

## Рентгенодифракционные и электронно-микроскопические исследования влияния $\gamma$ -излучения на многослойные гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs

© А.В. Бобыль<sup>¶</sup>, А.А. Гуткин, П.Н. Брунков, И.А. Загорянская, М.А. Яговкина,  
Ю.Г. Мусихин, Д.А. Саксеев, С.Г. Конников, Н.А. Малеев, В.М. Устинов,  
П.С. Копьёв, В.Т. Пунин\*, Р.И. Ильяев\*, Ж.И. Алфёров

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

\* Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ,  
Саров, Россия

(Получена 22 ноября 2005 г. Принята к печати 7 декабря 2005 г.)

Исследовано влияние  $\gamma$ -излучения на структурные изменения в транзисторных многослойных гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs. С помощью рентгенодифракционных измерений и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при  $\gamma$ -облучении с дозой выше  $\sim 3 \cdot 10^7$  рад начинается разрушение слоя GaAs, находящегося на поверхности таких структур. При дозе облучения  $10^8$  рад планарность поверхности значительно ухудшается и ее шероховатость достигает нескольких нанометров. Кроме того, в приповерхностном слое структуры под воздействием  $\gamma$ -облучения наблюдается образование дислокаций. Причина такого поведения поверхностного слоя может быть связана с существованием слоя окисла на его свободной поверхности и с возможными, индуцируемыми  $\gamma$ -облучением, химическими реакциями между атомами слоя и свободными радикалами, образующимися в окисле и в окружающей атмосфере. Заметных изменений структуры и состава тонкого слоя канала InGaAs при дозах до  $10^8$  рад не происходит.

PACS: 61.80.Cb, 68.35.Ct, 68.37.Lp, 68.55.Jk, 81.40.Wx

Многослойные гетероструктуры на основе полупроводников  $A^{III}B^V$  используются для изготовления приборов полупроводниковой микро- и оптоэлектроники, которые во многих случаях эксплуатируются в условиях действия различных радиационных факторов. В связи с этим при конструировании подобных приборов и прогнозировании их радиационной стойкости важной задачей является выяснение детальных причин изменения их свойств под влиянием ионизирующих излучений [1–4]. Этими причинами, кроме возникновения дефектов в объеме полупроводника, в приборах, представляющих собой многослойные гетероструктуры, могут быть изменение состава и толщины слоев и модификация гетерограниц между ними [5–8]. Однако подавляющее большинство исследований воздействия радиации на СВЧ приборы в настоящее время посвящено изучению изменений электрических свойств этих приборов и определению образующихся в них электрически активных дефектов. Указанные выше структурные изменения, также приводящие к изменению электрических характеристик приборов, исследованы мало.

В данной работе для изучения структурных изменений при воздействии  $\gamma$ -излучения на многослойные гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs использовались рентгенодифракционные измерения на двухкристальном дифрактометре в отражении  $004\text{-CuK}\alpha$ -излучения, а также просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Исследования проводились на выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией многослойных гетероструктурах на

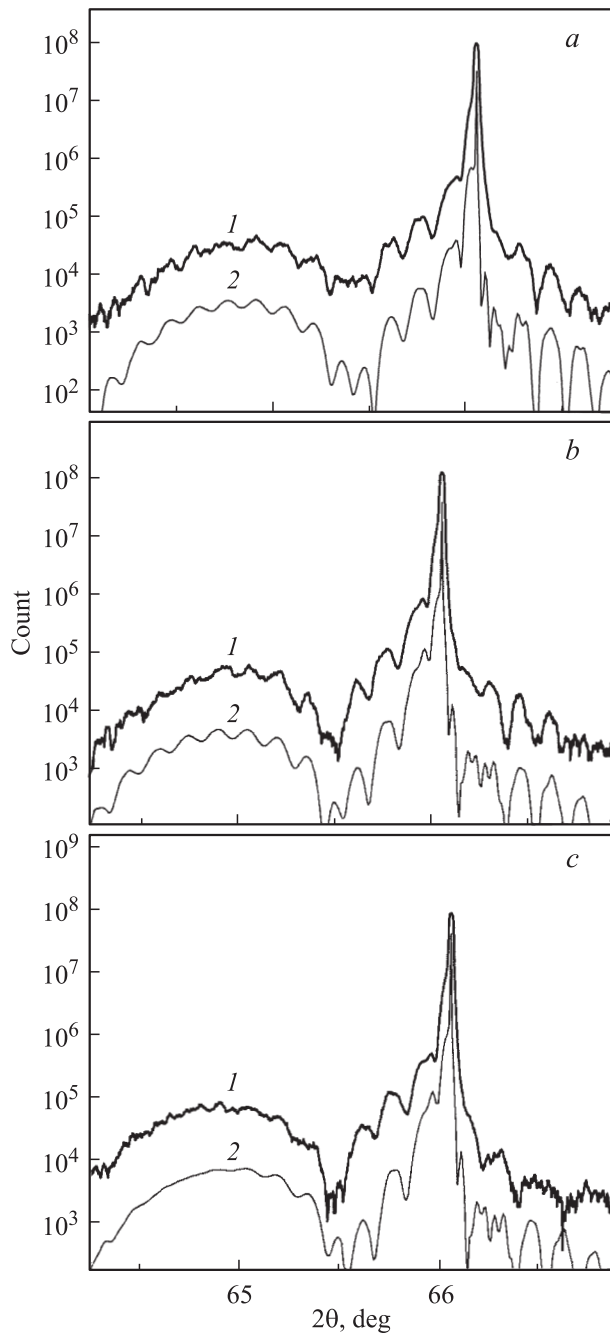
основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs, используемых для изготовления малошумящих СВЧ транзисторов. Структуры были выращены на подложке из GaAs (плоскость (001)) и состояли из следующих слоев.

1. Полуизолирующая подложка из GaAs толщиной 350 мкм.
2. Буферный слой GaAs толщиной 400 нм.
3. Сверхрешетка  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ , состоящая из 7 периодов шириной около 5 нм с равной толщиной слоев каждого материала.
4. Слой  $Al_xGa_{1-x}As$  толщиной  $\sim 133$  нм.
5. Сглаживающий слой GaAs толщиной  $\sim 1.5$  нм.
6. Канал  $In_yGa_{1-y}As$  толщиной  $\sim 15$  нм.
7. Сглаживающий слой GaAs толщиной  $\sim 0.5$  нм.
8. Слой  $Al_xGa_{1-x}As$  толщиной  $\sim 53$  нм и концентрацией электронов, изменяющейся от  $2.5 \cdot 10^{18}$  до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .
9. Контактный слой  $n$ -GaAs толщиной  $\sim 8$  нм.

Облучение образцов производилось  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  при комнатной температуре. Доза облучения изменялась от  $10^6$  до  $10^8$  рад, скорость облучения составляла  $10^6$  рад за 6.5 ч.

Как показали исследования, облучение с дозами менее  $3 \cdot 10^7$  рад практически не изменяло рентгенодифракционных кривых, что свидетельствовало об отсутствии заметных изменений строения и состава слоев исследуемых структур и гетерограниц между этими слоями. На рис. 1, а–с показаны примеры этих кривых для необлученного образца и образцов, подвергнутых облучению с дозой  $3 \cdot 10^7$  и  $10^8$  рад. Там же приведены результаты модельных расчетов рентгенодифракционных кривых.

<sup>¶</sup> E-mail: bobyly@theory.ioffe.ru

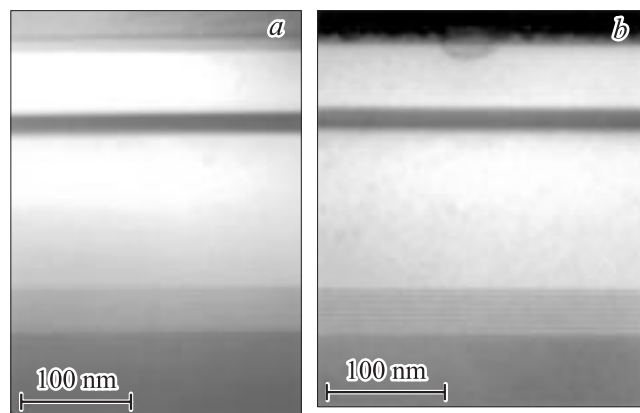


**Рис. 1.** Экспериментальные (1) и расчетные (2) рентгенодифракционные кривые для необлученного образца (а) и после облучения с дозой  $3 \cdot 10^7$  рад (b) и  $10^8$  рад (c).

При расчетах граница между подложкой и выращенным на ней буферным слоем из GaAs не учитывалась, а толщина подложки вместе с буферным слоем полагалась бесконечной, поскольку она намного превышала длину экстинкции рентгеновского излучения [9]. Как видно из рис. 1, а, расчетная дифракционная кривая многослойной структуры до облучения удовлетворительно согласуется с экспериментальной зависимостью. (Для суждения о степени ее соответствия эксперименту следует учесть,

что сигнал в минимуме этой кривой при  $2\theta \approx 65.5^\circ$  заметно ниже уровня шума, поэтому этот минимум в эксперименте не может наблюдаться). Параметры слоев структуры, отвечающие наилучшему соответствию расчета эксперименту (см. таблицу), в пределах точности определения их значений совпадают с величинами, задаваемыми при изготовлении структуры и измеренными с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2, а). Поскольку модельный расчет не учитывает упругие напряжения в слоях гетероструктуры, такое согласие показывает, что эти напряжения невелики.

Для образца, облученного с дозой  $10^8$  рад, дифракционная кривая заметно изменяется (рис. 1, c). В частности, крылья широкого дифракционного максимума, лежащего при  $2\theta = (64.5-65.5)^\circ$  и связанного с каналом из InGaAs [9], становятся более резкими. Кроме того, практически исчезают мелкие осцилляции вблизи вершины этого пика. Несколько модифицируется также вид дифракционной кривой и правее основного пика, связанного с подложкой ( $2\theta = 66^\circ$ ). Как показали расчеты рентгенодифракционных кривых, эти изменения можно связать с появившимися после  $\gamma$ -облучения с дозой  $10^8$  рад нарушениями в контактном слое 9, в результате которых толщина этого слоя в различных местах становится разной. Такой слой должен давать на рентгенодифракционной кривой интерференционные осцилляции, сдвинутые друг относительно друга для областей различной толщины. Суммирование этих осцилляций по площади наблюдения (около  $1 \text{ мм}^2$ ) дает заметное уменьшение их интегральной амплитуды. Такое суммирование было проведено при моделировании экспериментальной рентгенодифракционной кривой для дозы облучения  $10^8$  рад (рис. 1, c). При этом предполагалось, что контактный слой 9 имеет области толщиной 1, 4 и 6 нм, распределенные по площади с одинаковой вероятностью. Как видно из рис. 1, c, полученная модельная кривая хорошо согласуется с экспериментом.



**Рис. 2.** ПЭМ изображения поперечного сечения исследуемых структур до облучения (а) и после облучения с дозой  $10^8$  рад (b).

Параметры модели многослойной гетероструктуры, использованные при расчете рентгенодифракционных кривых

Номер слоя	Исходная структура		После облучения дозой			
			$3 \cdot 10^7$ рад		$10^8$ рад	
	Состав	Толщина, нм	Состав	Толщина, нм	Состав	Толщина, нм
3	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$	$(2.5 + 2.5) \times 7$	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$	$(2.5 + 2.5) \times 7$	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$	$(2.5 + 2.5) \times 7$
4	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	133	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	133	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	133
5	GaAs	1.5	GaAs	1.5	GaAs	1.5
6	$\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$	1.5	$\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$	1.5	$\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$	1.5
7	GaAs	0.5	GaAs	0.5	GaAs	0.5
8	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	53	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	53	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	53
9	GaAs	8	GaAs	6	GaAs	1–6

*Примечание.* Номера слоев в таблице соответствуют номерам, использованным при описании исследованных структур. Суммарная толщина подложки (слой 1) и буфера (слой 2) из GaAs считалась бесконечной.

Подобные нарушения приповерхностных слоев действительно были обнаружены в исследуемых образцах с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рис. 2, *a, b* приведены ПЭМ изображения поперечного сечения исследуемых структур до и после облучения с дозой  $10^8$  рад соответственно. Как видно из рис. 2, *b*, после облучения происходят сильные изменения в верхнем контактном слое 9 (GaAs) и на границе раздела между ним и слоем  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (слой 8).

В результате этих изменений планарность поверхности структуры значительно ухудшается, а толщина поверхностного слоя уменьшается. Величина шероховатости поверхности достигает нескольких нм, так что в отдельных местах толщина слоя 9 становится равной 0. Кроме того, на поверхности структуры из-за генерации большого количества точечных дефектов под воздействием  $\gamma$ -облучения наблюдается образование дислокаций, которые достигают гетерограницы между слоями 9 и 8 и проникают в слой 8 (рис. 2, *b*). Указанные выше нарушения контактного слоя появляются уже и при дозе облучения  $3 \cdot 10^7$  рад, но в значительно меньшей степени, чем при дозе облучения  $10^8$  рад. Они приводят к небольшому уменьшению эффективной толщины контактного слоя 9. И действительно, как видно из таблицы, для оптимального согласия между модельной и экспериментальной рентгенодифракционными кривыми при дозе  $3 \cdot 10^7$  рад приходится принять в расчетах меньшую толщину слоя 9. Следует также отметить, что модельные кривые для обоих облученных образцов соответствуют несколько меньшему содержанию In в канале (слой 6), чем расчетная кривая для исходного образца ( $y = 0.12$  и  $y = 0.13$  соответственно). Поскольку увеличение дозы облучения до  $10^8$  рад не приводит к дальнейшему изменению величины  $y$  (см. таблицу), такое небольшое расхождение может быть связано с неоднородностью распределения In по площади пластины или с релаксацией напряжений в канале после первой дозы облучения. Кроме того, расчеты модельных рентгенодифракционных кривых для структур с каналом  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , параметры которого отличаются от приведенных в таблице, показали, что изменение

толщины канала на 1 нм и (или) концентрации In в твердом растворе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  на  $\Delta y = 0.01$  приводит к заметному изменению этих кривых и ухудшает их согласие с экспериментом. Это позволяет заключить, что заметных изменений структуры и состава тонкого слоя канала при дозах до  $10^8$  рад не происходит. Последнее подтверждается исследованиями эффекта Холла, проведенными методом Ван-дер-Пау на контактах, вожженных через сильно легированные слои 8 ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) и 9 (GaAs). Результаты этих исследований показали, что при комнатной температуре средняя подвижность носителей заряда была на уровне  $4500\text{--}5200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и при максимальной дозе облучения уменьшалась не более чем на 2–3%. Это вполне можно объяснить образованием под влиянием  $\gamma$ -облучения точечных дефектов.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что помимо введения дефектов, являющихся центрами рекомбинации и рассеяния носителей в объеме полупроводниковых слоев многослойной структуры, существенное влияние на ее деградацию при  $\gamma$ -облучении с дозой порядка  $10^8$  рад может оказывать разрушение структуры тонких поверхностных слоев такой системы и гетерограницы между ними и последующим слоем. Причина такого поведения поверхностного слоя может быть связана с существованием слоя окисла на его свободной поверхности и с возможными, индуцируемыми  $\gamma$ -облучением, химическими реакциями между атомами слоя и свободными радикалами, образующимися в окисле и окружающей атмосфере.

При больших дозах облучения и недостаточной защите верхнего барьерного слоя в реальных полевых транзисторах это явление может существенно уменьшить его толщину. Поскольку последняя составляет несколько десятков нм, в результате облучения она может стать меньше критической (10–20 нм) [10], что приведет к падению концентрации электронов в канале [10] и выходу транзистора из строя.

Работа выполнена с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

## Список литературы

- [1] A. Simono, I. Debusschere, A. Alaerts, C. Claeys. IEEE Trans. Nucl. Sci., **39**, 1964 (1992).
- [2] А.В. Бобыль, Р.В. Конакова, В.К. Кононов, В.Г. Малинин, М.М. Малышев, И.В. Прокопенко, М.И. Слущкий, Ю.А. Тхорик. Электрон. техн. Сер. Управление качеством, № 4(151)–5(152), 31 (1992).
- [3] R.L. Pease. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50**, 539 (2003).
- [4] Todd R. Weatherford. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50**, 704 (2003).
- [5] M.J. O’Laughlin. IEEE Trans. Nucl. Sci., **35**, 1808 (1987).
- [6] A.A. Belyaev, A.E. Belyaev, R.V. Konakova, S.A. Vitusevich, V.V. Milenin, E.A. Soloviev, L.N. Kravchenko, T. Figelski, T. Wosinski, A. Makosa. Semicond. Phys., Quant. Electron. Optoelectron., **2**, 98 (1999).
- [7] B.D. White, M. Bataiev, S.H. Goss, X. Hu, A. Karmarker, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, W.J. Schaff, L.J. Brillson. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50**, 1934 (2003).
- [8] О.Ю. Борковская, Н.Л. Дмитрук, И.Б. Ермолович, Р.В. Конакова, В.В. Миленин. ЖТФ, **74**, 44 (2004).
- [9] Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. *Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография* (СПб., Наука, 2002).
- [10] А.В. Бобыль, П.С. Копьёв, Н.Н. Леденцов, А.М. Минтаиров, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, **16**, 90 (1990).

Редактор Т.А. Полянская

## The X-ray diffractometry and electron microscopy study of the $\gamma$ -radiation influence on AlGaAs/InGaAs/GaAs multilayer heterostructures

A.V. Bobyl, A.A. Gutkin, P.N. Brunkov,  
I.A. Zamoryanskaya, M.A. Yagovkina,  
Yu.G. Musikhin, D.A. Sakseev, S.G. Konnikov,  
N.A. Maleev, V.M. Ustinov, P.S. Kopjev,  
V.T. Punin\*, R.I. Ilkaev\*, Zh.I. Alferov

loffe Physico-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* The Russian Federal Nuclear Center VNIIEF,  
Sarov, Russia

**Abstract** Influence of  $\gamma$ -radiations on structural changes in transistor multilayer AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures has been investigated. With the help of X-ray diffraction measurements and through electronic microscopy it was found that the  $\gamma$ -irradiation with a dose is higher then  $\sim 3 \cdot 10^7$  rad results in destruction of GaAs layer on the surface of the structure. At a dose of irradiation  $10^8$  rad the roughness of the surface becomes considerably higher and reaches several nanometers. In addition, under influence of the  $\gamma$ -irradiation, the formation of dislocations is observed in the cap layer of the structure. The reason of such behavior of the cap layer can be related with the existence of oxide layer of on its free surface and an opportunity of chemical reactions, induced by the  $\gamma$ -irradiation, between atoms of a layer and free radicals formed in oxide and a surrounding atmosphere. There are no appreciable changes of the structure of thin InGaAs channel layer and its composition at doses up to  $10^8$  rad.