

06;11;12

СВЕРХВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРИ ПОСЛОЙНОМ ОЖЕ-АНАЛИЗЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ С ГЛУБОКО ЗАЛЕГАЮЩИМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

© М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов,
Д.В. Мастеров, О.И. Хрыкин, В.И. Шаликин

1. Достигнутый к настоящему времени уровень проведения послойного элементного анализа методом электронной Оже-спектроскопии часто характеризуется термином "сверхвысокое разрешение по глубине" [1]. При этом предполагается, что реализованное разрешение свободно от многочисленных случайных погрешностей инструментального характера и связанных с подготовкой образца и его свойствами и определяется лишь фундаментальными процессами взаимодействия электронов и распыляющих ионов с анализируемой поверхностью. Минимальная протяженность области взаимодействия определяется информационной глубиной метода — глубиной выхода Оже-электронов и допускает лишь незначительные вариации для конкретного типа структур. В то же время протяженность области взаимодействия распыляющих ионов с атомами твердого тела может значительно изменяться в зависимости от условий распыления, и в первую очередь — от энергии, массы и угла наклона ионного пучка. Известно, что для повышения разрешения по глубине необходимо снижать энергию распыляющего ионного пучка [1-4]. Есть примеры проведения послойного Оже-анализа структур разного типа с разрешением 1.0-1.5 нм при низких энергиях ионов $E_i \leq 1$ кэВ, ограниченным практически глубиной выхода Оже-электронов [1-3]. Однако до сих пор отсутствуют работы, в которых подобное разрешение было бы реализовано для достаточно больших глубин анализа $Z > 100$ нм. Конечно, причины снижения разрешения с глубиной анализа достаточно многообразны и в каждом конкретном случае могут действовать разные из них. В то же время, насколько нам известно, ни одна из современных моделей Оже-спектрометров просто не позволяет проводить послойный анализ низкоэнергетическими ионами $E_i \approx 500$ эВ на такую глубину: в ионных пушках с горячим катодом при $E_i \approx 500$ эВ скорость распыления ограничена несколькими десятками нанометра в минуту, так что требуемые времена анализа превышают

разумные значения, а в дуоплазматронных и жидкометаллических ионных источниках с большей плотностью тока снижение энергии ионов до таких значений невозможно.

В настоящей работе предлагается новая методика послойного Оже-анализа, которая заключается в чередовании энергии ионного пучка в процессе анализа: высокоэнергетического, с большой скоростью распыления при проходе толстых 'буферных слоев, и низкоэнергетического при анализе интересующих областей — тонких глубоко залегающих слоев и областей перехода. Конечно, преимущества этой методики далеко не бесспорны, поскольку при распылении ионами более высоких энергий в анализируемой структуре будет формироваться приповерхностный измененный слой, протяженность которого может и не позволить проявиться особенностям распыления низкоэнергетическими ионами. Мы исследуем применимость такого подхода для анализа гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с квантовыми ямами. Эти структуры в последнее время привлекают внимание как перспективные материалы оптики и микроэлектроники. Исходная атомарно-гладкая поверхность структур и аморфизация измененного слоя полупроводника в процессе распыления и, как следствие, снижение зависимости коэффициента распыления от кристаллографических направлений [1,4] позволяют надеяться на снижение дополнительных артефактов ионного распыления, таких как развитие микрорельефа поверхности для больших глубин анализа.

2. Гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Н126, Н128, Н131 и Н142 были изготовлены методом металлоорганической газофазной эпитаксии. В структурах Н128 и Н131 слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($X = 8\%$) толщиной 5 и 3 нм соответственно расположен на глубине 0.1 мкм. Структура Н142 включала пять слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($X = 14\%$) толщиной по 10 нм каждый, расположенных на глубине 100, 200, 300, 400 и 500 нм. Структура Н126 представляла собой слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной 1 мкм с $X = 23\%$. Структуры Н126 и Н142 использовались для калибровки состава In , величина X в них дополнительно определялась методом рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-4. Данные по фотолюминесценции для структур типа Н128, Н131 обсуждаются в работе [5].

Послойный элементный анализ проводился на Оже-спектрометре ЭСО-3 со стационарным ионным пучком Ar , основные экспериментальные параметры приведены нами ранее (см., например, [6,7]). Отметим лишь, что при анализе на большую глубину особое внимание необходимо уделить устранению наклона дна кратера ионного распыления в зоне анализа, что может быть достигнуто путем тщательной

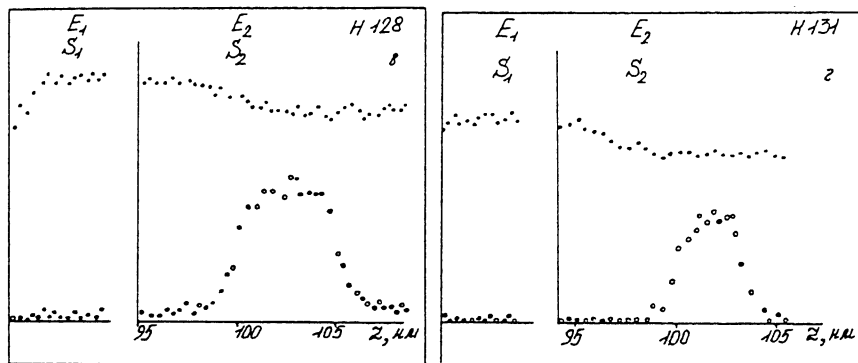
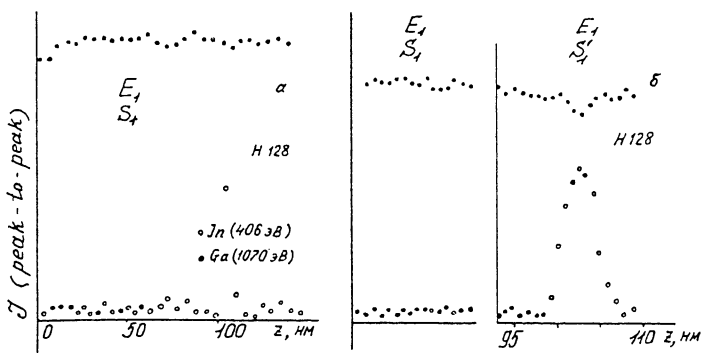


Рис. 1. Распределение элементов в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ H128 (а-б) и P131 (в). Энергия ионов Ar^+ $E_1 = 2$ кэВ, $E_2 = 0.5$ кэВ. Скорость распыления $S_1 = 2.5$ нм/мин, $S_2 = 0.15$ нм/мин.

юстировки ионной и электронной пушек. Недавно мы показали [7], что среди считающихся до сих пор равноправными методов юстировки лишь использование цилиндра Фарадея обеспечивает точное совмещение максимума диаграммы ионного пучка с электронным пучком и фокусом энергоанализатора. Так же обсуждается необходимая для этого модернизация Оже-спектрометра.

3. На рис. 1, а показано распределение элементов в структуре H128, полученное при постоянной скорости распыления и энергии ионов аргона $E_i = 2$ кэВ. Как видим, при

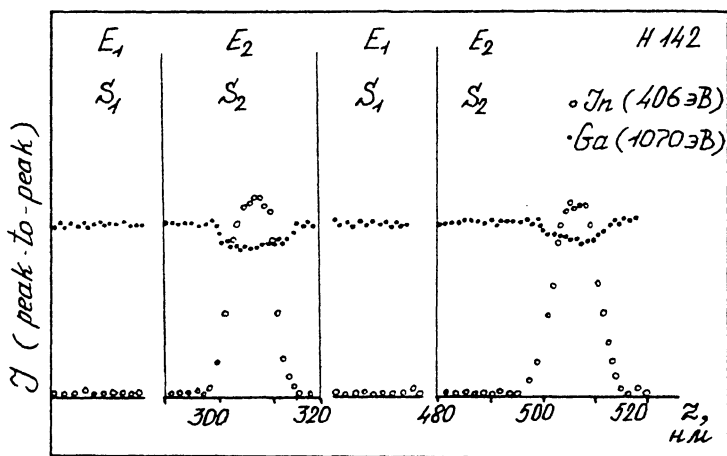


Рис. 2. Распределение элементов в гетероструктуре H142 (фрагменты — третий и пятый слой InGaAs). $E_1 = 2$ кэВ, $E_2 = 0.6$ кэВ, $S_1 = 4.2$ нм/мин. $S_2 = 0.45$ нм/мин.

этих условиях слою InGaAs отвечает лишь 1–2 точки на профиле In. Подобный предварительный проход проводился на каждой структуре, он позволял с большой точностью определить время, необходимое для распыления буферного слоя GaAs. При повторном проходе распыление буферного слоя прекращалось на расстоянии 5–10 нм от квантовой ямы. Далее, в интересующем слое анализ проводился при более низкой энергии ионов с соответственно меньшей скоростью распыления. При этом, по нашим оценкам, еще в буферном слое GaAs успевал сформироваться измененный слой, соответствующий низкой энергии ионов. Таким образом было получено распределение элементов в структурах H128 и H142, приведенное на рис. 1, в и 2. На профилях всех квантовых ям можно отчетливо выделить область насыщения In, что позволяет однозначно определить разрешение по глубине ΔZ отдельно на каждом из фронтов в простейшей двухслойной модели [1,4]. На глубине $Z = 100$ нм мы получили $\Delta Z \approx 1.3$ нм, предельное для Оже-спектроскопии даже на малой глубине анализа. При $Z = 300$ и 500 нм величина ΔZ возрастает до 2.8 и 3.5 нм соответственно, по-видимому, в результате развития рельефа на атомном масштабе. Полученные результаты показали возможность анализа и более тонких квантовых ям. На рис. 1, г приведено распределение элементов в структуре H131 с толщиной слоя InGaAs $d = 3$ нм. Реализованное разрешение по глубине и в этой структуре позволяет определить основные параметры кван-

товой ямы: d и X . Относительное разрешение по глубине $\delta Z = \Delta Z/Z$ для структуры Н142 составляет 0.8% при $Z = 0.5$ мкм. Эти результаты превосходят все известные нам данные для разрешения по глубине, в том числе и полученные на специализированных Оже-спектрометрах с двумя пушками или вращением образца [1].

4. На рис. 1, б приведено распределение элементов в структуре Н128, полученное при постоянной энергии ионов 2 кэВ и варьировании в процессе анализа лишь скорости распыления. Как видим, данная методика также существенно повышает информативность послойного анализа при исследовании глубоко залегающих квантовых ям и не слишком увеличивает общее время анализа (исключая, конечно, необходимость предварительного прохода). В то же время профиль \ln на рис. 1, б, в отличие от рис. 1, в, г, характеризуется ярко выраженной асимметрией переднего и заднего фронтов, что свидетельствует о существенном влиянии процессов атомного перемешивания. Разрешение по глубине при $E_i = 2$ кэВ также ухудшается в сравнении с рис. 1, в и составляет $\Delta Z = 2$ нм, что однозначно свидетельствует о преимуществах использования ионов низких энергий.

Таким образом, мы показали, что при послойном Оже-анализе гетероструктур с квантовыми ямами может быть реализовано практически предельное разрешение по глубине $\Delta Z \approx 1.3 - 1.5$ нм на достаточно больших глубинах анализа путем простого чередования высокой и низкой энергий распыляющего ионного пучка. Это может существенно повысить целесообразность и информативность использования данного метода для анализа таких типов структур, где требуется сверхвысокое разрешение на большой глубине анализа, и метод послойного Оже-анализа ранее оказывался практически бесполезным.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект N 96-02-19283 и МНТП "Физика твердотельных наноструктур", проект N 2-018/3.

Список литературы

- [1] Hofmann S. // J. Vac. Sci. Technol. 1991. V. A9. N 3. P. 1466-1476.
- [2] Wittmaack K. // Vacuum. 1984. V. 34. N 1-2. P. 119-137.
- [3] Mathieu H.J. // Topics in Current Physics. V. 37 / Thin Film and Depth Profile Analysis. Springer-Verlag. Berlin, 1984. Chap. 3.
- [4] Hofmann S. // Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy / Ed. by D. Briggs, M.P. Seah. J. Wiley & Sons Ltd. 1983. Chap. 4. (Перевод: Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса и М.П. Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.).

- [5] *Aleshkin V.Ya., Gusev S.A., Danyltsev V.M. et al. // Nanostructures: Physics and Technology / International Symposium. Abstracts. St. Petersburg. Russia, June 24-28, 1996. P. 148-150.*
- [6] *Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Drozdov M.N. et al. // Thin Solid Films. 1995. V. 263. P. 169-174.*
- [7] *Дроздов М.Н., Данильцев В.М., Салащенко Н.Н. и др. Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 18. С. 1-7.*

Институт физики
микроструктур РАН
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию
22 июля 1996 г.
