

06

## Влияние дозы имплантации ионов азота на концентрацию точечных дефектов, введенных в слой GaAs

© Н.А. Соболев, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, А.Е. Калядин,  
К.В. Карабешкин, В.М. Микушкин, В.И. Сахаров,  
И.Т. Серенков, Е.И. Шек, Е.В. Шерстнев, Н.М. Шмидт

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

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2017 г.

С помощью методов масс-спектрометрии вторичных ионов и резерфордского обратного рассеяния протонов измерены профили концентрации атомов азота и исследована дефектная структура эпитаксиальных слоев GaAs, имплантированных ионами  $N^+$  с энергией 250 keV и дозами  $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Установлено, что аморфизации имплантируемых слоев при дозах выше расчетного порога аморфизации не происходит, концентрация образовавшихся точечных дефектов значительно меньше расчетной, а характерной особенностью концентрационных профилей дефектов является их высокая концентрация в приповерхностном слое.

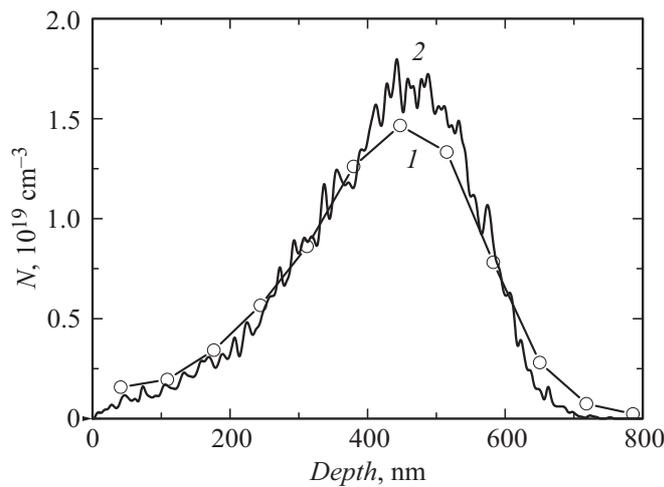
DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46326.17139

Разбавленные твердые растворы  $GaAs_{1-x}N_x$  рассматриваются в качестве перспективных кандидатов для создания эффективных источников излучения в зеленой области спектра и приборов для инфракрасной оптоэлектроники [1]. Используются различные методы получения этих растворов, в том числе молекулярно-пучковая эпитаксия [2,3], металлоорганическое химическое напыление [4] и ионная имплантация [1,5–9]. В настоящее время сведения о получении конкурентоспособных приборных структур на основе данных твердых растворов практически отсутствуют. Весьма ограничена информация о дефектах и их влиянии на свойства таких твердых растворов. Ионная имплантация является простым и эффективным методом введения азота в GaAs с концентрацией выше равновесной, но при этом важную роль в решении задачи

получения твердых растворов приборного качества играют контроль вводимых имплантационных дефектов и методы их устранения. Однако в публикациях практически отсутствует информация о введенных имплантационных дефектах. В настоящей работе приведены первые результаты исследования дефектов в слоях GaAs:N, полученных при имплантации ионов азота с разными дозами.

Имплантация ионов  $N^+$  проводилась при комнатной температуре с энергией 250 keV, плотностью тока  $\sim 0.45 \mu A/cm^2$  и дозами  $5 \cdot 10^{14}$ ,  $5 \cdot 10^{15}$  и  $5 \cdot 10^{16} cm^{-2}$  на ускорителе фирмы High Voltage Engineering Europe в слое GaAs толщиной  $\sim 40 \mu m$ , выращенные методом газофазной эпитаксии в хлоридной системе на сильнолегированных (100) GaAs-подложках. Проецированный пробег ионов азота  $R_p$ , согласно программе TRIM [10], составляет 417 nm. Пучок ионов направлялся под углом  $7^\circ$  от нормали к имплантируемой поверхности, чтобы избежать эффекта каналирования. Концентрационные профили атомов азота измерялись с помощью метода вторичной ионной масс-спектрографии (SIMS) на установке Cameca IMS 4f. Дефектная структура имплантированных слоев исследовалась с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (RBS) протонов с энергией 227 keV. Кремниевый детектор с энергетическим разрешением  $\sim 3.5 keV$  регистрировал протоны, рассеянные на угол  $170^\circ$ . Измерение энергетических спектров обратнорассеянных протонов проводилось в режимах каналирования и псевдослучайного направления пучка (далее каналирующий и случайный режимы). Длительность измерения RBS-спектров каждого из образцов изменялась в диапазоне 0.5–3 h. Было установлено, что результаты измерений не зависели от длительности, т. е. влияние диагностического пучка на структуру исследуемого объекта отсутствовало. Расчет профилей концентрации введенных точечных дефектов проводился с помощью процедуры, предложенной в [11].

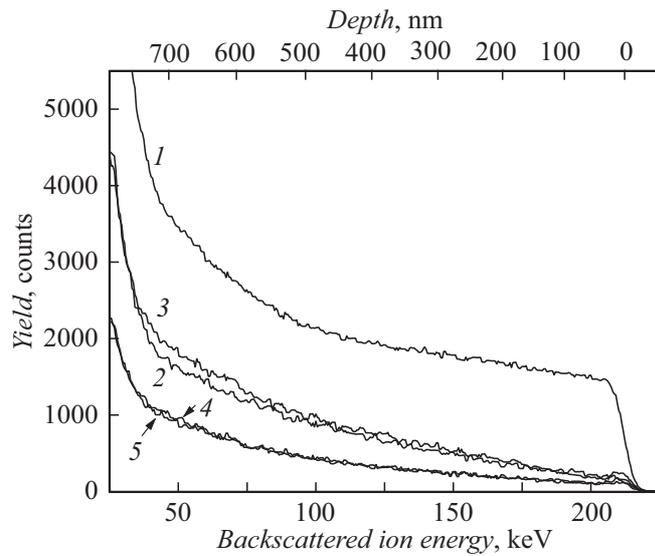
На рис. 1 представлен измеренный с помощью метода SIMS профиль атомов азота в образце GaAs, имплантированном с дозой  $5 \cdot 10^{14} cm^{-2}$ . Распределение ионов азота, рассчитанное с помощью программы TRIM, также приведено на рисунке. Видно, что экспериментальный и расчетный профили, а также их основные параметры (положение максимума, максимальная концентрация атомов азота и полуширина распределения) довольно хорошо (в пределах  $\pm 10\%$ ) совпадают. Аналогичное совпадение экспериментального и расчетного профилей наблюдалось и для образца со средней дозой имплантации.



**Рис. 1.** Измеренные методом SIMS (1) и рассчитанные с помощью программы TRIM (2) концентрационные профили атомов азота, имплантированных в GaAs с энергией 250 keV и дозой  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

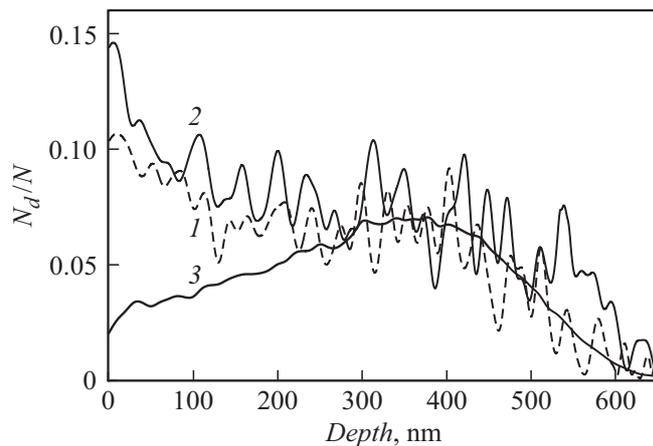
Для образца с наибольшей дозой имплантации экспериментальный профиль и расчетный TRIM-профиль при концентрациях атомов азота выше  $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  не совпадают. Это может быть связано с тем обстоятельством, что при таких больших дозах имплантируемых ионов происходит существенное изменение структуры слоя, нарушающее условия применимости методики стандартного количественного анализа в SIMS.

Спектры обратного рассеяния протонов в образцах после имплантации ионов азота, измеренные в случайном и каналирующем режимах, приведены на рис. 2 (кривые 1–4). Анализ RBS-спектров образцов GaAs:N показал, что аморфизации имплантируемых слоев не происходит (амплитуда случайного спектра существенно превосходит амплитуды каналированных спектров). Каналированные спектры образцов, имплантированных с дозами  $5 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , практически совпадают. Профили концентрации точечных дефектов, рассчитанные из RBS-спектров и нормированные на число атомов в  $1 \text{ cm}^3$ , для образцов с дозами имплантации  $5 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  приведены на рис. 3



**Рис. 2.** Энергетические RBS-спектры: случайный (1) и каналированные вдоль оси  $\langle 100 \rangle$  после имплантации ионов азота с дозами  $5 \cdot 10^{14}$  (2),  $5 \cdot 10^{15}$  (3) и  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (4). Для сравнения показан каналированный спектр образца перед имплантацией (5).

(кривые 1 и 2 соответственно). Был получен необычный результат, поскольку увеличение дозы имплантации на порядок не приводит к изменению концентрационных профилей. Кроме того, на глубинах меньше 200 nm наблюдается существенное увеличение концентрации дефектов по направлению к поверхности. Такое возрастание концентрации дефектов в приповерхностном слое в процессе имплантации свидетельствует о диффузии атомов из объема к поверхности. При исследовании имплантированных образцов на микроскопе с большим ( $\times 1000$ ) увеличением и на сканирующем электронном микроскопе обнаружены выделения, которые, по-видимому, связаны с диффузией атомов Ga. Ранее аналогичный эффект диффузии Ga и его преципитации на поверхности наблюдался нами при имплантации ионов Er в сверхрешетки AlGaIn/GaN [12]. Такие эффекты проявлялись и при имплантации различных ионов в другие Ga-содержащие соединения  $A^{III}B^V$  [13].



**Рис. 3.** Концентрационные профили дефектов, введенных имплантацией в структуры GaAs:N при дозах  $5 \cdot 10^{14}$  (1) и  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (2), и расчетная кривая для дозы имплантации  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (3).

Кроме того, взаимодействие присутствовавшего до имплантации в микротрубках эпитаксиальных слоев GaAs избыточного галлия с азотом может приводить к избыточным напряжениям в этих областях и, как следствие, к увеличению концентрации дефектов. На рис. 3 также приведен рассчитанный с помощью программы TRIM профиль дефектов после имплантации ионов азота с дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (кривая 3). Практически полное совпадение экспериментальных и расчетного профилей на глубинах более 250 нм позволяет предположить, что при дозах выше  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  начинает эффективно работать механизм рекомбинации образующихся точечных дефектов. Возможно, этим и объясняется отсутствие после имплантации с дозой  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  аморфизованного слоя, который, согласно TRIM-расчетам, должен был образоваться при достижении дозы  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

На рис. 2 также показан спектр исходного (до имплантации) образца, измеренный в каналирующем режиме (кривая 5). Он практически совпадает с каналированным спектром облученного с наибольшей дозой образца GaAs:N (кривая 4). Этот результат может быть обусловлен снятием напряжений, возникших при имплантации ионов азота с двумя

меньшими дозами, за счет образования протяженных дефектов во время имплантации с наибольшей дозой и возможным нагревом образца во время длительной имплантации. Однако необходимы дополнительные исследования для выяснения наблюдаемого явления.

Следует отметить, что предварительные исследования структурных свойств изученных в настоящей работе образцов методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии подтверждают полученные результаты, свидетельствующие о совпадении каналированных RBS-спектров образцов, имплантированных с дозами  $5 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , а также исходного и облученного с наибольшей дозой образцов. Эти результаты выходят за рамки данной работы и будут представлены в отдельной публикации.

Таким образом, экспериментальные концентрационные профили атомов азота, измеренные методом SIMS, адекватно описываются зависимостями, рассчитанными с помощью программы TRIM. Анализ RBS-спектров образцов GaAs:N показал, что аморфизации имплантируемых слоев при дозах выше расчетного порога аморфизации не происходит. Профили концентрации обусловленных имплантацией точечных дефектов при дозах  $5 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  совпадают и имеют ряд особенностей. В приповерхностном слое глубиной меньше 200 nm обнаружена избыточная по сравнению с данными TRIM-расчетов их концентрация, которая уменьшается по мере увеличения глубины. Измеренные в каналирующем режиме RBS-спектры исходного и имплантированного с самой большой дозой  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  образцов GaAs практически совпадают. Это означает, что после имплантации ионов азота с указанной дозой в образцах GaAs:N отсутствуют точечные дефекты, регистрируемые с помощью метода RBS. После проведения имплантации ионов азота необходим тщательный контроль присутствия на поверхности эпитаксиальных слоев GaAs избыточных атомов галлия и обогащенных галлием микротрубок.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-19-01200). SIMS-измерения проводились на оборудовании ЦКП „Наука о материалах и диагностика перспективных технологий“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН), поддержанного Министерством образования и науки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Авторы выражают благодарность В.Н. Пантелееву за предоставление образцов с эпитаксиальными слоями.

**Список литературы**

- [1] Yu K.M., Walukiewicz W., Scarpulla M.A., Dubon O.D., Wu J., Jasinski J., Liliental-Weber Z., Beeman J.W., Pillai M.R., Aziz M.J. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. N 2. P. 1043–1049.
- [2] Мамутин В.В., Егоров А.Ю., Крыжановская Н.В., Михрин В.С., Надточий А.М., Пирогов Е.В. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 7. С. 823–830.
- [3] Жуков А.Е., Семенова Е.С., Устинов М.В., Weber E.R. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 10. С. 59–64.
- [4] Weyers M., Sato M., Ando H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. Pt 2. N 7A. P. L853–L855.
- [5] Majlinger Z., Bozanic A., Petravic M., Kim K.-J., Kim B., Yang Y.-W. // Vacuum. 2010. V. 84. N 1. P. 41–44.
- [6] Mikoushkin V.M., Bryzgalov V.V., Gordeev Yu.S., Nikonov S.Yu., Solonitsina A.P., Zhuravleva A.A., Brzhezinskaya M.M. // Phys. Status Solidi C. 2009. V. 6. N 12. P. 2655–2657.
- [7] Gao K., Prucnal S., Skorupa W., Helm M., Zhou S. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. N 9. P. 093511.
- [8] Gao K., Prucnal S., Skorupa W., Helm M., Shengqiang Zhou S. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. N 1. P. 012107.
- [9] Mikoushkin V.M. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2015. V. 354. N 1. P. 100–104.
- [10] Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. N.Y.: Pergamon Press, 1985. 321 p.
- [11] Feldman L.C., Mayer J.W., Picraux S.T. // Material analysis by ion channeling. N.Y.: Academic Press, 1982. Ch. 5.
- [12] Баранов Е.Е., Емельянов А.М., Лундин В.В., Петров В.Н., Сахаров В.И., Серенков И.Т., Соболев Н.А., Тутков А.Н., Шек Е.И., Шмидт Н.М. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 12. С. 61–64.
- [13] Соболев Н.А., Емельянов А.М., Лундин В.В., Сахаров В.И., Серенков И.Т., Усиков А.С., Емельянов А.М. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 6. С. 674–676.