

06.1

## Новый метод определения резкости гетеропереходов InGaAs/GaAs при послойном Оже-анализе

© М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов,  
О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: drm@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2001 г.

Впервые обнаружено, что явление ионно-стимулированной сегрегации индия может быть использовано для повышения разрешения по глубине при послойном Оже-анализе гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Показано, что посредством варьирования энергии распыляющего ионного пучка  $\text{Ar}^+ 1 \text{ keV} \rightarrow 0.5 \text{ keV}$  в области гетероперехода GaAs/InGaAs можно оценить резкость гетероперехода с разрешением порядка 0.5 nm, определяемым разностью длин проективных пробегов ионов  $\text{Ar}^+$  с энергиями 1 и 0.5 keV и не связанным с глубиной выхода Оже-электронов.

**1. Введение.** Информативность послойного элементного анализа методом электронной Оже-спектроскопии в значительной степени зависит от разрешения по глубине ( $\Delta Z$ ), достигнутого при исследовании анализируемых структур. При оптимизированных условиях ионного распыления разрешение по глубине определяется глубиной выхода Оже-электронов и артефактами ионного распыления в каскаде столкновений. Для распыляющих ионов низких энергий (ниже 1 keV) предельная величина  $\Delta Z$  составляет  $1 \div 1.2 \text{ nm}$  [1,2]. В случае полупроводниковых структур дополнительное влияние на величину  $\Delta Z$ , как правило, оказывают ионно-стимулированные процессы диффузии и сегрегации, предельное значение  $\Delta Z$  при этом составляет  $1.5 \div 2 \text{ nm}$ . При исследовании полупроводниковых структур с гетеропереходами такое значение  $\Delta Z$  заметно превосходит характерную величину неоднородности структуры, при этом не удается даже различить несколько структур, изготовленных в разных режимах роста, но отличающихся в пределах величины  $\Delta Z$ . В то же время в работе [2] предполагалось, что при

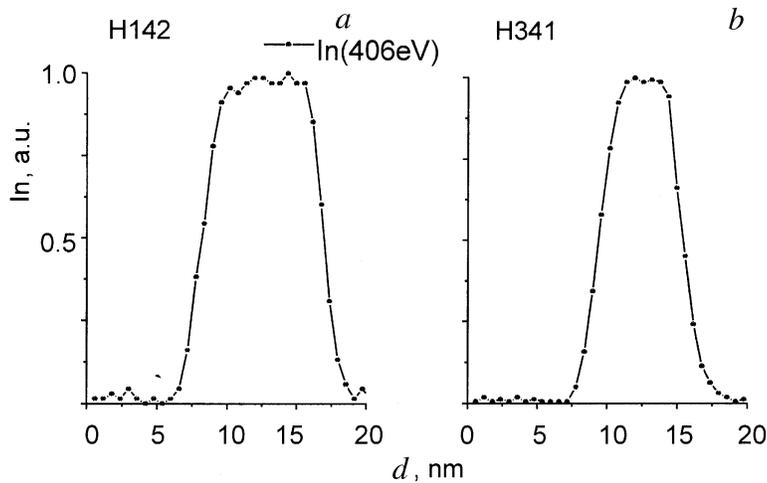
сегрегации направленный перенос атомов к распыляемой поверхности от залегающего вблизи поверхности слоя может компенсировать размытие фронта из-за атомного перемешивания в каскаде столкновений и диффузионных процессов. Это могло бы привести к любопытной ситуации — улучшению разрешения по глубине в результате влияния ионно-стимулированных процессов. Однако данный эффект до сих пор не наблюдался, на наш взгляд, позитивное для послойного анализа влияние сегрегации подавляется преимущественным распылением атомов с поверхности, — как правило, атомы, подверженные влиянию сегрегации, имеют и большие коэффициенты распыления и селективно распыляются с поверхности [3,4].

В данной работе предлагается новый подход к проведению послойного Оже-анализа структур с резкими переходами, при котором может проявиться позитивное влияние направленного переноса атомов к поверхности в результате эффекта сегрегации. Он заключается в варьировании энергии распыляющих ионов при послойном анализе непосредственно в области резкого изменения профиля элементов. Варьирование энергии ионов в процессе распыления поверхности однородных многокомпонентных материалов давно используется для анализа механизмов взаимодействия ионов с распыляемой поверхностью [5,6]. Такие исследования позволяют разделить, вследствие различного характера их нестационарного отклика, явления преимущественного распыления, имплантации атомов отдачи, атомного перемешивания в каскаде столкновений, а также радиационно-стимулированные процессы диффузии и сегрегации. Применительно к неоднородным структурам такой способ можно рассматривать в качестве своеобразного нестационарного метода послойного анализа, при котором в процессе анализа конкретных областей в результате изменения энергии распыляющих ионов варьируется функция разрешения по глубине, что позволяет выделить вклад реального профиля распределения элементов неоднородной структуры. Насколько нам известно, такая возможность ранее не обсуждалась. Можно отметить лишь работы [7,8], в которых вариация энергии ионов применялась при анализе многослойных структур Mo/Si и Ge/Si для идентификации артефактов ионного распыления — атомного перемешивания или развития шероховатости поверхности.

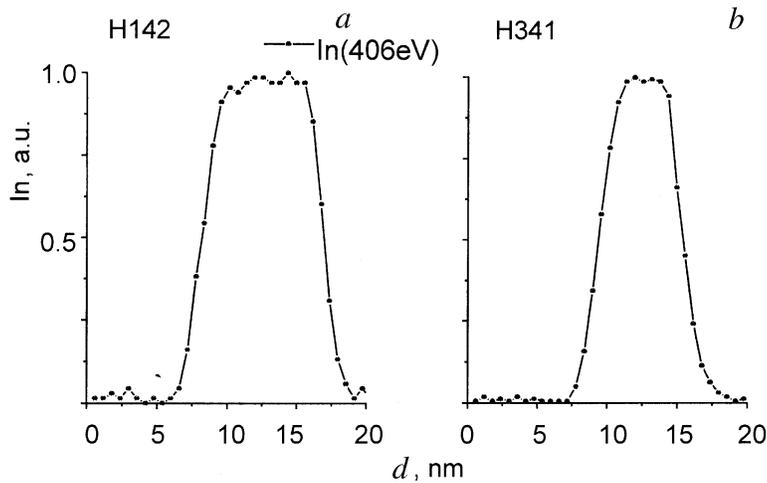
**2. Эксперимент.** В работе проводилось исследование серии многослойных гетероструктур GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с квантовыми ямами, изготовленных методом металлоорганической газофазной эпитаксии в

различных режимах роста. Типичными структурами являются образцы Н142 и Н341. Толщина слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в структуре Н142 составляла 10 nm, в структуре Н341 — 7 nm. Величина "x" в этих структурах составляла 12%. Послойный Оже-анализ проводился на Оже-спектрометре ЭСО-3, распыление осуществлялось ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 0.5 и 1 keV, угол падения ионов составлял  $38^\circ$  к нормали к поверхности образца. Детали послойного анализа приведены в наших работах [9,10]. Для калибровки скорости распыления дополнительно изготавливались многослойные тест-структуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ , в которых толщина слоев измерялась методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-4.

**3. Результаты и обсуждение.** Типичные Оже-профили структур приведены на рис. 1, *a, b*. Несмотря на различные условия роста структур Н142 и Н341, распределение In в них оказывается близким. Ширина переходов In на уровне  $0.2 \div 0.8$  от максимального значения на рис. 1, *a* и *b* составляет около  $1.4 \div 1.6$  nm, большей точности в определении резкости переходов традиционный послойный Оже-анализ обеспечить не может. На рис. 2, *a, b* приведен вид распределения In в



**Рис. 1.** Распределение In в структурах Н142 (*a*) и Н341 (*b*) при постоянной энергии распыляющего ионного пучка Ar, равной 0.5 keV.



**Рис. 2.** Распределение In в структурах N142 (*a*) и N341 (*b*), полученное при варьировании энергии распыляющего ионного пучка  $1 \text{ keV} \rightarrow 0.5 \text{ keV}$  на переднем фронте профиля.

этих же структурах, полученных при переключении энергии распыляющих ионов с  $1 \text{ keV}$  на  $0.5 \text{ keV}$  на переднем со стороны поверхности фронте слоя InGaAs. Рис. 2, *a* и *b* демонстрируют существенно различающееся поведение In. В структуре N142 после снижения энергии ионов наблюдается всплеск In и резкий его спад на масштабе глубины травления менее  $1 \text{ nm}$ . Эта структура была не единственной, такое же поведение In при вариации энергии ионов наблюдалось и в ряде других структур. В то же время распределение In в структуре N341 имеет совершенно иной вид — при вариации энергии ионов на том же участке фронта слоя, что и на рис. 2, *a*, наблюдается лишь более замедленный плавный рост In.

На наш взгляд, наблюдаемое поведение In связано с влиянием процесса ионно-стимулированной сегрегации In при анализе. Перенос атомов при ионно-стимулированных явлениях происходит на масштабе диффузионной длины вблизи поверхности, минимальная ее величина совпадает с протяженностью каскада столкновений, близкой к проективной длине пробега ионов  $L_p$ . При послойном анализе с

энергией 1 keV атомы In появляются на распыляемой поверхности GaAs, когда фронт кратера распыления приблизится к слою InGaAs на расстояние  $L_p^{(1)}$ . Концентрация In на поверхности будет определяться балансом противоположно действующих эффектов сегрегации и преимущественного распыления In [4], ее регистрируемая интенсивность определится усреднением по глубине выхода Оже-электронов. При скачкообразном переключении энергии ионов  $1 \text{ keV} \rightarrow 0.5 \text{ keV}$  длина их проективного пробега  $L_p^{(2)}$  уменьшится. В случае резкого гетероперехода область, в которой происходит ионно-стимулированный перенос атомов, уже не будет достигать слоя InGaAs, что и вызывает резкий его спад и дальнейшее возрастание лишь после стравливания некоторого дополнительного слоя GaAs (рис. 2, *a*). Ясно, что при спаде концентрации In на поверхности преимущественное распыление In уже не оказывает такого компенсирующего влияния на вид профиля, как это обсуждалось выше. В случае более плавного перехода уменьшение  $L_p$  не приводит к заметным последствиям в профиле In (рис. 2, *b*) из-за малого градиента In в области между проективными длинами  $L_p^{(2)}$  и  $L_p^{(1)}$ .

Таким образом, характерным масштабом разрешения по глубине в предлагаемой методике стационарного послойного Оже-анализа является величина порядка разности  $L_p^{(1)}$  и  $L_p^{(2)}$ , не связанная с глубиной выхода Оже-электронов. Согласно [11,12], для ионов  $\text{Ar}^+$  с энергиями 1 и 0.5 keV в GaAs эта величина составляет около 0.5 nm. Рис. 2, *a* и *b* позволяет однозначно различить структуры H142 и H341; в структуре H142 ширина гетероперехода меньше указанной величины, в структуре H341 — больше. Конечно, в данном варианте послойного анализа только оценивается резкость перехода, вид его при этом не воспроизводится. Распределение элементов в области гетероперехода может быть восстановлено путем математической обработки полученных экспериментальных результатов с учетом функции разрешения по глубине. Необходимое для этого исследование ионно-стимулированных явлений в полупроводниковых гетероструктурах и их влияния на результаты послойного анализа будет проведено в ближайшее время.

**4. Заключение.** В данной работе впервые наблюдалось явление резкого возрастания и спада концентрации In в гетероструктурах GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs на масштабе меньше 1 nm при вариации энергии распыляющих ионов  $1 \text{ keV} \rightarrow 0.5 \text{ keV}$  в области гетероперехода. Мы связываем этот эффект с проявлением ионно-стимулированной сегре-

гации — направленного переноса In к поверхности при прохождении фронтом распыления области гетероперехода. Предложенная методика нестационарного послыонного анализа позволяет оценить резкость гетероперехода на масштабе длин порядка  $L_p^{(1)} - L_p^{(2)} \approx 0.5$  nm, не связанном с глубиной выхода Оже-электронов, и отчетливо разделить структуры, имеющие близкие профили элементов при традиционном послыонном Оже-анализе. Конечно, такой подход может быть использован только для структур с заметным проявлением эффекта ионно-стимулированной сегрегации. Однако класс таких структур может быть достаточно широк и включать не только системы InGaAs/GaAs, но и другие полупроводниковые гетероструктуры: AlGaAs/GaAs, Ge/Si, а также металлические многослойные структуры.

Работа поддерживалась РФФИ, проекты № 99–02–18037 и № 00–02–16141, и программой "Поверхностные атомные структуры".

## Список литературы

- [1] Hofmann S. // Rep. Prog. Phys. 1998. V. 61. P. 827–888.
- [2] Hofmann S. // J. Vac. Sci. Technol. 1991. V. A9. N 3. P. 1466–1476.
- [3] Lam N.Q. // Surf. Interface Anal. 1988. V. 12. N 1. P. 65–77.
- [4] Kelly R. // Surf. Interface Anal. 1985. V. 7. N 1. P. 1–7.
- [5] Betz G., Wehner G.K. // Topics in Applied Physics. V. 52 / Sputtering by Particle Bombardment II / Ed. by R. Behrisch. Berlin: Springer-Verlag, 1983. Chap. 2 (Пер.: Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1986. 484 с.).
- [6] Malherbe J.B. // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 1994. V. 19. N 3. P. 129–196.
- [7] Koncol A., Sulyok A., Menyhard M., Barna A. // J. Vac. Sci. Technol. 1994. V. A12. N 2. P. 436–442.
- [8] Menyhard M., Barna A., Biersack J.P., Jarrendahl K., Sundgren J.-E. // J. Vac. Sci. Technol. 1995. V. A13. N 4. P. 1999–2004.
- [9] Дроздов М.Н., Данильцев В.М., Дроздов Ю.Н., Мастеров Д.В., Хрыкин О.И., Шашкин В.И. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 4. С. 61–66.
- [10] Дроздов М.Н., Данильцев В.М., Салащенко Н.Н., Полушкин Н.И., Хрыкин О.И., Шашкин В.И. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 18. С. 1–7.
- [11] Wittmaack K. // Vacuum. 1984. V. 34. N 1–2. P. 119–137.
- [12] Hofmann S. // Surf. Interface Anal. 1994. V. 21. P. 673–678.