

06

Монокристаллические слои GaN/AlN на CVD-алмазе

© О.И. Хрыкин¹, Ю.Н. Дроздов¹, М.Н. Дроздов¹, П.А. Юнин^{1,3},
В.И. Шашкин¹, С.А. Богданов², А.Б. Мучников²,
А.Л. Вихарев², Д.Б. Радищев²

¹ Институт физики микроструктур РАН, Афонино, Нижегородская обл.,

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

³ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: mab1@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2015 г.

Предложен и экспериментально реализован оригинальный подход по созданию структуры GaN/AlN/нанокристаллический алмаз. Этапы создания такой структуры включают в себя: *a* — выращивание нанокристаллического CVD-алмаза на монокристаллическом AlN (предварительно выращенном на кремниевой подложке), *b* — травление кремниевой подложки и *c* — выращивание монокристаллического GaN на поверхности монокристаллического AlN. На подложке из нанокристаллического алмаза получен монокристаллический нитрид галлия с шириной рентгенодифракционной кривой качания отражения (0002) 0.35° .

Гетероструктуры AlGaIn–GaN в настоящее время широко используются для формирования транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT), см., например, [1,2]. Нитрид галлия является широкозонным материалом (ширина запрещенной зоны 3.4 eV), имеет высокое поле пробоя (до $3 \cdot 10^6$ V/cm) и дрейфовую скорость электронов (пиковое значение $3 \cdot 10^7$ cm/s, значение в насыщении $1.5 \cdot 10^7$ cm/s). В сочетании с высокой подвижностью электронов (около 2000 cm²/(V·s) при комнатной температуре) и плотностью электронов в двумерном канале (до $5 \cdot 10^{13}$ cm⁻²) эти уникальные свойства делают структуры AlGaIn–GaN новым перспективным материалом для источников ВЧ-излучения высокого уровня мощности и мощных высокотемпературных электронных устройств, превосходящих освоенные полупроводники Si и GaAs. Оценки показывают, что в миллиметровом диапазоне длин волн по уровню мощности генераторы на GaN могут конкурировать с

вакуумными устройствами при значительно меньших размерах, что может привести к масштабному изменению СВЧ-техники. Однако изготовление таких устройств требует эффективного теплоотвода мощности, выделяемой в канале транзистора. Решение этой проблемы связывается с переходом от традиционных для AlGaN подложек сапфира и кремния к подложкам карбида кремния SiC и алмаза с гораздо более высокой теплопроводностью. Особенно эффективными могут быть подложки из алмаза: по своей теплопроводности они в 3–4 раза превосходят подложки SiC и более чем в 30 раз подложки сапфира.

CVD (chemical vapor deposition) алмаз весьма привлекателен и в качестве подложечного материала, поскольку его теплопроводность заметно выше, чем у других материалов, однако монокристаллы алмаза размером более одного дюйма и пригодные для использования в электронных приборах пока недоступны из-за слишком высокой стоимости. Более доступны нано- и микрокристаллические слои CVD-алмаза, которые по теплопроводности почти не уступают монокристаллу, хотя очевидно, что они не могут быть использованы для эпитаксиального наращивания рабочих слоев и изготовления мощных высокочастотных приборов [1].

К настоящему времени наибольшие успехи в изготовлении структур GaN/CVD-алмаз достигнуты путем создания комбинированных составных подложек по технологии, разработанной фирмой Group 4Labs (США). Большинство известных на сегодняшний день прототипов транзисторов „AlGaN–GaN на алмазе“ получены на подобных составных подложках [3–5]. Однако существенным неизбежным недостатком этой технологии является наличие диэлектрического переходного слоя низкого кристаллического качества и низкой теплопроводности, что не позволяет полностью реализовать потенциал алмазных подложек. Существуют работы, в которых транзисторную структуру, выращенную на подложке Si(111), переклеивают лицевой стороной на временную подложку для стравливания Si и выращивания вместо него толстого слоя нанокристаллического алмаза [6,7]. Затем временную подложку стравливают. Такой подход позволяет получать образцы диаметром до 4 дюймов [7], однако требует технологических операций по приклеиванию и стравливанию временной подложки, которые могут нарушать поверхность транзисторной структуры или слоя GaN. В данной работе предлагается иной подход для формирования гетероструктур GaN/AlN/алмаз, без переходного слоя низкого качества

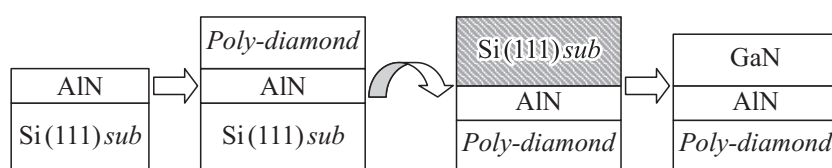


Рис. 1. Основные этапы технологического процесса получения монокристаллического слоя GaN на подложке из нанокристаллического CVD-алмаза.

или же дополнительных технологических операций по переклейке структуры на временные подложки. В работе исследовано получение монокристаллических слоев GaN на подложках из нанокристаллического CVD-алмаза (NCD) с использованием слоя монокристаллического AlN.

Основные этапы технологического процесса получения монокристаллических слоев GaN на подложках из нанокристаллического CVD-алмаза приведены на рис. 1. На первом этапе процесса на монокристаллической подложке Si(111) выращивался эпитаксиальный монокристаллический слой гексагонального AlN с ориентацией (0001) и толщиной 40–100 nm. Рост проводился в реакторе MOCVD пониженного давления с использованием в качестве источников триметилалюминия, триметилгаллия и аммиака [8]. Ширина рентгенодифракционной кривой качания отражения AlN(0002) довольно большая, $\Delta\omega \sim 1^\circ$, что характерно для тонких слоев на сильно рассогласованных подложках (рис. 2, a).

На втором этапе на поверхности монокристаллического AlN выращивалась пленка CVD-алмаза толщиной порядка 300 nm. Использован CVD-реактор на частоте 2.45 GHz [9], рабочая смесь $H_2 + CH_4$. Структура пленки была аналогична описанной в работе [10]. Исследование свойств образца 1357 — структуры NCD/AlN/Si(111) — приведено на рис. 2, a. Рентгеновский анализ образцов проводился на дифрактометре Bruker D8 Discover. На дифрактограмме видны пики подложки Si(111), эпитаксиального слоя AlN(0002) и пик поликристаллического алмаза C(111). Размер кристаллитов в алмазной пленке составлял порядка 30–40 nm (рис. 2, b). Согласно существующей терминологии,

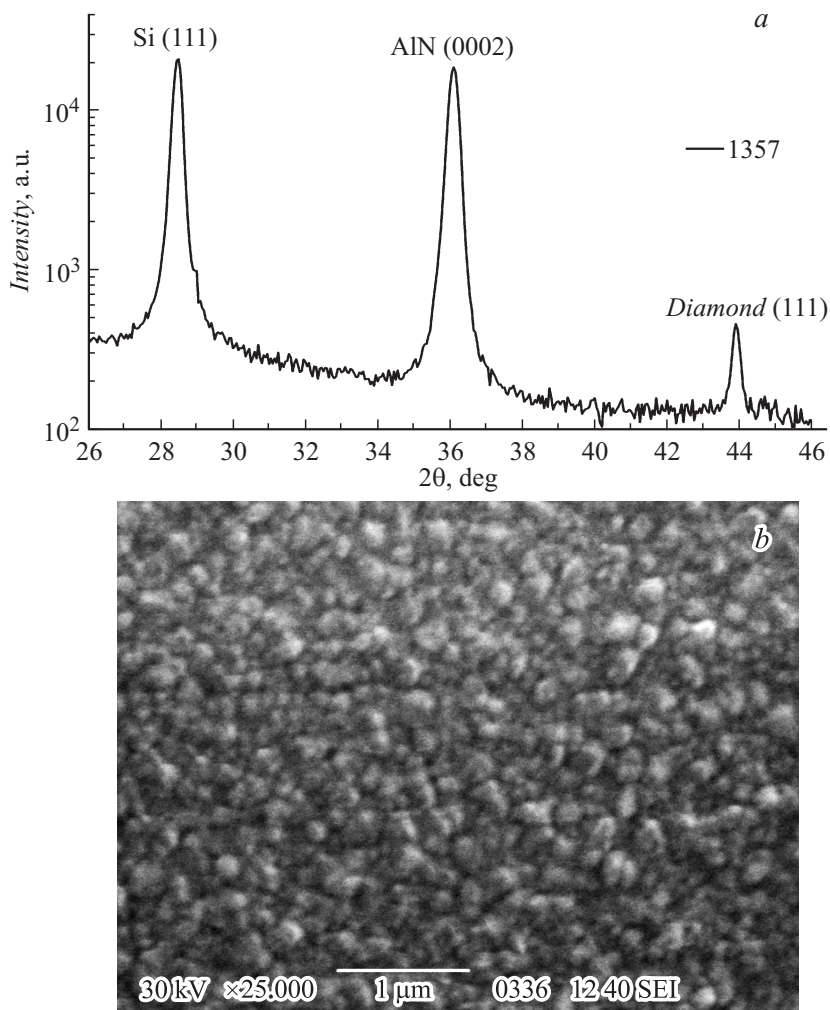


Рис. 2. Исследование образца 1357 — NCD/AlN/Si(111): *a* — рентгеновская дифрактограмма, *b* — SEM-изображение поверхности нанокристаллического алмаза, *c* — профили распределения по глубине различных элементов, полученные методом ВИС.

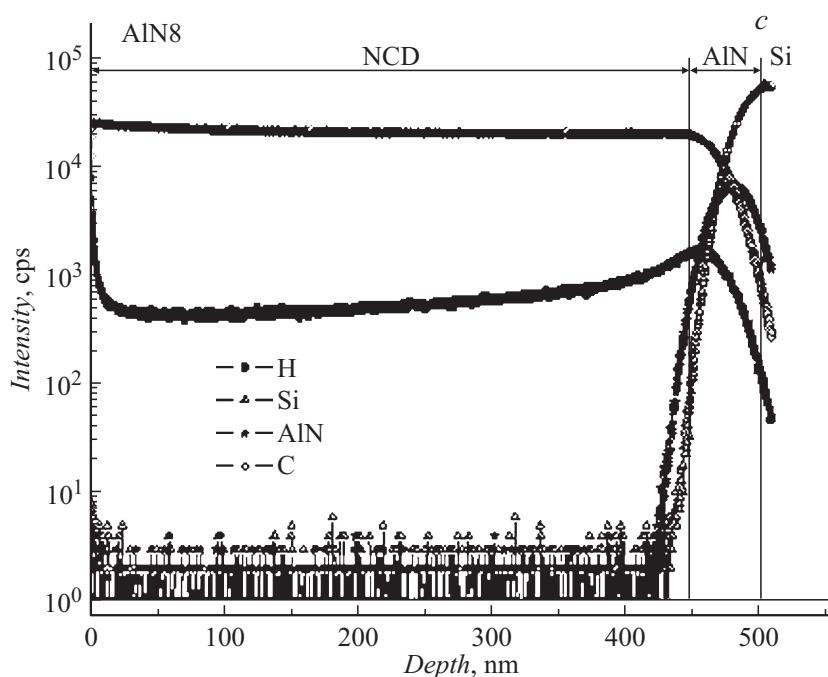


Рис. 2 (продолжение).

поликристаллический алмаз с кристаллитами таких размеров принято называть нанокристаллическим CVD-алмазом.

На рис. 2, с приведены профили концентраций различных элементов в образце 1357 (структуры NCD/AlN/Si(111)), измеренные методом ВИС (SIMS). Использовалась установка TOF.SIMS 5 фирмы IONTOF. Для измерения глубины кратеров травления структур и нормировки шкалы глубины анализа был использован интерферометр Talysurf CCI2000. Из рис. 2, с видно, что толщина пленки нанокристаллического алмаза около 400 nm, а толщина слоя AlN менее 100 nm. Основной примесью в пленке нанокристаллического алмаза является водород. После анализа структуры NCD/AlN/Si(111) проводилось доращивание алмазной пленки до толщины более 10 μm .

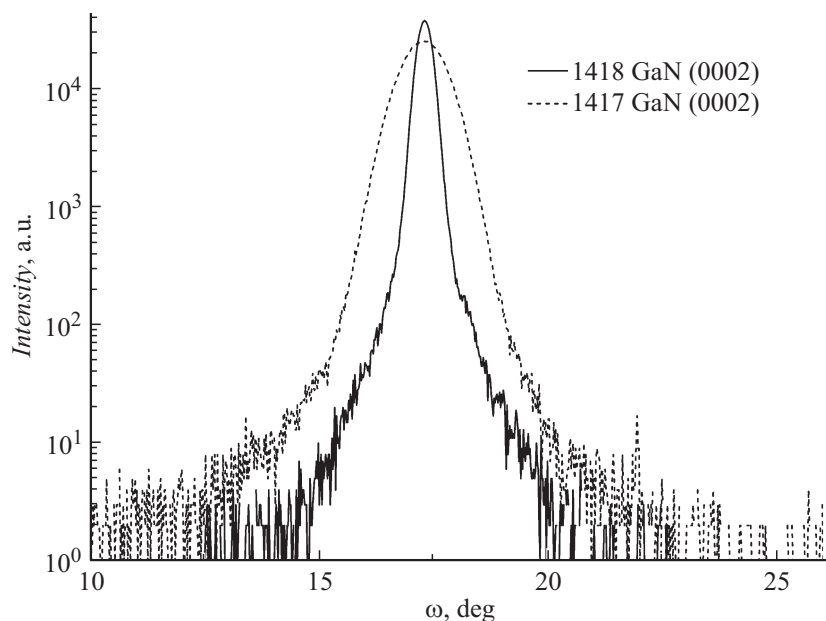


Рис. 3. Кривые качания отражения (0002) GaN для образцов 1417, 1418 (с низкотемпературным буфером).

На третьем этапе подложка Si стравливалась до слоя AlN методом селективного жидкостного травления. На последнем этапе в реакторе MOCVD на очищенной травлением поверхности AlN выращивался гетероэпитаксиальный монокристаллический слой GaN толщиной 500 nm. Таким образом, формировалась структура с монокристаллическими слоями GaN/AlN на подложке из нанокристаллического CVD-алмаза.

Для дальнейшего формирования приборных структур крайне важно кристаллическое качество слоев GaN. Поскольку слой AlN на границе с кремнием обычно имеет низкое совершенство, которое улучшается с толщиной, а в нашем случае рост толстого слоя GaN проводился как раз на поверхности, изначально граничившей с кремниевой подложкой, важно проверить, что слой GaN имеет приемлемое структурное качество. Исследование полученных слоев на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover показало, что слои GaN эпитаксиально сопряжены

с AlN и имеют ширину рентгенодифракционной кривой качания (0002) менее 1° . Для улучшения структурного совершенства слоя GaN была проведена попытка роста с использованием дополнительного низкотемпературного буфера. На рис. 3 приведены кривые качания отражения (0002) слоев GaN для двух образцов — с низкотемпературным буфером (1418) и без него (1417). При одинаковой ширине кривой качания отражения (0002) подслоя AlN ($\sim 1.5^\circ$) ширина кривой качания слоя GaN в образце с буфером составляет 0.35° , а в образце без буфера — 1° . Использование низкотемпературного буфера и увеличение толщины GaN позволит получать буферные слои GaN/AlN/NCD, пригодные для дальнейшего роста транзисторных структур.

Таким образом, в работе созданы монокристаллические слои GaN/AlN на нанокристаллической алмазной подложке. Использование дополнительного низкотемпературного буфера улучшает их кристаллическое качество, что указывает на перспективность использованного подхода. Предложенный подход не содержит таких дополнительных технологических операций, как переклейка структуры на временную подложку или изготовление составной подложки. Особенностью метода является то, что рост слоя GaN осуществляется уже на готовой структуре AlN/NCD и основная часть приборной структуры может быть выращена в одном технологическом процессе без последующих дополнительных операций. Показано, что полученные данным методом слои GaN на подложке нанокристаллического алмаза по качеству сопоставимы с GaN/Si(111).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства РФ по постановлению 220, договор № 14.B25.31.0021 с ведущей организацией ИПФ РАН. В работе использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Список литературы

- [1] Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера, 2011.
- [2] Федоров Ю. Электроника: НТБ. 2011. Т. 2. С. 92.
- [3] Diduck Q., Felbinger J., Eastman L.F. et al. // Electron. Lett. 2009. V. 45. P. 14.
- [4] Cho J., Li Z., Bozorg-Grayeli E. et al. // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 3013. V. 3. P. 79.

- [5] *Felbinger J.G., Chandra M.V.S., Sun Y. et al. // IEEE Electron Device Lett.* 2007. V. 28. P. 948.
- [6] *Via G.D., Felbinger J.G., Blevins J. et al. // Phys. Status Solidi. C.* 2014. V. 11. N 3–4. P. 871.
- [7] *Francis D., Faili D., Babić D. et al. // Diamond Relat. Mater.* 2010. V. 19. P. 229.
- [8] *Хрыкин О.И., Бутин А.В., Гапонова Д.М. и др. // ФТП.* 2005. V. 39. P. 21.
- [9] *Алтухов А.А., Вихарев А.Л., Горбачев А.М. и др. // ФТП.* 2011. Т. 45 (3). С. 403.
- [10] *Духновский М.П., Куликов Е.Н., Ратникова А.К. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* 2013. Т. 3 (518). С. 40.