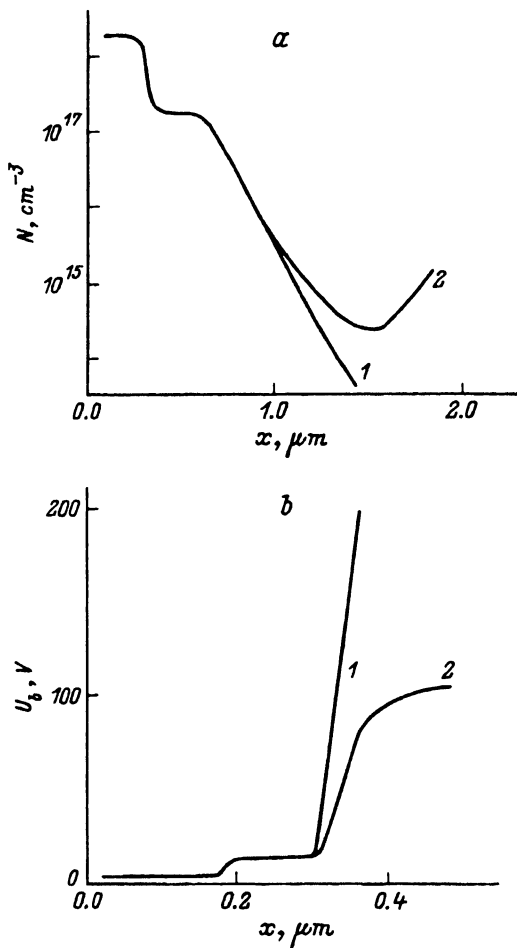


Рис. 1. Экспериментальные профили концентрации носителей заряда (а) и напряжения пробоя (б) для эпитаксиальных структур с низкой (1) и высокой (2) проводимостью буферного слоя.

значение  $U_b$  ему соответствует, причем на эпитаксиальных структурах с  $U_b > 180$  В, как правило, получаются хорошие по своим характеристикам приборы.

В исследуемых структурах значения  $U_b$  изменялись в пределах  $50 \div 220$  В. Спектры фотolumинесценции буферных слоев снимались при 77 и 4.2 К. Спектры фотolumинесценции буферных слоев снимались при 77 и 4.2 К. Возбуждение осуществлялось He-Ne-лазером (глубина поглощения света  $\sim 0.25$  мкм) после стравливания контактного и части активного слоев. Измерение фотolumинесценции проводилось в диапазоне  $1.10 \div 1.55$  эВ.

Концентрация  $N_r$  примесных и дефектных центров определялась по спектрам фотolumинесценции при 77 К (либо при 4.2 К) по отношению интенсивностей примесного ( $I_r$ ) и собственного ( $I_{cv}$ ) излучения, т.е.  $N_r = I_r / I_{cv}$ .

## 2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены измеренные при 77 и 4.2 К типичные спектры фотолюминесценции буферных слоев с высокой (им соответствует  $U_b = 50$  В) и низкой (для них  $U_b = 220$  В) проводимостью. Видно, что при 77 К первые по сравнению со вторыми характеризуются относительно малой интенсивностью зона-зона излучательной рекомбинации (ей соответствует полоса излучения с максимальной энергией излучения  $E_m = 1.507$  эВ [5]) и богатым набором интенсивных примесных полос излучения в длинноволновой части спектра фотолюминесценции. Наблюдались полосы излучения с  $E_m = 1.41, 1.38, 1.35, 1.32, 1.20$  эВ, связанные соответственно с дефектами  $V_{As}-Si_{As}$  [6],  $V_{As}-Zn_{Ga}$

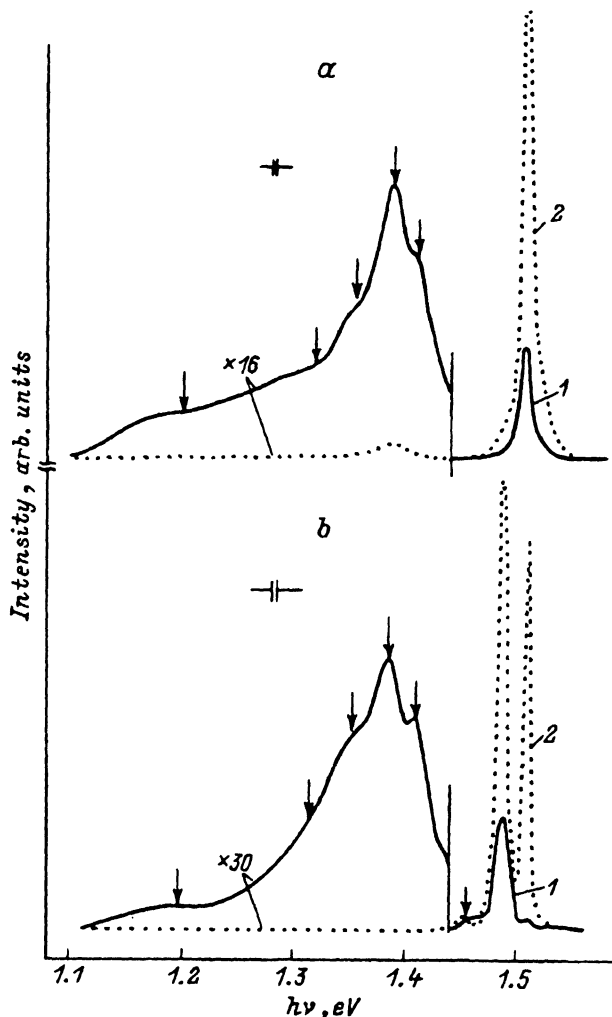


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции буферных слоев, измеренные при 77 (а) и 4.2 (б) К, с высокой (1) и низкой (2) проводимостью.

[<sup>5</sup>],  $V_{As}(D-V_{Ga})$  [<sup>7</sup>],  $Ga_{As}$  [<sup>8</sup>],  $D-V_{Ga}$  [<sup>5</sup>], где  $D$  — мелкая примесь донорного типа (в данном случае, вероятно,  $Si_{Ga}$ ).

При 4.2 К в обоих случаях появляется полоса излучения с  $E_m = 1.488$  эВ и ее фоновое повторение с  $E_m = 1.452$  эВ, а также полоса излучения с  $E_m = 1.512$  эВ, не наблюдавшиеся при 77 К вследствие их теплового гашения. Эти полосы обусловлены, соответственно, фоновыми примесными атомами  $Zn_{Ga}$  и связанными на нейтральных акцепторах экситонами [<sup>5,9</sup>].

Характерно, что для буферных слоев с низкой проводимостью при 4.2 К наблюдается примерное равенство интенсивностей примесной (1.488 эВ) и экситонной (1.512 эВ) полос излучения при высоком уровне интенсивности, при этом ярко выражено фоновое повторение примесной полосы излучения. Отсутствие в спектре экситонных пиков, связанных с мелкими донорными примесями, свидетельствует о низкой концентрации мелких доноров и относительной чистоте материала.

На рис. 3 приведены зависимости концентрации дефектов, выявленных методом фотолюминесценции, от величины  $U_b$ , характеризующей качество буферных слоев. Концентрация  $N_i$  каждого типа центров фотолюминесценции на рис. 3 нормирована на соответствующую максимальную концентрацию  $N_{max}$ , наблюдавшуюся в буферных слоях с наибольшей проводимостью, характеризовавшихся значением  $U_b = 50$  В.

Как видно, с ростом  $U_b$  наблюдается снижение концентрации практически всех центров, ответственных за полосы излучения в длинноволновой части спектров фотолюминесценции. В то же время обращает на себя внимание тот факт, что качество буферных слоев не зависит от концентрации атомов  $Zn_{Ga}$ , являющихся в GaAs мелкой акцепторной примесью (им соответствует полоса излучения с  $E_m = 1.488$  эВ при 4.2 К).

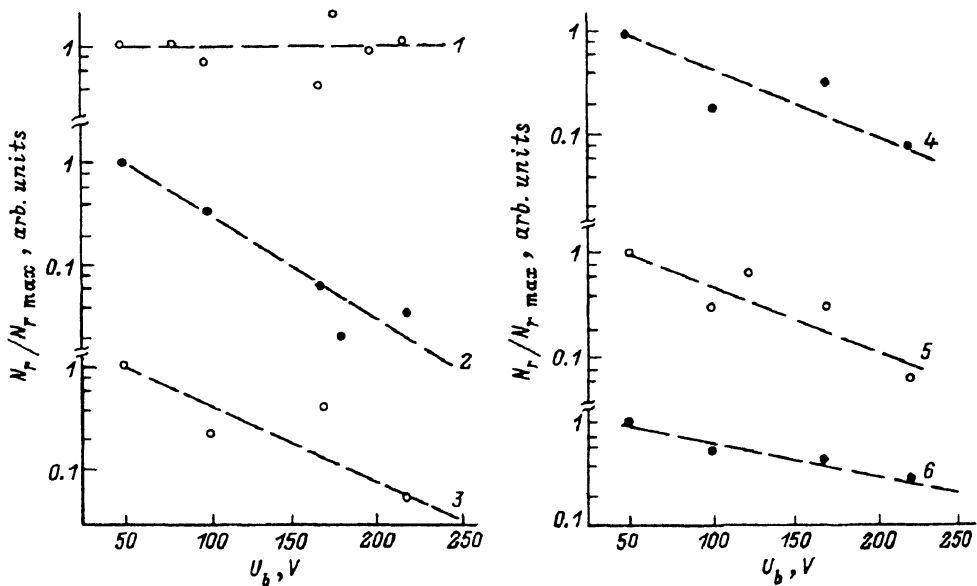


Рис. 3. Зависимости концентраций дефектов  $Zn_{Ga}$  (1),  $V_{As}-Si_{As}$  (2),  $V_{As}-Zn_{Ga}$  (3),  $V_{As}(D-V_{Ga})$  (4),  $Ga_{As}$  (5),  $D-V_{Ga}$  (6) от величины напряжения пробоя.

Обсудим полученные результаты. Несмотря на приповерхностную область возбуждения буферного слоя излучением He-Ne-лазера, спектр фотолюминесценции несет в себе информацию об интегральной концентрации излучающих центров во всей толщине буферного слоя, так как диффузионная длина носителей заряда в таких слоях составляет несколько микрон.

Как уже отмечалось, буферные слои различного качества отбирались по величине  $U_b$ . Эта величина обратно пропорциональна положительному заряду в области пространственного заряда обратного смещенного барьера Шоттки при пробое. Поэтому снижение величины  $U_b$  возможно как при завышенной концентрации донорной примеси, так и при образовании низкоомных прослоек в буферном слое вследствие неоднородности распределения донорных и частично компенсирующих их акцепторных примесных и структурных дефектов.

По-видимому, наблюдаемая на рис. 3 корреляция между концентрацией большинства излучающих примесных и структурных дефектов и значением  $U_b$  может быть следствием обеих указанных причин. В то же время отсутствие такой корреляции для атомов цинка  $Zn_{Ga}$ , вероятнее всего, свидетельствует о незначительном изменении их концентрации в различных буферных слоях, а также об однородности распределения этой примеси по буферному слою.

### 3. Заключение

Таким образом, несмотря на отсутствие каких-либо строгих количественных параметров, определяемых из спектров фотолюминесценции, сам вид таких спектров позволяет однозначно судить о качестве буферных слоев. Наиболее важным критерием их высокого качества является отсутствие достаточно глубоких примесных и структурных дефектов, ответственных за полосы излучения в длинноволновой части спектра фотолюминесценции. Показательно также, что доминирующие по концентрации остаточные мелкие примесные атомы  $Zn_{Ga}$  практически не оказывают влияния на проводимость буферных слоев. Этот факт позволяет проводить диагностику буферных слоев по спектрам фотолюминесценции при достаточно высоких (по крайней мере не ниже 77 К) температурах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-02-04449) и научного совета по программе «Физика твердотельных наноструктур» (проект 1-050).

### Список литературы

- [1] П. Блад, Д.В. Ортон. Зарубежн. радиоэлектрон., вып. 1, 3 (1981).
- [2] В.Я. Принц, В.А. Самойлов. Микроэлектроника, 18, 416 (1989).
- [3] Н.Б. Горев, С.А. Костылев, Т.В. Макарова, Е.Ф. Прохоров, А.Т. Уколов. ФТП, 23, 357 (1989).
- [4] С.Н. Филиппов, С.Д. Братишко, Ю.Ю. Федоров, Е.М. Огурцова, В.С. Соснин. Электрон. техн., сер. Электроника СВЧ, вып. 3 (417), 40 (1989).
- [5] К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, вып. 13, 16 (1973).
- [6] E.V.K. Rac, N. Duhamel. J. Appl. Phys., 49, 3458 (1978).

- [7] K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich, N.S. Zayats. Phys. St. Sol. (a), **82**, 503 (1984).
- [8] K.R. Elliot. Appl. Phys. Lett., **42**, 274 (1983).
- [9] Hal Bogardus, H. Barry Bebb. Phys. Rev. B, **176**, 993 (1968).

Редактор Л.В. Шаронова

## **Diagnostics of buffer layers of multi-layer epitaxial GaAs structures by a photoluminescence method**

*P.S. Belousov, V.I. Guroshev, A.S. Tager, Yu.Yu. Fedorov*

Istok State Research and Production Enterprise, 141120 Fryazino, Russia

---