

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА САПФИРОВЫХ ПОДЛОЖКАХ МЕТОДАМИ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

© 2019 г. А. А. Дедкова^{1,*}, М. О. Никифоров^{1,2}, С. В. Митько^{1,3}, В. Ю. Киреев¹

¹Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”,
Москва, Зеленоград, Россия

²АО “Элма-Малахит”, Москва, Зеленоград, Россия

³ООО “НТ-МДТ”, Москва, Зеленоград, Россия

*E-mail: dedkova@ckp-miet.ru

Поступила в редакцию 29.10.2018

После доработки 07.08.2019; 20.09.2019

Принята к публикации 20.09.2019

Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и спектральной эллипсометрии проведены исследования зародышевых слоев нитрида галлия (GaN) субнанометровой толщины, нанесенных при различных режимах в процессе атомно-слоевой эпитаксии (АСЭ) из триэтил галлия и аммиака на сапфировые подложки. Полученные зародышевые слои представляют собой островковые пленки с различной степенью покрытия поверхности подложек, состоящие из кристаллитов GaN, имеющих различные размеры и средние толщины в диапазоне 10–40 нм. Разработана программа обработки РЭМ-изображений, позволяющая проводить количественную оценку площади частиц, включений, фаз, присутствующих в пленках и на поверхности подложек. Показано, что методика обработки спектральных эллипсометрических измерений островковых пленок из кристаллитов GaN на сапфировых подложках по модели Максвелла–Гарнетта выявляет такую же тенденцию в площади покрытия подложек пленками, что и обработка РЭМ-изображений. Разработанные программа и методика позволили определить оптимальный режим АСЭ зародышевых слоев GaN на сапфировых подложках для формирования высококачественных НЕМТ-структур из шести реализованных режимов. Они могут быть также эффективно использованы при исследовании любых островковых пленок, слоев с включениями физических и химических фаз и систем коллоидных частиц, применяемых в процессе формирования микроэлектронных структур.

ВВЕДЕНИЕ

Нитрид галлия (GaN) обладает совокупностью физико-химических свойств и электрофизических параметров, позволяющих получать на его основе приборы, превосходящие по функциональным характеристикам приборы на других полупроводниках: кремнии (Si), арсениде галлия (GaAs), карбиде кремния (SiC) и нитриде алюминия (AlN) (табл. 1) [1, 2].

В настоящее время нитрид галлия является наиболее перспективным материалом для высокотемпературных, высоковольтных, сверхвысокочастотных (СВЧ) и сильноточных интегральных микросхем (ИМС), инжекционных лазеров, светодиодов коротковолнового диапазона и полупро-

водниковых приборов, среди которых выделяются транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторы) [3–5]. Объем мирового рынка продаж полупроводниковых приборов и систем СВЧ-электроники на основе нитридов материалов III группы (соединений III-N) в 2014 г. превысил 9 млрд долларов [6] и по реальным прогнозам [7] достигнет в 2020 г. 38–40 млрд долларов.

Из-за высокой температуры плавления GaN (~2500°C), высокого равновесного давления азота над расплавом и достаточно низкой температуры разложения GaN (~1000°C) [8] получение монокристаллических подложек GaN связано с технологическими трудностями, что обуславливает их высокую стоимость. В связи с этим получение

Таблица 1. Основные электрофизические параметры GaN в сравнении с другими материалами, используемыми в микроэлектронике

| Материал | Ширина запрещенной зоны, эВ | Относительная электропроводность | Подвижность электронов, см ² /В·с | Напряженность поля пробоя, МВ/см | Скорость электронов, 10 ⁷ см/с | Теплопроводность, Вт/см·К | Максимальная рабочая температура, °С |
|----------|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
| GaN | 3.4 | 10.4 | 900 | 3.3 | 2.7 | 1.3 | 700 |
| Si | 1.1 | 11.8 | 1350 | 0.3 | 1.0 | 1.5 | 300 |
| GaAs | 1.4 | 12.8 | 8500 | 0.4 | 2.0 | 0.5 | 300 |
| AlN | 6.2 | 9.5 | 300 | 11.7 | 2.0 | 2.5 | 500 |
| 4H-SiC | 3.26 | 10.0 | 650 | 2.0 | 2.0 | 4.9 | 600 |
| 6H-SiC | 3.0 | 9.7 | 370 | 2.4 | 2.0 | 4.5 | 600 |

Таблица 2. Характеристики подложек для эпитаксии структур GaN

| Параметр материала подложки | Материал подложки | | |
|---|-------------------|-----------------|-------------|
| | Si (111) | 4H-SiC | Сапфир |
| Стоимость 1 см ² , отн. ед. | 1 | 100 | 10 |
| Проводимость | Проводящая | Полуизолирующая | Изолирующая |
| Доступный диаметр пластин, мм | 300 | 50–150 | 50–150 |
| Теплопроводность, Вт/см·К | 1.5 | 4.9 | 0.47 |
| Рассогласование параметров кристаллических решеток относительно GaN, % | +17 | –3.5 | –14 |
| Рассогласование коэффициентов термического расширения относительно GaN, % | –50 | –18 | +3.0 |

Примечание. “+” или “–” означают, что данный параметр материала подложки больше или соответственно меньше аналогичного параметра GaN.

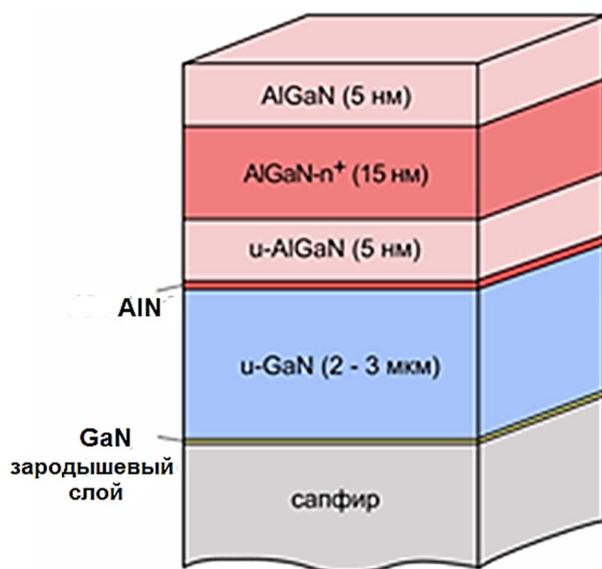


Рис. 1. НЕМТ-структура на основе нитрида галлия на сапфировой подложке диаметром 76.2 мм, толщиной 350–400 мкм и ориентацией (0001).

высококачественных слоев нитрида галлия на чужеродных подложках является актуальной задачей [9].

В настоящее время в промышленном производстве сформировались три основных направления изготовления гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на основе нитрида галлия, отличающихся материалом подложки, в качестве которого используются сапфир, карбид кремния и монокристаллический кремний. Указанные виды подложек существенно отличаются от нитрида галлия по значению параметра решетки, коэффициенту термического расширения (КТР) и уровню проводимости (табл. 2) [10].

При производстве ГЭС на основе GaN на сапфировых подложках, строение которых на примере НЕМТ-структур показано на рис. 1, существует проблема рассогласования кристаллических решеток нитрида галлия и сапфира (Al₂O₃) (табл. 2). Это приводит к изгибу системы эпитаксиальный слой – подложка и к высоким значениям механических напряжений и плотности структурных дефектов (дислокаций) в ГЭС.

Обычные пути решения указанных проблем состоят в разработке системы компенсирующих переходных слоев, а также применении методов локальной эпитаксии. Реализация этих подходов связана с необходимостью формирования сложной структуры, состоящей из большого количества слоев различного состава и толщины, и требует условий для прецизионного управления процессом роста с точностью до монослоя. Это является критичным фактором для традиционной схемы организации процесса выращивания ГЭС нитридных соединений на основе традиционного МОС-гидридного процесса эпитаксии.

Для решения данных технологических проблем компанией АО “ЭЛМА-Малахит” был разработан реактор для реализации комбинированного метода получения ГЭС нитридных соединений на основе процессов атомно-слоевой эпитаксии (АСЭ) и традиционного МОС-гидридного процесса эпитаксии (эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОС) и гидридных газов).

Такой подход к организации технологического процесса позволил использовать достоинства АСЭ для прецизионного осаждения зародышевых слоев GaN толщиной 10–50 нм на поверхность подложек перед ростом толстых эпитаксиальных структур μ -GaN 2–3 мкм (рис. 1) [11].

Термины “зародышевый слой” (*nucleated or seed layer*) или “зародышевая пленка” (*nucleated or seed film*) являются общепринятыми в микроэлектронике [12, 13]. При этом зародышевый слой может представлять собой как сплошную, так и островковую пленку. В рассматриваемом случае из-за большого рассогласования кристаллических решеток GaN и сапфира и малой (10–50 нм) толщины самих зародышевых слоев они практически всегда представляют собой островковые пленки, которые характеризуются [13]:

- средним значением площади покрытия частицами (гранулами, кристаллитами) пленки GaN поверхности сапфировой подложки;

- распределением покрытия частицами (гранулами, кристаллитами) пленки GaN по поверхности сапфировой подложки;

- средним значением площади (диаметра) частиц (гранул, кристаллитов) GaN на поверхности сапфировой подложки;

- средней эффективной толщиной пленки (кристаллитов) GaN на поверхности сапфировой подложки.

Таким образом, островковые пленки представляют собой наноструктурированные системы, характеристики которых управляют механизмами

адсорбции и реакций в адсорбированных слоях [14, 15]. Совокупность этих характеристик определяет поверхностную функциональность зародышевых слоев, от которой будут зависеть качественные и количественные физико-химические свойства выращиваемых на них НЕМТ-структур (рис. 1) [16].

Например, чем больше площадь покрытия зародышевым слоем GaN поверхности сапфировой подложки, чем равномернее он распределяется по поверхности подложки, чем меньше размеры кристаллитов GaN по площади и толщине, тем более качественные (с минимальными уровнями дефектов и механических напряжений) НЕМТ-структуры можно вырастить на таком зародышевом слое (рис. 1) [13].

Первые три характеристики зародышевых слоев нитрида галлия измеряются и определяются с помощью обработки изображений, получаемых на растровых электронных микроскопах (РЭМ-изображений). Четвертый параметр измеряется с помощью контактных профилометров исходя из определения средней эффективной толщины пленки.

Использование РЭМ-изображений для определения параметров зародышевых слоев нитрида галлия является дорогостоящей, сложной и длительной процедурой, которая не всегда может быть использована в производственных условиях.

Поэтому цели настоящей работы следующие:

- упростить и повысить производительность процедуры обработки РЭМ-изображений зародышевых слоев в виде островковых пленок;

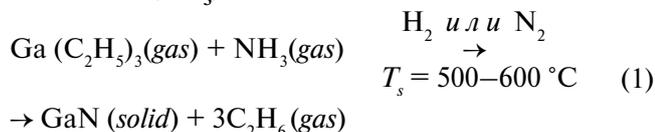
- заменить длительные и часто трудно доступные в производстве исследования зародышевых слоев в виде островковых пленок с помощью РЭМ-изображений на более оперативные и доступные исследования методом спектральной эллипсометрии;

- продемонстрировать возможности реализации первых двух целей на образцах зародышевых слоев GaN, полученных методом АСЭ, для определения оптимального режима АСЭ формирования зародышевого слоя с максимальной площадью покрытия сапфировой подложки, необходимого для получения высококачественных НЕМТ-структур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для улучшения параметров НЕМТ-структур (рис. 1) за счет повышения качества и воспроизводимости зародышевых слоев GaN, осаждаемых на сапфировые подложки, был модернизирован

реактор, используемый для МОС-гидридной эпитаксии, согласно патенту [17]. На модернизированном реакторе были проведены процессы атомно-слоевой эпитаксии (*atomic layer epitaxy* – ALE) [18] зародышевых слоев нитрида галлия из прекурсоров (реагентов) триэтил галлия (ТЭГ) ($\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) и аммиака (NH_3) согласно реакции



где H_2 или N_2 – газы-носители; T_s – температура подложки.

В настоящей работе для нанесения слоев GaN использовали трехдюймовые подложки сапфира ориентации [0001], которые перед началом АСЭ подвергались отжигу в течение 20 мин. Процессы АСЭ проводили при температуре $T_s = 524^\circ\text{C}$ на шести образцах в различных режимах.

В модернизированном реакторе сапфировая подложка на вращающемся подложкодержателе последовательно проходила зону подачи ТЭГ, зону продувки, зону подачи аммиака и зону продувки. Указанный способ получения эпитаксиальных полупроводниковых слоев нитрида галлия защищен патентом [17]. Режимы АСЭ зародышевых слоев GaN на шести образцах структур (сапфир – зародышевый слой GaN) приведены в табл. 3.

В настоящей работе анализ образцов структур, приведенных в табл. 3, по параметрам зародышевых слоев проводился методами:

- растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе Jeol JSM-6490 LV, оснащенном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром Bruker Quantax XFlash, и на электронном микроскопе FEI Quanta 3D FEG, оснащенном приставкой для генерации фокусированного ионного пучка;

- спектральной эллипсометрии на эллипсометрах Horiba Uvisel 2 и Horiba Auto SE.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований образцов методом растровой электронной микроскопии. Растровый электронный микроскоп позволяет изучать поверхность твердых тел с высоким разрешением (до 1 нм) и большой глубиной фокуса, что дает возможность визуализировать структуры с размерами в нанометровом диапазоне. Использование РЭМ совместно с другими интегрированными в него системами, а также программным обеспечением позволяет значительно расширить количество получаемой от объекта исследования информации:

- определять элементный состав;
- измерять линейные размеры;
- делать углубления в структуре объекта и смотреть его структуру в торец по глубине, измеряя толщины присутствующих в структуре слоев;
- проводить видеосъемку в реальном времени.

Поверхности зародышевых слоев GaN на сапфире для двух образцов из табл. 3 показаны на рис. 2, на котором видно, что на гладкой поверхности сапфировой подложки присутствуют включения (кристаллиты), представляющие собой отдельные гранулы GaN на поверхности Al_2O_3 . Для подтверждения этого предположения образец был проанализирован методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа на спектрометре, входящим в состав РЭМ. Суть метода заключается в измерении энергии характеристического рентгеновского излучения, возбужденного электронным лучом РЭМ. Для каждого химического элемента спектр характеристического излучения уникален, поэтому можно однозначно определить элементный состав в месте падения электронного пучка.

Таблица 3. Режимы атомно-слоевой эпитаксии зародышевых слоев нитрида галлия (GaN) из триэтил галлия (ТЭГ) и аммиака (NH_3) на сапфировых подложках в модернизированном реакторе

| Образец | Состав газовой смеси в реакторе | | Скорость вращения подложкодержателя, об./мин | Соотношение времен подачи NH_3 и ТЭГ |
|---------|---------------------------------|------------------------------------|--|---|
| | газ-носитель | отношение $\text{NH}_3/\text{ТЭГ}$ | | |
| Aix-26 | N_2 | $3 \cdot 10^5$ | 10 | 3.67 |
| Aix-27 | $\text{N}_2/\text{H}_2 = 3/1$ | $3 \cdot 10^5$ | 10 | 3.67 |
| Aix-29 | H_2 | $3 \cdot 10^5$ | 10 | 3.67 |
| Aix-31 | H_2 | $3 \cdot 10^5$ | 10 | 22 |
| Aix-32 | H_2 | $6 \cdot 10^5$ | 5.0 | 22 |
| Aix-33 | H_2 | $1,5 \cdot 10^6$ | 10 | 22 |

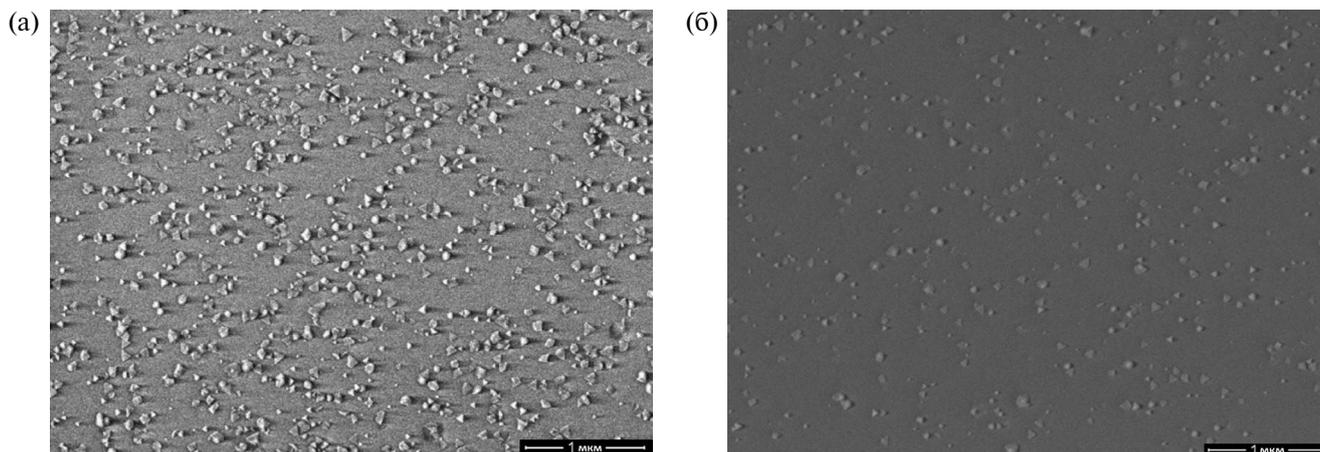


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности зародышевых слоев GaN на сапфире при одинаковом увеличении: образцы Aix-29 (а), Aix-32 (б).

Так как область, захватываемая при анализе электронным пучком РЭМ, существенно превышала размер кристаллита, то в спектрах должны быть видны как элементы кристаллита (Ga и N), так и элементы подложки (Al и O). Это подтверждается спектрами от образца Aix-29, полученными с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (рис. 3). Спектры доказывают, что кристаллиты представляют собой соединение GaN.

Одним из стандартных приемов обработки РЭМ-изображений с целью выделения включений в пленках или частиц на поверхности подложки является использование стандартной программы Gwyddion [19]. Однако использование данной программы применительно к полученным образцам является полуручной, длительной и малоэффективной процедурой. Поэтому была разработана программа автоматической обработки РЭМ-изображений образцов для анализа неоднородностей и частиц в пленках и на их поверхности [20].

Разработанная программа включает в себя процедуры фильтрации, коррекции и повышения контраста РЭМ-изображений пленок и частиц на поверхности подложек, а также расчета процентного соотношения областей с разной цветовой градацией. Она позволяет проводить количественную оценку по площади частиц, включений, фаз, присутствующих в пленках и на поверхности подложек.

На рис. 4 показаны исходное РЭМ-изображение поверхности образца Aix-26 (а); это изображение, обработанное стандартной программой Gwyddion (б) и разработанной программой (в). Видно, что разработанная программа значительно более контрастно выделяет кристаллиты нитрида галлия на поверхности сапфировой подложки, чем стандартная программа Gwyddion.

Кроме того, она проводит обработку изображения автоматически с высокой скоростью, тогда как в стандартной программе Gwyddion требуется присутствие и действия оператора для выбора процедуры обработки кристаллитов (гранул) и задания пороговых значений фильтров, которые замедляют скорость обработки. Процентное соотношение площади сапфировых подложек, покрытых кристаллитами (гранулами) GaN, рассчитанное по РЭМ-изображениям образцов с помощью разработанной программы, приведено в столбце 2 табл. 4.

Современные РЭМ являются низкопроизводительным (из-за процедуры подготовки образцов), трудно доступным и часто дорогостоящим в производственных условиях оборудованием, которое имеется не на всех технологических линиях и участках промышленного изготовления ГЭС на основе нитрида галлия. Поэтому в настоящей

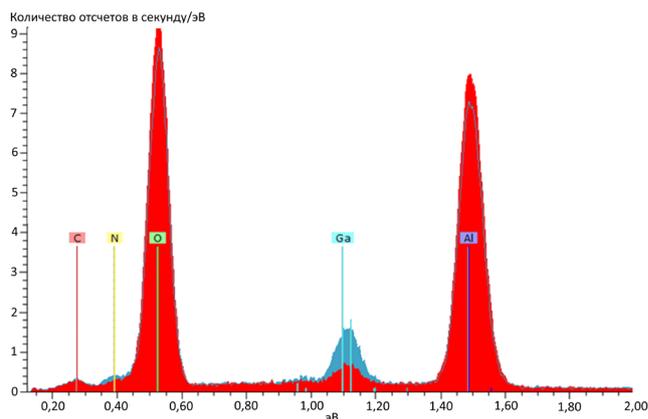


Рис. 3. Спектры, полученные методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа от образца Aix-29: красный – спектр от области сапфировой подложки; голубой – от области кристаллита на ее поверхности.

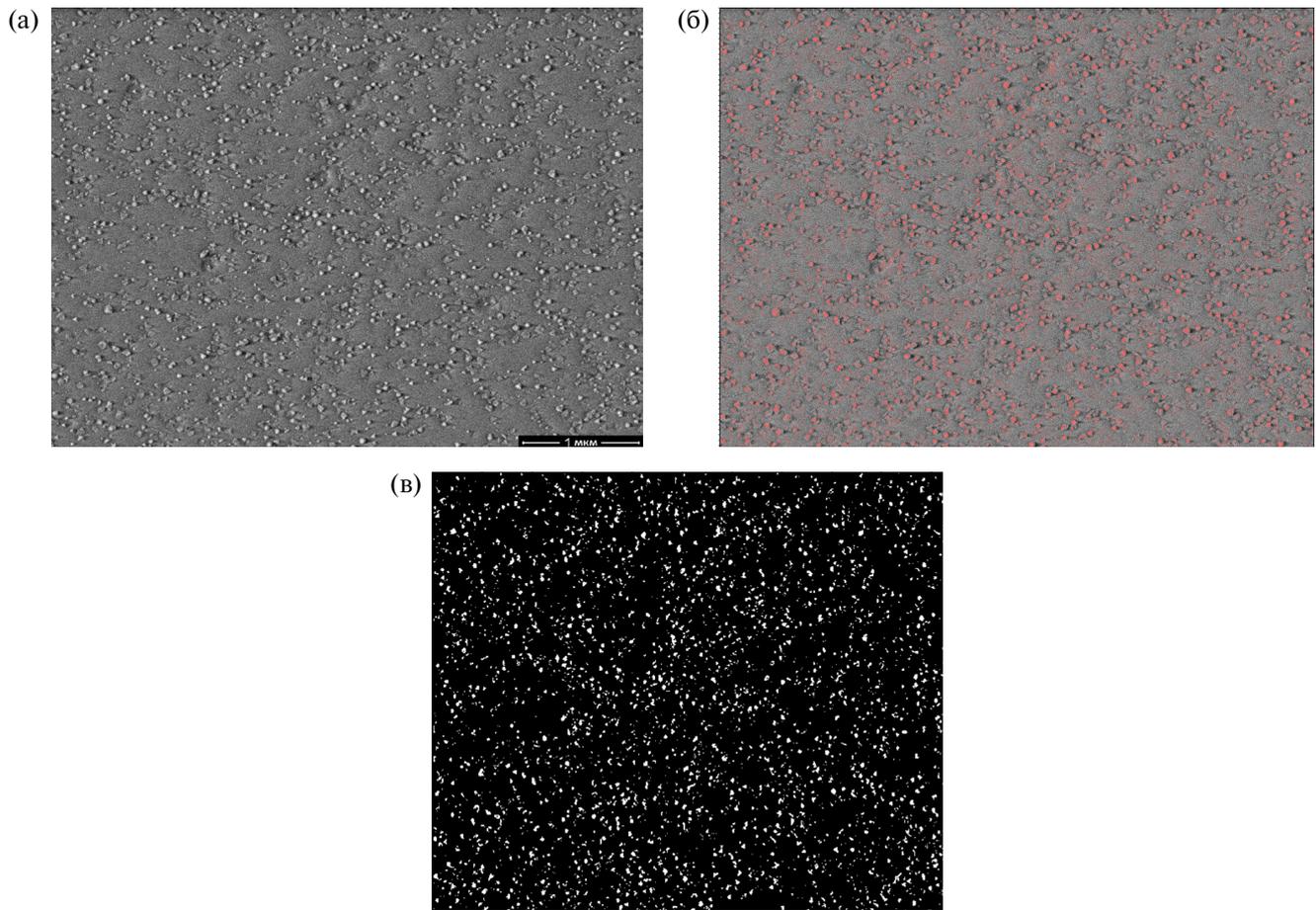


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности образца Aix-26: а – исходное изображение; б – изображение, обработанное стандартной программой Gwyddion (красным цветом выделены кристаллиты); в – изображение, обработанное разработанной программой.

Таблица 4. Сравнительные результаты определения на исследуемых образцах площадей покрытия поверхности сапфировых подложек слоями кристаллитов GaN, полученные на основе обработки РЭМ-изображений и спектральных эллипсометрических измерений

| Образец | Площадь кристаллитов GaN на поверхности подложки по результатам обработки РЭМ-изображений, % | Площадь кристаллитов GaN на поверхности подложки по результатам эллипсометрических измерений, % | Диапазоны толщин слоев кристаллитов GaN, измеренные механическим профилометром, нм |
|---------|--|---|--|
| Aix-26 | 7.1 | 11.5 | 30–40 |
| Aix-27 | 7.2 | 11.5 | 30–40 |
| Aix-29 | 9.0 | 13.0 | 30–40 |
| Aix-31 | 5.3 | 5.5 | 20–30 |
| Aix-32 | 2.6 | 4.5 | 25–30 |
| Aix-33 | 1.2 | 1.2 | 10–15 |

работе была сделана попытка параллельного исследования образцов как с помощью анализа РЭМ-изображений, так и методом спектральной эллипсометрии.

Результаты исследований образцов методом спектральной эллипсометрии. Общая структура опреде-

ления параметров оптической системы следующая: после считывания экспериментальной информации с исследуемой структуры подбирается модель, проводится процедура поиска наилучшего соответствия и анализируются результаты. Процесс повторяется до достижения целевого результата.

Процесс создания модели структуры представляет собой процедуру описания слоев, которые используются для представления материалов. Для каждого из слоев выбирается модель материала исходя из имеющихся в библиотеке программного обеспечения эллипсометра или наработанных данных конкретного исследователя. Задаются характеристики этого материала, а затем параметры для описываемого слоя в целом. При таком описании слоев могут быть учтены их различные параметры, в частности анизотропия, шероховатость, наличие переходных областей [21].

Для описания таких элементов структур, как рельеф поверхности, переходные слои и включения, на спектральных эллипсометрах *Horiba* в программном обеспечении *DeltaPsi2* используется моделирование с применением теории эффективных сред (*effective medium method*), позволяющее сделать выбор из двух основных вариантов [22, 23]:

- модель Максвелла–Гарнетта, предназначенная для описания малых объемных концентраций включений, не взаимодействующих друг с другом, распределенных в основном материале;
- модель Бруггемана, подходящая для описания включений различной концентрации и учитывающая взаимодействие этих включений.

Поскольку на РЭМ-изображениях поверхности полученных образцов (рис. 2) видно распределение кристаллитов (гранул) GaN на поверхности сапфировой подложки, то можно сделать вывод, что гранулы GaN представляют собой отдельные включения этого материала на подложке и наиболее эффективным представляется использование модели Максвелла–Гарнетта.

При моделировании структуры образцов они могут быть представлены как система, состоящая из двух слоев. При этом для нижнего слоя сапфира (Al_2O_3) учитывается возможная анизотропия, а верхний слой сформирован как сочетание некоторого количества кристаллитов GaN и воздуха. В данной модели не учитывалось отражение от обратной границы сапфировой подложки, но фиксировалась толщина слоя кристаллитов GaN и определялась степень покрытия поверхности подложки кристаллитами (гранулами) GaN, т.е. фактически процентное соотношение “гранул” к воздуху.

Для подстановки в модель необходимо определить значение средней толщины слоя кристаллитов GaN на поверхности образцов. С этой целью на поверхности каждого образца формировались две крестообразные полосы параллельно и перпендикулярно базовому срезу сапфировой подложки, на которых отсутствовал слой кристаллитов GaN. Используя эти полосы, на поверхности

каждого образца проводились многократные измерения толщины слоя кристаллитов GaN с помощью контактного профилометра *Alpha Step 200*.

По результатам измерений перепад высот на образцах между областями с кристаллитами GaN и областями без кристаллитов GaN (крестообразные полосы) составлял от 10 до 40 нм (табл. 4, столбец 4). При этом с учетом метода измерения и геометрии зонда наиболее выступающие над поверхностью гранулы (кристаллиты) GaN фиксировались как единый слой. Следовательно, полученные на образцах перепады высот превышены относительно значения средней толщины слоя кристаллитов GaN, которое в модели принималось равным 25 нм для всего набора образцов.

Процентное соотношение площади сапфировых подложек, покрытых кристаллитами (гранулами) GaN, рассчитанное по результатам эллипсометрических измерений, приведено в столбце 3 табл. 4.

В [13] показано, что оптимальным зародышевым слоем GaN на сапфировых подложках для производства качественных НЕМТ-структур является слой с максимальной площадью покрытия подложки. Это согласуется с общими законами образования и роста малодефектных и низконапряженных пленочных структур на различных по структуре и строению подложках и подслоях [24].

Таким образом, данные табл. 4 подтверждают, что метод обработки РЭМ-изображений и метод спектральной эллипсометрии имеют одинаковую тенденцию при анализе образцов. Согласно обоим методам лучшим образцом, сформированным в оптимальном режиме, характеризующимся максимальной площадью покрытия площади сапфировой подложки слоем кристаллитов GaN, является образец *Aix-29*.

Поэтому режим получения зародышевого слоя на образце *Aix-29*, приведенный в табл. 3, является оптимальным из всех реализованных режимов для формирования качественных НЕМТ-структур.

ВЫВОДЫ

Разработана программа обработки РЭМ-изображений для анализа неоднородностей и частиц в пленках и на их поверхности. Эта программа в отличие от стандартной программы *Gwyddion* позволяет по РЭМ-изображениям автоматически проводить количественную оценку площади частиц, включений, фаз, присутствующих в пленках и на поверхности подложек. Таким образом, повышается производительность контроля параметров островковых пленок.

Показано, что обработка спектральных эллипсометрических измерений образцов островковых

пленок и подложек с неоднородностями и частицами по модели Максвелла–Гарнетта выявляет такую же тенденцию в их эволюции, что и обработка РЭМ-изображений. Данный факт открывает возможность использования спектрального эллипсометра в качестве базового инструмента для анализа таких структур в промышленном производстве вместо низкопроизводительного, труднодоступного и обычно более дорогостоящего растрового электронного микроскопа.

Применительно к исследуемым образцам зародышевых слоев GaN, полученных методом АСЭ, можно сделать вывод, что оптимальным для формирования высококачественных НЕМТ-структур из всех реализованных режимов, при котором площадь покрытия сапфировой подложки кристаллитами GaN максимальна, является режим, при котором сформирован образец Аix-29.

Полученные методики могут быть эффективно использованы при исследовании нанослоев, коллоидных частиц, включений, физических и химических фаз в пленках различных материалов, применяемых в процессе формирования микроэлектронных структур.

Благодарности. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Микросистемная техника и электронная компонентная база” МИЭТ при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по контракту № 16.2475.2017/4.6 с использованием Центра НТИ “Сенсорика” МИЭТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю. и др. Транзистор на GaN пока самый “крепкий орешек” // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2005. № 4. С. 20.
2. Федоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2011. № 2. С. 93.
3. Куэй Р. *Электроника на основе нитрида галлия*. М.: Техносфера, 2011. 592 с.
4. Туркин А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // *Компоненты и технологии*. 2011. № 5. С. 6.
5. Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы // Тезисы докладов 3-й Всероссийской конференции. 7–9 июня 2004 года, Москва. СПб.: Издательство СПбГПУ, 2004. 181 с.
6. Мальцев П., Шахнович И. СВЧ-технологии – основа электроники будущего: тенденции и рынки // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2015. № 8. С. 72.
7. Стратегическая программа исследований технологической платформы “СВЧ технологии”. Москва. 2017. new.isvch.ru/wp-content/uploads/2017/05/svch_tech_may.doc. (http://new.isvch.ru/tp/doc_tp/)
8. Harafuji T., Kawamura J. Molecular dynamic simulation for evaluating melting point of wurtzite-type GaN crystal // *Appl. Phys.* 2004. V. 96. P. 2501. 10.1063/1.1772878.
9. Voronkov V.V., Virko M.V., Kogotkov V.S. et al. On the Laser Lift-Off of Lightly Doped Micrometer-Thick n-GaN Films from Substrates via the Absorption of IR Radiation in Sapphire // *Semiconductors*. 2017. V. 51. № 1. P. 115. 10.1134/S1063782617010249.
10. Арендаренко А.А., Орешкин В.А., Свешников Ю.Н., Цыленков И.Н. Тенденции развития эпитаксиальной технологии нитридных соединений // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2015. Т. 18. № 1. С. 5. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-1-5-15>.
11. Осинский В.И., Прищена Н.П. Начальные стадии эпитаксии III-нитридов на сапфире // *Электроника и связь. Тематический выпуск “Электроника и нанотехнологии”*. 2009. Ч. 2. С. 23.
12. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology* / Eds. Nishi, Doering R. Marcell Dekker Inc., N.Y. USA. Second Edition. 2008. Ch. 16. P. 41.
13. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. // *Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике*. М.: Техносфера, 2016. С. 71.
14. Асеев А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // *Российские нанотехнологии*. 2006. Т. 1. № 1–2. С. 97.
15. Ковальчук М.В. Нанотехнологии – фундамент новой наукоемкой технологии XXI века // *Российские нанотехнологии*. 2007. Т. 2. № 1–2. С. 6.
16. Максимов С.К., Максимов К.С. Контроль поверхностной функциональности наноматериалов // *Российские нанотехнологии*. 2009. Т. 4. № 3–4. С. 93.
17. Буробин В.А., Зверев А.В., Арендаренко А.А. Способ получения эпитаксиального слоя бинарного полупроводникового материала на монокристаллической подложке посредством металлоорганического химического осаждения из газовой фазы. Патент РФ № 2548578 от 24.04.2015
18. Малыгин А.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания // *Российские нанотехнологии*. 2007. Т. 2. № 3–4. С. 87.
19. Руководство пользователя Gwyddion. <http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-ru.pdf>.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664620. Программа обработки изображений растровой электронной микроскопии для анализа неоднородностей и частиц в пленках. Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Дюжев Н.А. Дата регистрации в Реестре программ 20 ноября 2018 года.
21. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Михайлов Н.Н. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субмикронным разрешением // *Российские нанотехнологии*. 2009. Т. 4. № 3–4. С. 106.
22. Fujiwara Hiroyuki *Spectroscopic Ellipsometry*. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 370 p.
23. Tompkins H.G., Irene E.A. *Handbook of Ellipsometry*. William Andrew, Springer. 2006. 891 p.
24. *Технология тонких пленок: Справочник в 2-х томах / Под ред. Майссела Л., Глэнга Р. / Перевод с англ. под ред. Елинсона М.И., Смолко Г.Г. М.: Советское радио, 1977. Т. 2. Гл. 8. С. 9.*