

Анализ низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур методом ВИМС-профилирования / Б.Я. Бер, А.В. Меркулов // Научное приборостроение. — 1992. — Т.2. — №4: Поверхность и методы ее исследования. — С. 31–34.

В работе представлены результаты экспериментов по получению распределения кремния в структурах  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs} : \text{Si}/\text{AlGaAs}$  с изолированными квантовыми ямами. Достигнуто разрешение по глубине порядка 2,5 нм. Показана необходимость использования высокого разрешения по массам. В работе приведен пример определения глубинных профилей концентрации в низкоразмерных структурах как при ионном травлении в режиме динамической ВИМС, так и в квазистатическом режиме ВИМС по методу "косого шлифа" с использованием высокого латерального разрешения. Библ. 5 назв. Ил. 6.

---

Б. Я. Бер, А. В. Меркулов

(Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург)

## АНАЛИЗ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕТОДОМ ВИМС-ПРОФИЛИРОВАНИЯ

*Precise control of dopant concentration and position is essential to the performance of semiconductor devices. The secondary ion spectroscopy (SIMS) technique has been revealed as a very powerful method for such determination. This paper deals with the search for satisfactory experimental conditions for the determination of Si doping level in GaAlAs /GaAs superlattices. Optimized conditions demonstrate satisfactory sensitivity in the range of  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , together with good depth resolution equal to about 2,5 nm. An example of alternative approach to SIMS profiling of semiconductor heterostructure using SIMS map on a beveled surface is presented.*

Вторично-ионная масс спектрометрия (ВИМС) является одним из наиболее мощных прямых методов определения концентрации элементов в тонких слоях. В связи с этим ВИМС-профилирование широко применяется при разработке технологии плупроводниковых гетероструктур на основе соединений  $A^3B^5$ , использующихся для изготовления современных оптоэлектронных и микроэлектронных приборов. ВИМС-профилирование позволяет получить распределение легирующей примеси, вводимой при эпитаксиальном росте таких структур. Основные требования при анализе полупроводниковых структур — высокая чувствительность и максимальное разрешение по глубине.

Разрешение по глубине вторично-ионных методов определяется несколькими физическими процессами, возникающими при ионной бомбардировке: каскадное атомное перемешивание, радиационно-стимулированная диффузия и неравномерность травления по дну кратера. Вклад каждого из перечисленных процессов зависит от условий травления. Для повышения послойного разрешения необходимо уменьшить глубину проникновения первичных ионов (существенно зависящую от их массы, энергии и угла падения [1]). Однако в случае изменения энергии первичного иона в используемом нами масс-спектрометре IMS 4F меняется и угол падения иона [2], что связано с наличием электростатического поля, вытягивающего вторичные ионы. Коэффициент распыления, как функция угла падения при ионной бомбардировке, вблизи  $60^\circ$  возрастает так, что изменение угла падения на  $0,2^\circ$  приводит к изменению коэффициента распыления на 1%, и, следовательно, к изменению скорости травления по площади кратера [3]. В связи с этим при исследовании низкоразмерных структур, залегающих на глубинах порядка 0,2 мкм и более, и при низких энергиях первичных ионов существенный вклад в разрешение по глубине вносит неравномерность скорости травления и вызванная этим непланарность дна кратера. Анализируемые вторичные ионы собираются со значительной части площади кратера (порядка 10%), что приводит к ухудшению разрешения по глубине, которое может быть записано в следующем виде [4]:

$$\Delta z = a + r(z) + \beta z^y + d(x, y, z).$$

Здесь  $\alpha$  учитывает фундаментальные физические процессы (атомное перемещение, внедрение первичных ионов, ионно-стимулированную диффузию);  $r(z)$  описывает влияние поверхностных микронеровностей;  $\beta z^\gamma$  учитывает ухудшение послойного разрешения с глубиной вследствие неравномерности скорости травления. Последний член зависит от положения, размеров области отбора вторичных ионов и распределения глубин в данной области.

Экспериментальные результаты, описанные в работе, получены на вторично-ионном масс-спектрометре IMS 4F фирмы CAMECA. Используя режим ионного микроскопа, можно визуально проследить динамику послойного травления по площади раstra. Было определено, что слои вскрываются неравномерно по полю

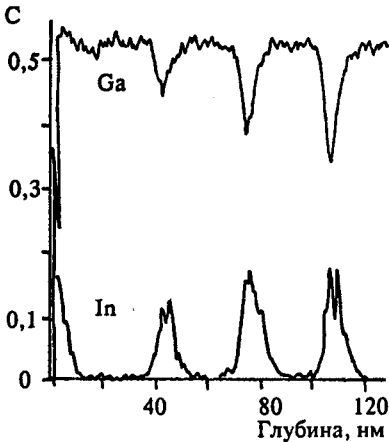


Рис. 1. Профиль послойного анализа структуры InGaAs (5 нм) / GaAs (30 нм).

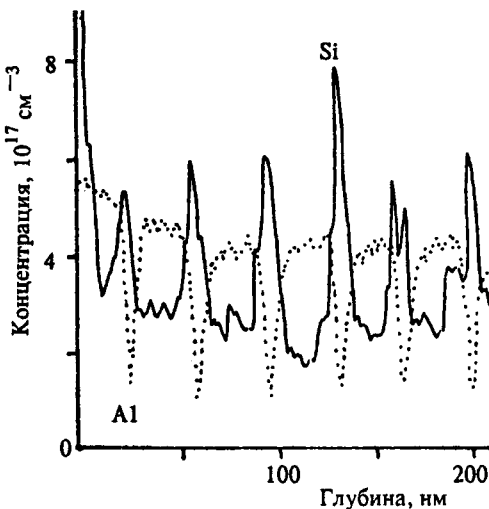


Рис. 2. Профиль распределения легирующей примеси Si в гетероструктуре  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  (30 нм) / GaAs (5 нм)...

раstra, а это свидетельствует о наклоне дна кратера по отношению к первоначально планарной поверхности образца. Для оптимизации режима травления и выбора области отбора вторичных ионов применялся тестовый образец, состоящий из трех квантовых ям InGaAs различного состава толщиной 5 нм, разделенных барьерами GaAs толщиной 30 нм. Профиль распределения относительных концентраций (C) In и Ga по глубине образца (рис. 1) получен в экспериментально определенных оптимальных условиях. Энергия

пучка первичных ионов  $\text{Cs}^+ E_p$  равнялась 2,2 кэВ. При этом угол падения пучка  $\theta = 56^\circ$  от нормали к образцу. Анализировались положительно заряженные вторичные ионы  $\text{In}_2^+$ ,  $\text{Ga}_2^+$ . Плотность тока первичных ионов  $\text{Cs}^+ j = 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ .

Выбранные параметры травления и сбора вторичных ионов использовались при исследовании распределения легирующей примеси Si по глубине в гетероструктуре с изолированными квантовыми ямами (001)  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  (30 нм) / GaAs (5 нм)..., выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии. В центральной части квантовой ямы GaAs производилось легирование кремнием до концентрации  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Профиль легирования, полученный при тех же экспериментальных условиях, представлен на рис. 2. Достижимое

разрешение по глубине составило величину 2,5 нм. Количественный ВИМС-анализ проводился с использованием калибровочных стандартов GaAs:Si, легированных методом ионной имплантации.

Следует отметить, что при изучении структур на основе соединений AlGaAs/GaAs, легированных Si, возникает ряд проблем, связанных с интерференцией в спектре масс вторичных ионов  $^{28}\text{Si}^+$  ( $M = 27,977$  а.е.м) и кластерных ионов  $^{28}\text{AlH}^+$  ( $M = 27,989$  а.е.м),

$^{28}\text{CO}^+$  ( $M = 27,994$  а.е.м),  $^{28}\text{N}_2^+$  ( $M = 28,006$  а.е.м) в слоях AlGaAs [5]. На рис. 3 показан типичный участок масс-спектра образца AlGaAs:Si, снятого в режиме высокого разрешения по массе ( $M/\Delta M = 4592$ ). Нали-

чие интенсивного пика  $\text{AlH}^+$  существенно ограничивает чувствительность при анализе кремния в AlGaAs/GaAs структурах. Поэтому в случае ВИМС-анализа необходимо использовать высокое массовое разрешение, несмотря на то, что при этом падает чувствительность. Все профили в данной работе сняты с разрешением  $M/\Delta M$  порядка 2500. При этом предел обнаружения Si в GaAs был не хуже  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Наряду с послойным профилированием для анализа основных компонентов в полупроводниковых гетероструктурах иногда применяется так называемый метод "косого шлифа". На рис. 4 схематично показана применяемая в этом методе форма образца. Распределение материала по поверхности образца исследуется в режиме микронда или микроскопа. В этом случае важным параметром является латеральное разрешение, определяемое, в основном, размером первичного пучка и aberrациями ионно-оптической системы. Формирование косого шлифа выполнялось *in situ* травлением ионным пучком  $\text{Cs}^+$  малой энергии ( $E = 2-3$  кэВ) по специально разрабо-

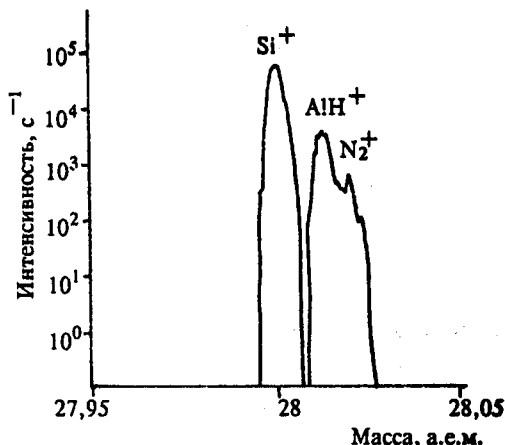


Рис. 3. Участок масс-спектра вблизи массы 28, измеренный в режиме высокого разрешения по массам, тестового образца AlGaAs, легированного Si.

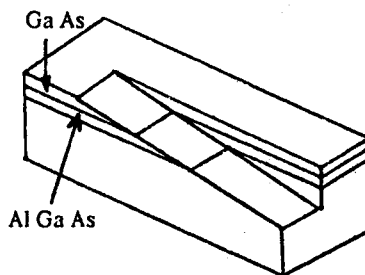


Рис. 4. Схематичное строение образца, используемого в методе "косого шлифа".

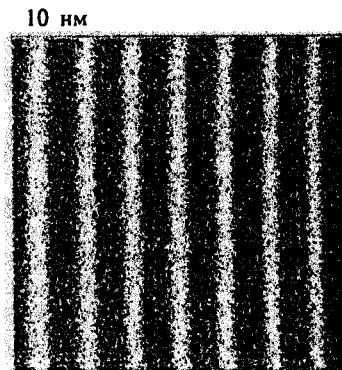


Рис. 5. Распределение Al по поверхности при исследовании методом "косого шлифа" многослойной структуры  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  (50 нм) / GaAs (50 нм).

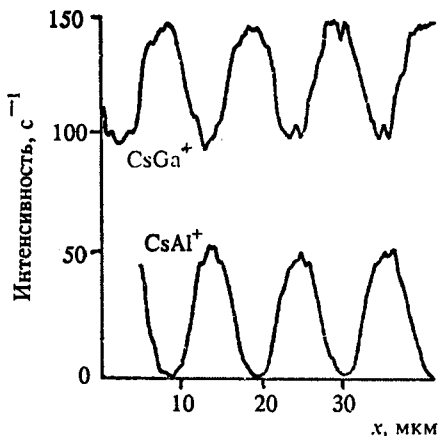


Рис. 6. Профиль распределения Al и Ga вдоль поверхности шлифа, изображенного на рис. 5.

танной программе, позволяющей достичь постоянного угла наклона шлифа. Угол выбирается в зависимости от диапазона исследуемых глубин. В используемом нами режиме микрозонда пучок ионов  $\text{Cs}^+$  обладал минимальными размерами порядка микрона при токе  $I_p = 2$  нА. ВИМС-карта (рис. 5) поверхности, снятая при измерении сигнала кластера  $\text{CsAl}^+$ , позволяет получить распределение основных элементов по поверхности косо шлифа (рис. 6). Здесь  $x$  — координата точки сканирования вдоль шлифа. Анализировались комплексные ионы  $\text{CsGa}^+$  и  $\text{CsAl}^+$ . Изменяя угол наклона шлифа, можно восстановить распределение основных элементов

гетероструктуры по глубине. Важно отметить, что в методе "косо шлифа" разрешение по глубине не зависит от глубины залегания исследуемых структур.

Таким образом, тонкое ВИМС-профилирование позволяет определить положение легированных слоев в низкоразмерных гетероструктурах точностью в несколько нанометров. Для уменьшения уровня фона при исследовании распределения легирующей примеси Si в структурах на основе AlGaAs/GaAs необходимо использовать высокое разрешение по массам. Используя высокое латеральное разрешение прибора, можно изучать различные структуры в широком диапазоне глубин. Все это делает ВИМС важной методикой в технологии оптоэлектронных приборов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Benninghoven A., Rudenauer F. G., Werner H. W. Secondary Ion Mass Spectrometry. New-York, 1987. 1242 P.
2. Meuris M., Bisschop P. De, Leclair J. F., Vandervorst W. // Surf. Interf. Anal. — 1989. — V. 14. — P. 739—743.
3. Bulle-Lieuwma C. W. T., Zalm P. C. // Ibid. — 1987. — V. 10. — P. 210.
4. McPhail D. C., Dowsett M. G., Fox H. e. a. // Ibid. — 1988. — V. 11. — P. 80—87.
5. Gaunear M., Chaplain R., Regreny A. e. a. // Ibid. — P. 545—552.

Рукопись поступила 28.07.92