

06;11

ВИМС профилирование гетероструктур GaAs/ δ -AlAs/GaAs/... с помощью многоатомных ионизованных кластеров кислорода

© Б.Я. Бер, А.П. Коварский, Д.Ю. Казанцев, Ю.В. Трушин,
Е.Е. Журкин, А.А. Шмидт, С.Ф. Белых

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: boris.ber@mail.ioffe.ru

С.-Петербургский государственный технический университет

Department of Chemistry, University of Antwerp (UIA),

B-2610 Antwerp (Wilrijk), Belgium

Поступило в Редакцию 20 апреля 2004 г.

Исследуется возможность использования многоатомных ионов в качестве первичных частиц при профилировании твердотельных гетероструктур методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Показано, что бомбардировка мишени ионизованными кластерами кислорода O_n^+ ($n = 3, 4$) позволяет снизить удельную энергию удара в пересчете на первичный атом и поэтому достигается существенное улучшение разрешения по глубине. Продемонстрирована возможность получения пучка первичных ионизованных кластеров вида O_n^+ ($n = 3, 4$) с удельной энергией удара вплоть до 1 keV/at. при использовании стандартного источника ионов, снабженного магнитным масс-сепаратором, и магнитно-секторного вторично-ионного масс-спектрометра. ВИМС профилирование тестовой структуры GaAs/ δ -AlAs/GaAs/... при использовании первичных ионов O_3^+ с удельной энергией 1 keV/at. продемонстрировало высокое разрешение по глубине. Проведено сравнение экспериментальных данных с компьютерным моделированием процесса ионного распыления, выполненным с использованием кода DITRIRS.

Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) является одним из самых мощных аналитических методов. Важнейшим преимуществом ВИМС является сочетание низкого предела обнаружения примесей, достигающего 10^{14} at./cm³, и поверхностной чувствительности, что связано с малой информационной глубиной порядка 2 атомных слоев. Благодаря этому ВИМС в сочетании с послойным ионным травлением,

или глубинное профилирование методом динамической ВИМС, является основным методом исследования распределения легирующих атомов по толщине твердотельных структур [1,2]. Серьезным физическим ограничением метода являются радиационные повреждения, вносимые в приповерхностную область мишени первичным ионным пучком. Быстрые атомные частицы с типичной кинетической энергией удара порядка 3–10 keV кроме распыления мишени и эмиссии вторичных ионов вызывают в образце существенное ионное перемешивание, что приводит к видимому размытию возможных резких перепадов атомных концентраций, имеющихся в исходной структуре.

Ионное перемешивание снижается с увеличением массы частиц первичного пучка, при оптимизации угла его падения и, наиболее эффективно, при снижении энергии удара до 0.2–1.0 keV. К сожалению, в магнитно-секторных ВИМС приборах при снижении кинетической энергии первичного пучка ниже 7–10 keV резко падает его ток и ухудшается фокусировка. Кроме того, в этих приборах анализируемая мишень является одним из электродов вторично-ионной оптики и находится под высоким потенциалом порядка 4.5 keV. Такая оптика обеспечивает сочетание высокого массового разрешения и большой эффективности сбора вторичных ионов. Однако при использовании одноименно заряженных первичных и вторичных ионов это приводит к отталкиванию первичных частиц от мишени, изменяя энергию удара и угол падения на образец. Одновременно это ограничивает возможность снижения энергии удара первичной частицы величиной около 3 keV.

В настоящей работе был апробирован альтернативный метод существенного снижения эффективной кинетической энергии удара, состоящий в использовании в качестве первичных атомных частиц вместо традиционных ионов кислорода O_2^+ кластеров кислорода O_n^+ большей массы [3]. При столкновении с мишенью такого кластера, первоначально ускоренного напряжением порядка 10 keV и соответственно имеющего энергию удара порядка 5.5 keV, происходит его диссоциация на моноатомные составляющие, между которыми делится кинетическая энергия кластера. Каждый из таких первичных атомов, имея уже достаточно низкую кинетическую энергию около 1 keV и менее, инициирует развитие в мишени соответствующего каскада перемешивания значительно меньших размеров и вызывает ионное распыление и вторичную ионную эмиссию. Существенно, что при таком подходе реализуются необходимые условия фокусировки первичных кластеров

и оптимизируется их угол падения на мишень при использовании ионного источника со стандартной оптикой, оптимизированной для формирования пучков заряженных частиц средних энергий.

Мишень, используемая в данной работе, была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии и представляла собой эпитаксиальный слой GaAs периодически дельта-легированный маркерными монослоями состава AlAs. Расстояние между слоями δ -AlAs и глубина залегания верхнего слоя, как было определено методом просвечивающей электронной микроскопии, составляли 32 nm. Для ВИМС профилирования этой структуры использовался магнитно-секторный ВИМС микрозонд САМЕСА IMS4f, снабженный стандартным дуоплазмотронным источником ионов O_2^+ и магнитным масс-сепаратором первичного пучка. Масс-сепаратор использовался для отбора из дуоплазмотрона кластеров кислорода нужного состава. Потенциал образца составлял +4.5 kV. Расчетные углы падения первичных кластеров кислорода, отсчитанные от нормали к образцу, находились в интервале от 35 до 40°. Величина тока пучка первичных ионов O_n^+ , вытягиваемых из дуоплазмотрона при данном ускоряющем напряжении, оптимизировалась изменением таких параметров, как давление кислорода в дуоплазмотроне, величина магнитного поля, сжимающего кислородную плазму, ток разряда в плазме и взаимное расположение промежуточного электрода и анода. Такая настройка дуоплазмотрона, магнитного масс-сепаратора и оптической колонны первичного пучка обеспечила последовательное получение пучков ионизованных кластеров кислорода O_n^+ ($n = 1, 2, 3, 4$), токи которых при ускоряющем напряжении 12.5 keV составляли $O_1^+ : O_2^+ : O_3^+ : O_4^+ = 500 : 3000 : 70 : 20$ nA, а токи кластеров большего размера не превосходили 1 pA. Первичные пучки были сфокусированы в пятно диаметром порядка 20 μ m и сканировали на мишени область размером 250 \times 250 μ m. При этом токи пучков ионов O_3^+ и O_4^+ составляли 5–7 и 2–3 nA соответственно. Регистрировались положительные вторичные ионы $^{16}O^+$ и $^{27}Al^+$, эмиттированные из центральной области дна кратера травления диаметром 60 μ m. Массовое разрешение составляло $M/\Delta M = 300$. В качестве количественной характеристики достигнутого разрешения по глубине при профилировании тестовой структуры использовалась длина спада, представляющая собой толщину травленного слоя, на которой интенсивность вторичных ионов $^{27}Al^+$ на заднем фронте пика (при прохождении маркерного слоя δ -AlAs) спадает в e раз.

Тип первичных частиц	Ускоряющее напряжение, kV	Удельная энергия удара, keV/at.	Длина спада, nm
O_3^+	12.0	2.5	2.8
O_3^+	9.0	1.5	2.3
O_3^+	7.5	1.0	1.8
O_1^+	12.5	8.0	3.8
O_2^+	12.5	4.0	3.0
O_3^+	12.5	2.7	2.7
O_4^+	12.5	2.0	2.6

В первой серии измерений мишень бомбардировалась кластерами кислорода O_3^+ при различных ускоряющих напряжениях. Результаты ВИМС профилирования при таких условиях приведены на рис. 1 и 2 и в таблице. При использовании ускоряющего напряжения 7.5 kV была достигнута наименьшая удельная энергия удара 1 keV/atom, что позволило получить наилучшее разрешение по глубине, характеризующееся минимальным значением длины спада 1.8 nm при вполне удовлетворительной скорости травления 4 nm/min.

Во второй серии измерений мишень GaAs/ δ -AlAs/GaAs/...GaAs(001) бомбардировалась полиатомными ионами кислорода вида O_n^+ ($n = 1, 2, 3, 4$) при фиксированном ускоряющем напряжении 12.5 keV, т.е. при фиксированной энергии удара кластеров 8 keV. Результаты ВИМС профилирования при таких условиях приведены в таблице. Несмотря на падение тока первичного пучка с увеличением массы кластера при использовании кластеров O_4^+ была достигнута скорость травления мишени 0.7 nm/min, что позволяет исследовать в таком режиме мелкозалегающие p - n -переходы и квантово-размерные структуры.

Одной из важных характеристик ВИМС профилирования является глубина ионного травления, на которой процесс распыления однородной мишени становится стационарным. При исследовании мелкозалегающих структур эта глубина должна быть минимальной, так как только для стационарной фазы распыления мишени развиты методы количественного ВИМС анализа состава. Для изучения влияния энергии первичных частиц на величину этой глубины было выполнено ком-

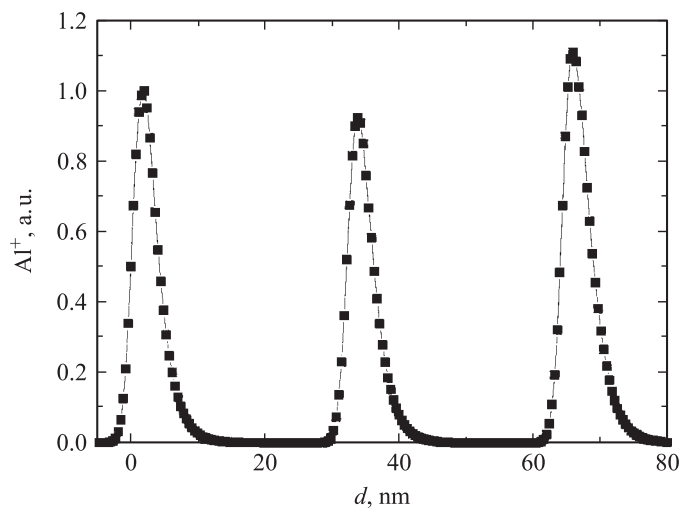


Рис. 1. ВИМС профиль структуры GaAs/ δ -AlAs/GaAs/... с использованием первичного кластера O_3^+ при энергии удара 1.0 keV/atom (d — относительное расстояние).

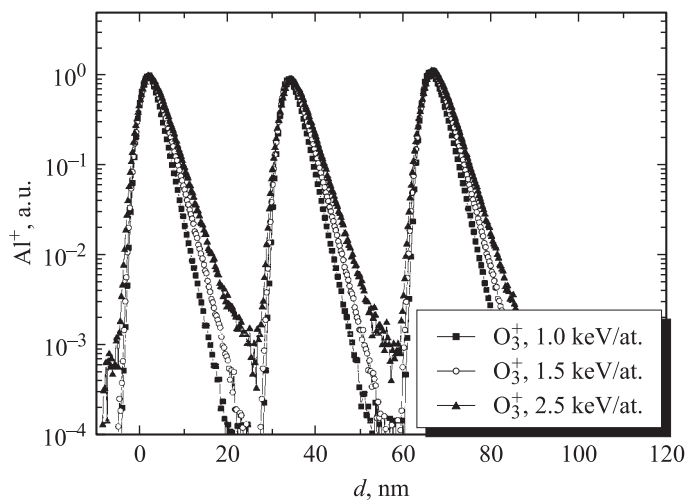


Рис. 2. ВИМС профили структуры GaAs/ δ -AlAs/GaAs/... с использованием первичного кластера O_3^+ и различных энергий удара (полулогарифмическая шкала).

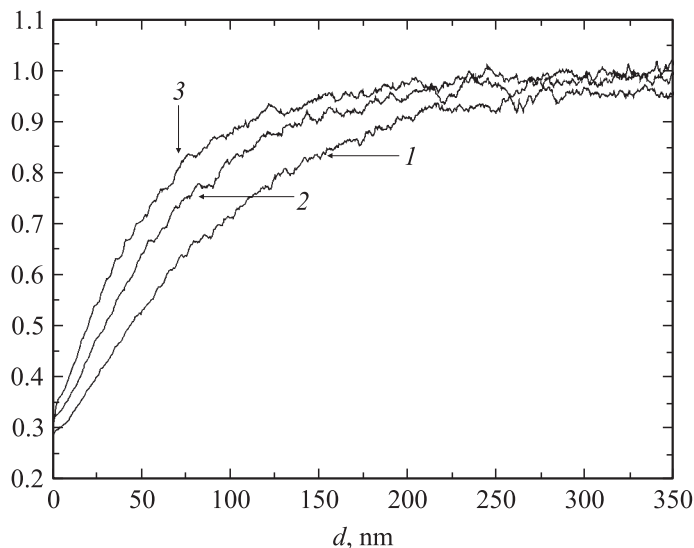


Рис. 3. Изменение парциального выхода вторичных атомов кислорода в процессе ионного травления при бомбардировке мишени GaAs атомами кислорода с различными энергиями удара: 1 — 2.5 keV, 2 — 1.5 keV и 3 — 1.0 keV.

пьютерное моделирование ионного травления арсенида галлия атомами кислорода при различных энергиях удара. Моделирование проводилось с использованием программного пакета DITRIRS [4,5]. Результаты компьютерного эксперимента представлены на рис. 3. Достижение процессом ионного травления стационарной фазы означает, в частности, что парциальный выход первичных частиц становится равным единице. Видно, что снижение энергии удара сопровождается заметным уменьшением глубины достижения стационарной фазы ионного травления.

Таким образом, показано, что использование в ВИМС профилировании для ионного распыления мишени многоатомных ионов кислорода O_n^+ ($n = 3, 4$) позволяет в несколько раз снизить удельную энергию удара при сохранении угла падения на мишень и фокусировки первичного пучка. На примере профилирования тестовой структуры GaAs/ δ -AlAs/GaAs... первичными ионами O_3^+ с удельной энергией удара 1 keV/atom продемонстрировано высокое разрешение по глубине, ха-

рактизирующееся для заднего фронта концентрации маркерного слоя δ -AlAs длиной спада 1.8 nm при скорости травления 4 nm/min, и тем самым показана возможность проведения количественного ВИМС анализа мелко залегающих структур на вторично-ионных масс-спектрометрах магнитно-секторного типа со стандартной первичной оптикой.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 02-02-17605), Министерства промышленности, науки и технологий РФ (Программа „Физика твердотельных наноструктур“), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН „Новые материалы и структуры“ и МНТЦ (проект № 2630).

Список литературы

- [1] *Zalm P.C.* // Rep. Progr. Phys. 1995. V. 58. N 10.
- [2] *Zalm P.C.* // Microchimica Acta. 2000. V. 132. N 2-4. P. 243-257.
- [3] *Yamazaki H., Mitani Y.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 124. N 1. P. 91-94.
- [4] *Ber B.J., Kharlamov V.S., Kudrjavitsev Yu.A.* et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 127-128. N 1. P. 286-290.
- [5] *Trushin Yu.V., Ber B.J., Kharlamov V.S.* et al. // J. Nucl. Mater. 1996. V. 237. Pt. 2. P. 991-995.