

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В СЛОЯХ GaN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

© T.S.Cheng*, L.C.Jenkins*, S.E.Hooper*, C.T.Foxon*, Б.Я.Бер,
А.В.Меркулов, С.В.Новиков, В.В.Третьяков

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

*Department of Physics, University of Nottingham,
Nottingham NG7 2RD, England, UK

(Получена 19 апреля 1995 г. Принята к печати 24 апреля 1995 г.)

Исследовано распределение фоновых примесей (As,P) и легирующей примеси (Si) в GaN, полученном на подложках GaAs и GaP методом молекулярно-лучевой эпитаксии с источником плазменно-активированного азота. Предложена модель встраивания примесей в процессе роста слоев GaN.

Введение

Нитриды III группы интенсивно исследуются в настоящее время, что обусловлено перспективностью их приборного применения для создания оптоэлектронных приборов, работающих в голубой области спектра, а также в высокотемпературной электронике. Основными методами получения слоев нитридов III группы являются МОС гидридная эпитаксия и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [1-3]. При молекулярно-лучевой эпитаксии используются как газовые источники, так и источники плазменно-активированного азота.

Цель данной работы — исследование распределения примесей в слоях GaN, полученных на подложках GaAs и GaP методом МЛЭ с использованием источника плазменно-активированного азота. Распределение фоновых и легирующих примесей анализировалось методами оже-спектроскопии, рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

Слои нитридов III группы выращивались на установке МЛЭ типа «Varian» Mod-GenII, в которой использовались стандартные источники для Al, Ga, In, As₂, Si, и Be, а также источник плазменно-активированного азота (Oxford Applied Research CARS25RF). Для активации азота применялась частота 13.56 МГц, мощность до 600 Вт; источник охлаждался жидким азотом. Рост проводился на полупроводящих подложках (100)GaAs и на подложках (100)GaP, легированных серой. Подложки перед процессом не подвергались химической обработке. Поверхностный окисел с поверхности подложек удалялся при нагреве в потоке мышьяка для подложек GaAs и активированного азота или мышьяка для подложек GaP. Слои GaN выращивались как при отсутствии потока мышьяка, так и при использовании потока As до величины порядка $(1-2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. [4-6]. По описанной ранее методике [4-6] были получены нелегированные слои GaN толщиной 0.2-0.8 мкм. Кроме этого на подложках (100)GaAs:Si были выращены слои GaN, легированные кремнием; выбранный по аналогии с ростом GaAs уровень легирования материала должен был составить порядка $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Исследование распределения основных и легирующих компонентов в пленках проводилось методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микрозонде GAMECA IMS4f. В качестве первичного пучка использовались ионы O₂⁺ при энергии 5.3 кэВ и токе 0.3 мкА. Размер раstra на образцах составлял 350 × 350 мкм². Область сбора вторичных положительных ионов имела диаметр 60 мкм. Массовое разрешение спектрометра $M/\Delta M \approx 300$. Скорость травления определялась по глубине кратера, измеренной на механическом профилометре DEKTAK, и из толщин слоев, измеренных методами РЭМ. Концентрация легирующих и фоновых примесей определялись с использованием калибровочных образцов, полученных имплантацией соответствующих примесных атомов в слой GaN.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование морфологии поверхности и сколов полученных структур GaN/GaAs методами РЭМ показало, что наблюдается деградация поверхности подложек GaAs, что приводит к макронеоднородностям гетерограницы GaN/GaAs.

Как показано ранее [6], выращивание слоев GaN в потоке мышьяка в камере роста позволяет получить на подложках GaAs и GaN слои GaN структуры цинковой обманки. Измерение профиля состава выращенных структур методом оже-спектроскопии показало, что наблюдается резкая гетерограница подложка-слой и практически постоянный по толщине слоя состав. На уровне чувствительности оже-спектроскопии мышьяк в слоях практически отсутствовал. В этих слоях проводилось исследование распределения фоновых примесей с помощью ВИМС. На рис. 1, a, b представлены типичные картины распределения As и P для двух образцов, выращенных соответственно на подложках GaAs и GaP. На обоих рисунках для определения положения гетерограницы также представлен профиль распределения основных компонен-

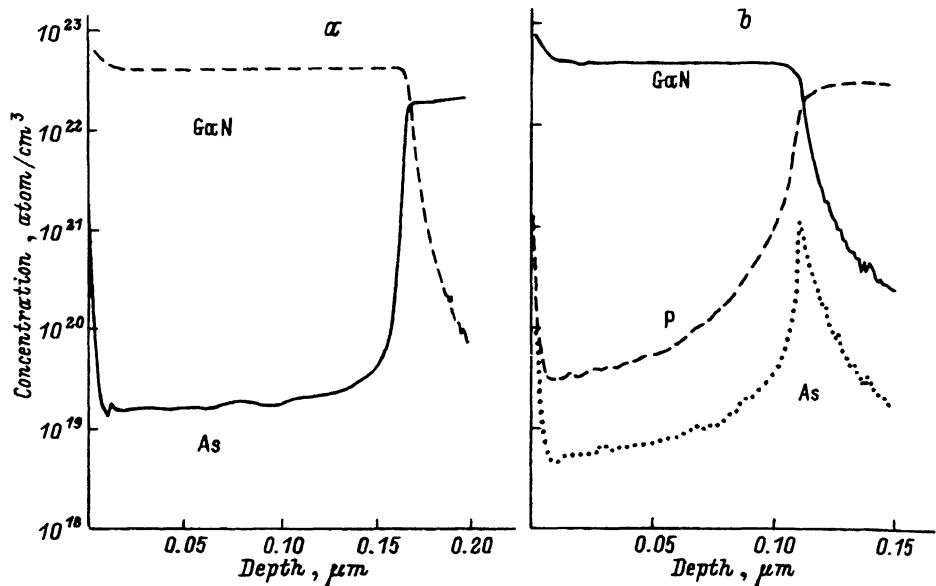


Рис. 1. Профили распределения концентрации элементов по толщине слоев GaN со структурой цинковой обманки, выращенных на подложках GaAs (a) и GaP (b) с ориентацией (100). Получены методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

тов, измеренный с использованием интенсивности сигнала от кластеров $^{83}\text{GaN}^+$; толщина слоев определялась с помощью электронной микроскопии.

Как следует из рис.1, a, наблюдается резкая гетерограница GaN/GaAs. Концентрация мышьяка в слоях GaN, полученных на подложках GaAs, практически постоянна по толщине слоя и имеет величину порядка $(1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемый рост сигнала вторичных ионов у поверхности структуры является аппаратным эффектом ВИМС. Определено некоторое увеличение концентрации мышьяка в слое при приближении к подложке. Однако определить наличие или отсутствие повышенной концентрации As вблизи гетерограницы подложка-слой достаточно сложно из-за большой интенсивности сигнала As из подложки.

Концентрация As в слоях GaN на подложках GaP несколько ниже, чем в слоях, выращенных в идентичных режимах при тех же потоках As на подложках GaAs. В слоях GaN также наблюдается существенная — порядка $(3-6) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — концентрация фосфора. Концентрации P и As плавно возрастают при приближении к поверхности подложки, причем характер распределения As практически повторяет характер распределения P. Концентрация As максимальна в районе гетерограницы подложка-слой. Полученные результаты подтверждают данные РСМА по составу слоя GaN, позволяющими оценить среднюю по толщине концентрацию As в слое на уровне порядка $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

С помощью ВИМС было исследовано распределение по толщине атомов Si в легированных эпитаксиальных слоях GaN:Si, выращенных на подложках (100)GaAs:Si. Типичная картина распределения Si представлена на рис. 2, где для определения положения гетерограницы так-

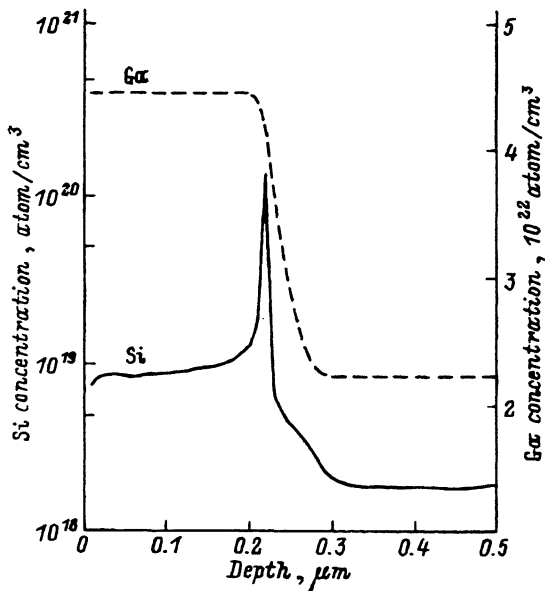


Рис. 2. Профили распределения кремния по толщине слоя GaN, выращенного на подложке GaAs:Si с ориентацией (100). Профили получены методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

же представлен измеренный с помощью ионов $^{69}\text{Ga}^+$ профиль распределения атомов Ga по толщине структур.

Концентрация Si в эпитаксиальных слоях составляет порядка 10^{19}см^{-3} и практически постоянна по толщине эпитаксиального слоя GaN и по толщине подложек GaAs; наблюдается повышение концентрации Si в слое GaN у гетерограницы до уровня порядка 10^{20}см^{-3} . Существует две основные причины расхождения между расчетным и полученным уровнем легирования слоев GaN. Первой причиной являются меньшие скорости роста слоев GaN по сравнению с GaAs при равных потоках галлия из-за большей плотности упаковки. Вторая причина заключается в том, что оценка проводилась на базе гальваномагнитных измерений, в которых определяется $(N_d - N_a)$, где N_d и N_a — концентрации соответственно доноров и акцепторов, в то время по методу ВИМС измеряется общая концентрация атомов кремния в слое. В настоящее время проводятся дополнительные исследования данного вопроса.

Полученные выше результаты могут быть объяснены на базе кинетической модели, предложенной для описания слоев GaN, полученных методом МЛЭ, [6]. При наличии потока As слой GaN пытаются повторить кристаллическую структуру подложки, т.е. структуру цинковой обманки [6]. Имеющие большую энергию связи с Ga атомы азота активно замещают атомы мышьяка, которые, образуя димеры, десорбируются с поверхности. При достаточно высокой температуре подвижность атомов азота настолько возрастает, что они практически замещают все атомы мышьяка в растущей кристаллической решетке; это и объясняет низкую и постоянную концентрация мышьяка в слоях GaN. Из-за различия параметров постоянных решетки подложки и слоя, а

также из-за деградации поверхности подложек в потоке активированного азота область гетерограницы оказывается наиболее напряженной и содержит наибольшее количество структурных дефектов. Попадая на них, примеси не успевают заместиться атомами азота и десорбировать с поверхности, что и приводит к аккумулярованию наибольшего количества примесей в области гетерограницы. При этом в процессе МЛЭ на подложках GaP происходит активная диффузия фосфора из подложки, приводящая к расширению переходной напряженной и дефектной области, что и повторяется распределением мышьяка.

Существует три возможных источника появления мышьяка в слое: а) мышьяк из потока мышьяка в камере, б) диффузия мышьяка из подложки, в) диффузия атомов мышьяка в растущий эпитаксиальный слой с поверхности подложек, обогащенной As в процессе удаления окисла в потоке мышьяка. Тот факт, что существует разница в величине фоновой концентрации мышьяка в слоях, полученных на подложках GaAs и GaP, показывает, что процессы диффузии из подложки могут играть существенную роль. Однако необходимо проведение дополнительных исследований для установления основного механизма, ответственного за вхождение мышьяка в слой.

Заключение

Таким образом, методами ВИМС, оже-спектроскопии, РЭМ, РСМА исследовано распределение фоновых примесей (As, P) и легирующей примеси (Si) в слоях GaN, полученных на подложках (100)GaAs и (100)GaP методом МЛЭ при использовании источников плазменно-активированного азота. Слои GaN структуры цинковой обманки получены при использовании потока мышьяка в процессе роста. Определенная концентрация мышьяка в слоях GaN со структурой цинковой обманки составила порядка 10^{19} см^{-3} . Показано постоянство концентрации Si по толщине слоев GaN, за исключением области гетерограницы. Предложена модель встраивания примесей в процессе роста слоев GaN на подложках GaAs и GaP.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 94-2608), Королевского общества Великобритании и EPSRC Великобритании.

FAX: (812) 247-1017 (S.V. Novikov)

E-mail: nsv@shik.pti.spb.su (S.V. Novikov)

Список литературы

- [1] S. Strite, H. Morkoc. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10**, 1237 (1992).
- [2] S. Strite, M.E. Lin, H. Morkoc. *Thin Sol. Films*, **231**, 197 (1993).
- [3] R.F. Davis. *Proc. IEEE*, **79**, 702 (1991).
- [4] S.V. Novikov, C.T. Foxon, T.S. Cheng, T.L. Tansley, J.W. Orton, D.E. Lacklison, D. Johnston, N. Bada-Ali, S. Hooper, L. Eaves. *J. Cryst. Growth*, **146**, 340 (1995).
- [5] C.T. Foxon, T.S. Cheng, S.V. Novikov, D.E. Lacklison, L.C. Jenkins, D. Johnston, J.W. Orton, S.E. Hooper, N. Bada-Ali, T.L. Tansley, V.V. Tret'yakov. *Proc. 8th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy*, MBE-VIII, Aug. 29-Sept. 2, 1994 (Osaka, Japan, 1994) p. 325.
- [6] T.S. Cheng, L.C. Jenkins, S.E. Hooper, C.T. Foxon, J.W. Orton, D.E. Lacklison. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1509 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Dopants distribution in GaN layers grown by molecular beam epitaxy

*T.S. Cheng**, *L.C. Jenkins **, *S.E. Hooper **, *C.T. Foxon **, *B.Ya. Ber,*
A.V. Merkulov, S.V. Novikov, V.V. Tret'yakov

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

*Department of Physics, University of Nottingham, Nottingham NG7 2rb, England, UK

The distributions of background impurities (As, P) and dopant (Si) were investigated in GaN grown on GaAs and GaP substrates by molecular beam epitaxy with plasma-activated nitrogen source. The model of incorporation of the impurities during growth of GaN layers was proposed.
