

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Леонидов Андрей Алексеевич

**Исследование толстых слоев GaN, полученных методом хлорид-гидридной
эпитаксии из паровой фазы**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_07 Физика полупроводников

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Леонидов Андрей Алексеевич

Научный руководитель: проф., д.ф.-м.н.
Шретер Юрий Георгиевич

Санкт Петербург – 2018

Научно-квалификационная работа выполнена на кафедре ФПиНЭ Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Зав. кафедрой:	Фирсов Дмитрий Анатольевич д.ф.-м.н., проф.
Научный руководитель:	Шретер Юрий Георгиевич д.ф.-м.н., проф.
Рецензент:	Вороненков Владислав Валерьевич к.ф.-м.н. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, н.с.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В современном мире полупроводниковые технологии развиваются стремительными темпами. Кремний, германий, арсенид галлия и другие материалы, технологии производства которых освоены достаточно хорошо для получения высококачественных кристаллов и производства на них любых типов приборов, по свойствам вплотную подошли своим теоритическим пределам. Для того, чтобы иметь возможность конкурировать с мировыми лидерами полупроводниковой промышленности такими как США и Япония, необходимо активно развивать направление нитридных полупроводников, обладающих выдающимися физическими свойствами и позволяющими создавать приборы, уже на данный момент превосходящие по характеристикам существующие кремниевые и прочие аналоги.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является разработка методики получения свободностоящих пленок нитрида галлия диаметром два дюйма и толщиной не менее 300 мкм.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- Исследовать существующие методы получения свободностоящих пленок нитрида галлия с целью определить наиболее подходящие для использования на имеющемся оборудовании. Предложить метод получения свободностоящих пленок GaN, который может быть реализован в одном технологическом процессе с эпитаксиальным осаждением.
- Модернизировать существующее оборудование для выращивания кристаллов нитрида галлия для реализации выбранных методов получения свободностоящих пленок нитрида галлия.

- Реализовать процесс выращивания и отделения толстых эпитаксиальных слоев нитрида галлия.
- Исследовать получившиеся образцы, определить применимость и возможности дальнейшего усовершенствования разработанной методики.

Научная новизна

1. Продемонстрирована возможность получения свободностоящих эпитаксиальных слоев нитрида галлия с ориентацией поверхности (0001) на слое аморфного алмазоподобного углерода, осажденного на подложке сапфира в процессе высокотемпературного пиролиза метана.
2. Продемонстрирована возможность получения пористого нитрида галлия путем травления объемных слоев нитрида галлия в потоке смеси хлороводорода, водорода и азота.

Практическая значимость

1. Разработана и испытана методика выращивания и самоотделения толстых (свыше 300 мкм) эпитаксиальных слоев нитрида галлия, основанная на создании буферного слоя аморфного алмазоподобного углерода.
2. Разработана методика травления объемного нитрида галлия, позволяющая создавать пористые слои GaN толщиной от 10 мкм.

Апробация работы

Основные положения и результаты проведенных экспериментов, описанные в работе, докладывались и обсуждались на конференциях: XI Всероссийской Конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы" (Москва 2017), XII Российская Конференция По Физике Полупроводников, (Ершово 2015).

Публикации

По теме научной работы опубликовано 4 научные работы, в том числе, 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ

Представление научного доклада: основные положения

1. На тонких слоях (10-60 нм) аморфного алмазоподобного углерода, нанесенных на подложку сапфира, возможен эпитаксиальный рост нитрида галлия, плоскость с которого параллельна плоскости с сапфира.
2. Возможность отделения объемного нитрида галлия от подложки сапфира с нанесенным на нее тонким слоем аморфного алмазоподобного углерода определяется толщинами углеродного слоя и эпитаксиального слоя нитрида галлия. Отделение пленки нитрида галлия от подложки происходит без растрескивания при толщинах углерода около 40 нм и нитрида галлия около 365 мкм.
3. В смеси хлороводорода, водорода и азота при температурах выше 980°C и парциальных давлениях водорода и хлороводорода выше 10% и 0.5% соответственно происходит анизотропное травление нитрида галлия с образованием пористого материала. Степень пористости, а также скорость травления определяется температурой процесса и парциальными давлениями реактивных газов.

Содержание работы

1. В первой главе работы проводится анализ существующих методов отделения и самоотделения пленок нитрида галлия от ростовых подложек. Рассматриваются основные существующие способы отделения: создание промежуточных слоев, ослабляющих интерфейс, ослабление интерфейса с помощью полостей, использование масок и использование параметров роста. Обсуждаются плюсы и минусы каждого подхода, оценивается возможность применения данных методов в условиях лаборатории, в которой работает автор.
2. Вторая глава посвящена непосредственно разработке метода отделения пленок нитрида галлия с помощью слоев аморфного алмазоподобного углерода, наносимых *in situ* на сапфировые подложки. Анализируется возможность использования существующего оборудования для напыления слоев аморфного алмазоподобного углерода и возможность реализации всех этапов роста пленки в одном технологическом процессе.
3. В третьей главе анализируется возможность использования газовой смеси HCl , H_2 , N_2 в качестве реагента для вытравливания полостей в слое нитрида галлия и ослабления тем самым связи выращиваемого материала с ростовой подложкой. Приводятся результаты серии экспериментов по такому травлению, проведенной с изменением температуры и концентрации реактивных газов в атмосфере ХГФЭ-реактора.

Объекты, предмет и методы исследования

Объектом исследования являются толстые (толщиной больше 150 мкм) пленки нитрида галлия, выращенные методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии.

Предметом исследования являются процесс самоотделения толстых пленок нитрида галлия от ростовой подложки при использовании в качестве буферного слоя аморфного алмазоподобного углерода толщиной в несколько десятков микрон и процесс травления нитрида галлия в смеси HCl , H_2 и N_2 .

Методологической основой исследования являются общенаучные методы анализа, структурный и сравнительный анализ, экспериментальный и другие общенаучные методы.

Результаты и их обсуждение

1. Анализ существующих методов самоотделения слоев нитрида галлия

Нитрид галлия (GaN) - широкозонный прямозонный полупроводник со структурой типа вюрцит, шириной запрещенной зоны 3,4эВ при комнатной температуре и высокой подвижностью электронов [1]. Все это наряду теплопроводностью около 250Вт/мК [2] делает GaN материалом подходящим для производства светодиодов (LED), лазеров, СВЧ и силовых приборов [3].

Несмотря на то, что первые работы по получению монокристаллического GaN , пригодного для изучения оптических и электрических свойств, относятся к концу 1960-х годов [4], на сегодняшний день все технологии, которые используются для выращивания GaN еще далеки от совершенства. Основная часть производимых пластин выращивается путем гетероэпитаксии на подложках сапфира или карбида кремния, что ухудшает характеристики полученных слоев из-за разницы в постоянных решетки и коэффициентах термического расширения. Использование же для производства приборов слоев, выращенных на подложке из GaN позволяет получить продукцию более высокого качества. Это повышает интерес к получению толстых слоев нитрида галлия. Поскольку эксперименты показывают недостижимость на данный момент предполагаемых условий плавления данного материала: давление в 9 ГПа и температура в 3400 К не позволяют расплавить нитрид галлия, для получения объемных кристаллов используются методы выращивания из газовой фазы (хлорид-гидридная газофазная

эпитаксия - ХГФЭ (HVPE), МОС-гидридная эпитаксия (МОСVD)), в сверхкритическом аммиаке (аммонотермальный), из раствора высокого давления и из раствора натрий-галлий.

Одним из наиболее гибких в плане скорости роста, изменения состава материала в сочетании с возможностью легирования получаемой пластины является метод ХГФЭ. Как и все остальные, эта технология постоянно совершенствуется, решаются различные проблемы, возникающие по мере увеличения площади и толщины выращиваемых кристаллов. Уже сейчас многими группами достигаются толщины в несколько миллиметров при количестве макродефектов $\sim 1 \text{ см}^{-2}$ и меньше, и отсутствии трещин. Одной из актуальных проблем остается снижение стоимости процесса получения свободностоящего кристалла нитрида галлия. Решение может достигаться путем использования лазерного излучения, создания жертвенных слоев, создания ослабленных слоев путем ионной имплантации, создания условий для самоотделения во время роста либо при остывании.

Самоотделение пленки нитрида галлия от ростовой подложки является привлекательным путем получения свободностоящих пластин материала. Такой способ существенно уменьшает трудозатраты на постростовую обработку пластин, необходимую при отделении пластин методами механической шлифовки [5], лазерного отделения [6], химического травления жертвенного слоя [7] и прочими. Однако, это приводит к необходимости производить предварительную подготовку пластин. В зависимости от технологии этот процесс может проходить как *in situ*, так и *ex situ*. Все способы самоотделения можно условно разделить на 4 типа:

- Нанесение промежуточных слоев, ослабляющих интерфейс материал-подложка
- Использование различных масок
- Ослабление интерфейса с помощью пустот, протравливаемых в материале
- Использование параметров роста для отделения за счет термостресса при охлаждении

Причем особенностью первых двух способов является необходимость учитывать наличие примесных элементов в системе ростовой камеры, поскольку они оказывают влияние на качество структуры выращиваемого материала. Для выбора наиболее подходящего для применения в условиях нашей лаборатории метода создания свободностоящих слоев нитрида галлия был проведен сравнительный анализ статей научных групп, исследовавших различные подходы к решению данного вопроса. Поскольку целью диссертационной работы являлось разработать метод получения целой свободностоящей пленки нитрида галлия диаметром 2 дюйма без ямок роста и трещин на поверхности в одном процессе, именно эти критерии и легли в основу сравнения существующих методов, представленного в таблице 1.

Идея	Метод	Наличие питов/трещин	Полнота отделения	Осуществимость в одном процессе (in situ)	Требования к попаданию в режим
промежуточные слои	углеродные нанотрубки	присутствуют	2 дюйма полностью	нет	низкие
	алмазоподобный углерод	отсутствуют	частичное, большими кусками	да	низкие
	графен	отсутствуют	частичное, кусками (по 1 см ²)	нет	низкие
маски	WSiN	присутствуют	2 дюйма полностью	нет	низкие
	Si ₃ N ₄ , SiO ₂	присутствуют	2 дюйма полностью	нет	низкие
полости	пористый GaN	присутствуют	маленькими кусочками (0.25 см ²)	да	высокие
	вытравливание	присутствуют	маленькими кусочками (0.25 см ²)	да	высокие
термостресс	пульсирующая модуляция потока	отсутствуют	2 дюйма полностью	да	высокие
	термоподготовка подложки	отсутствуют	2 дюйма полностью	да	высокие

Таблица 1: Сравнение существующих методов самоотделения.

Все перечисленные способы отделения приводят к получению целой или разделенной на отдельные куски свободностоящей пленки GaN. Несмотря на очевидные плюсы различных техник (низкая стоимость, простота реализации), все они обладают минусами (загрязнение материала примесями, уменьшение скорости получения необходимой толщины, увеличение стоимости процесса и пр.). Тем не менее, многие из предложенных методик даже в том виде, в котором они описаны, обеспечивают получение материала, пригодного для изготовления на его основе полупроводниковых приборов, а некоторые могут применяться в промышленном производстве. К сожалению, пока на рынке отсутствуют качественные подложки для гомоэпитаксиального роста GaN, производителям придется использовать свободностоящие пластины, полученные каким-либо из методов отделения или самоотделения.

2. Разработка и реализация метода самоотделения нитрида галлия от ростовой подложки с использованием атмосферы ХГФЭ-реактора

При выборе основы для разрабатываемого метода мы руководствовались следующими критериями:

- Метод должен быть реализован силами нашей группы с привлечением минимального количества сторонних участников.
- Простота и скорость разрабатываемого метода должны обеспечивать производительность не менее 6 готовых образцов в сутки на текущей конфигурации оборудования.
- Допускается модернизация существующего нашего оборудования без привлечения сторонних участников
- Допускается использование двух и более ростовых процессов в разных ХГФЭ реакторах с переносом образца между ними.

Основа экспериментальной деятельности нашей лаборатории - два ХГФЭ-реактора нашей лаборатории, способные работать в тандеме:

1. Планетарный ХГФЭ-реактор, рассчитанный на 6 подложек диаметром 2 дюйма. Максимальная толщина выращиваемых образцов не превышает 300 мкм, однако, в целях уменьшения деградации арматуры за счет термоциклирования толщина, как правило, ограничивается 50-100 мкм.
2. Вертикальный ХГФЭ-реактор, рассчитанный на одну подложку диаметром до 3 дюймов. Максимальная толщина выращиваемых образцов диаметром 2 дюйма составляет 5 мм.

Существующие ограничения по количеству ростового оборудования не позволяют говорить о реализации в разумные сроки методов, требующих точного подбора режимов роста или режимов подготовки образца *in situ*.

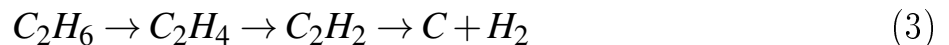
В результате приведенных выше фактов, а также того, что нитрид галлия наследует пространственную ориентацию кристаллической решетки сапфира через слой аморфного алмазоподобного углерода [8], было решено взять за основу метод, основанный на нанесении на сапфировую подложку слоев аморфного алмазоподобного углерода.

Оба реактора нуждаются в профилактической чистке: первый - после каждого ростового процесса, теоретическая возможность второго - 15 образцов толщиной 300 мкм, однако, количество галлия в лодочке существенно влияет на КПД хлорирования, что приводит к необходимости многократной коррекции потоков газов, подбираемой экспериментально. Поэтому было принято решение использовать одноподложечный реактор для выращивания только 6 образцов, после чего выполнять профилактику и пополнять количество галлия в лодочке.

Таким образом, алгоритм работы состоит из двух этапов: выращивание с помощью первого реактора на подложке сапфира двухслойной структуры углерод (~ 10 нм)-нитрид галлия (~ 10 мкм), перенос образцов в специальных контейнерах во второй реактор, выращивание на подготовленных темплейтах слоев GaN

толщиной около 300 мкм. Данный порядок действий позволяет непрерывно использовать мощности обеих ростовых установок в режиме «рост-профилактика-рост».

Получение чистого углеродного слоя в условиях атмосферы ХГФЭ реактора можно обеспечить за счет пиролитического разложения метана при температурах выше 1000 градусов С (1, 2, 3).[9]



Управление скоростью протекания химической реакции осуществляется с помощью изменения концентрации добавочного водорода в атмосфере реактора, что позволяет задавать толщину углеродной пленки с необходимой точностью. Необходимо также учитывать тот факт, что на начальном этапе роста GaN, незащищенный углерод взаимодействует с приходящим аммиаком, что определяет минимальную начальную толщину слоя углерода для его сохранения на момент срастания зародышей нитрида галлия.

При переносе образцов от одного реактора к другому происходит контакт поверхности материала с атмосферным воздухом, также возможно оседание микрочастиц пыли, являющихся потенциальными центрами макродефектов кристалла. Для минимизации влияния этих факторов была предложена процедура очистки поверхности образца с помощью газовой смеси, состоящей из HCl, NH₃, H₂ и N₂, что по сути своей является травлением тонкого слоя нитрида галлия с поверхности образца. Итоговый режим травления, использовавшийся при выращивании образцов был подобран экспериментально, детально вопрос травления будет рассмотрен ниже.

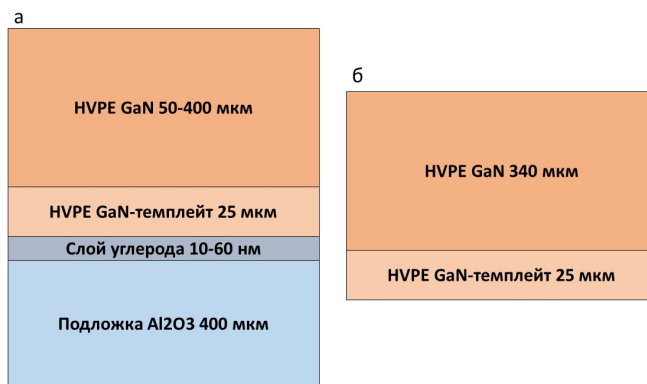


Рис. 1: Схематические изображения получаемой структуры (а) и предполагаемого успешного результата эксперимента (б).

3. Оценка возможности применения разработанного метода при реализации полного ростового цикла в одном процессе на имеющемся оборудовании.

Возможны несколько путей реализации ростового цикла с последующим отделением пленки нитрида галлия от ростовой подложки, чтобы понять, какой из них лучше использовать, рассмотрим оба.

3.1. Напыление углеродного слоя в одноподложечном реакторе с последующим выращиванием на нем слоя нитрида галлия необходимой толщины.

Данный способ требует подключения к газовой системе метановой линии, что является чисто техническим вопросом. Однако при этом скорость производства образцов снизится за счет подготовки каждого из темплейтов в отдельности. Также необходимо обратить внимание на возможность перепыления углерода, осажденного на стенках реактора, что приведет к изменению режима для всех процессов, следующих за первым. Следовательно, требуется проводить очистку реактора после каждого ростового процесса, что приводит к еще большему снижению скорости получения образцов.

3.2. Напыление углеродного слоя в шестиподложечном реакторе с последующим выращиванием на нем слоя нитрида галлия необходимой толщины.

Поскольку деградация арматуры реактора, выполненной из карбида кремния не позволяет выполнять рост пленок толщиной 300 мкм без существенного ущерба для реакционной камеры, был проведен поиск материалов, стойких к атмосфере и температурам ХГФЭ-реактора. Наилучшие результаты показали изделия, выполненные из нитрида бора. Являясь соединением с низкой адгезией к нитриду галлия, BN наряду с этим вносит несущественное количество примеси в получаемый материал.

Тестовые образцы реакторной арматуры показали превосходную устойчивость к деградации при термоциклировании ростовой камеры во время роста слоев нитрида галлия толщиной около 300 мкм. Однако данный вопрос требует более подробного изучения.

4. Анализ потенциала обработки нитрида галлия хлористым водородом в атмосфере ХГФЭ-реактора для безуглеродного отделения слоев нитрида галлия от ростовой подложки.

4.1. Использование травления нитрида галлия с помощью HCl для предростовой подготовки поверхности образца.

При переносе образца между установками, как и при загрузке подложки в реактор перед ростом возможно попадание на поверхность микрочастиц из воздуха, помимо этого происходит контакт материала с атмосферными газами, что в сумме может с высокой вероятностью привести к росту дефектного образца. Для предотвращения снижения качества получаемых образцов была предложена процедура очистки образца путем травления с помощью HCl.

Подбор оптимального режима был выполнен с помощью ростовых экспериментов, в которых полученные на одинаковых темплейтах, подготовленных на шестиподложечном ХГФЭ-реакторе нашей лаборатории, образцы отличались только режимом подготовки поверхности темплейта (менялись время, температура и потоки водорода и хлороводорода). Потоки и температура, обеспечи-

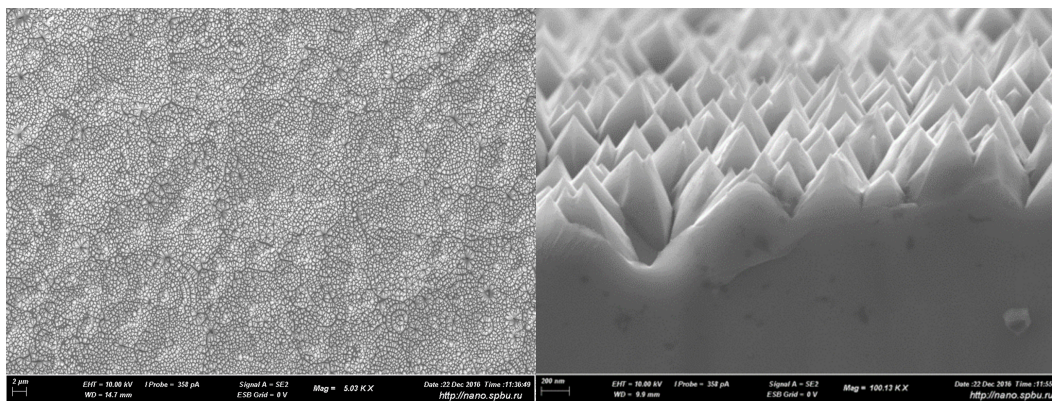


Рис. 2: Микрофотографии пленки нитрида галлия после предростовой подготовки в присутствии HCl и H_2 , выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Вид сверху (слева) и вид со скола (справа).

вающие наивысшее качество выращиваемой пленки были выбраны в качестве эталонных и использовались для дальнейших экспериментов. На рис. 2 приведены фотографии поверхности "эталонного" темплейта, выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа, после обработки хлоридом водорода. Видно, что пирамидальные образования, покрывающие образец однородны по размеру и величине угла при вершине.

4.2. Использование травления нитрида галлия с помощью HCl для создания условий для самоотделения выращиваемой пленки от ростовой подложки.

Возможность использования вытравливания полостей в слоях нитрида галлия для отделения пленок от ростовой подложки была рассмотрена в работе тайваньского коллектива национального университета Chiao Tung еще в 2011 году [10]. Использование хлорида водорода вместо водорода в нашем процессе позволяет увеличить скорость травления, поскольку стравливание происходит за счет химической реакции Cl с Ga , а не за счет транспортировки паров металла газом-носителем.

Для оценки возможности применения смеси хлороводорода, водорода и азота для вытравливания полостей была проведена серия экспериментов по травлению пленок нитрида галлия в атмосфере ХГФЭ-реактора при различных условиях: температуре, концентрациях HCl и H_2 . В качестве своеобразной точки

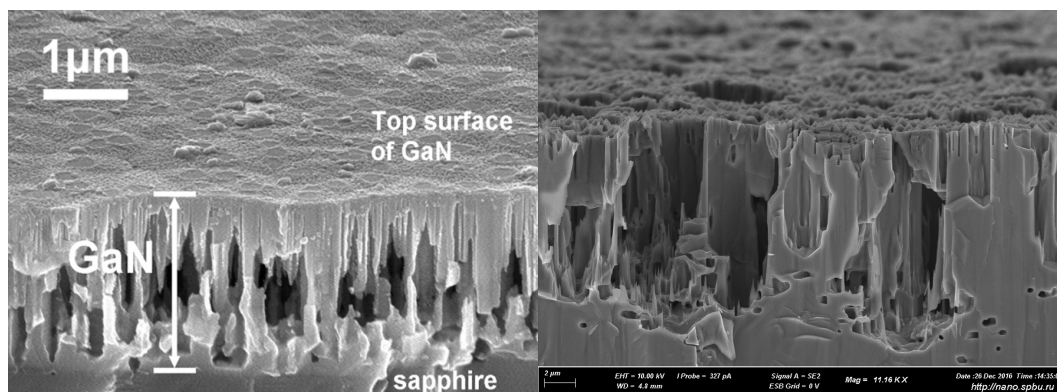


Рис. 3: Микрофотографии пленок нитрида галлия, выполненные с помощью сканирующей электронного микроскопа. Травление образцов было выполнено китайской научной группой в атмосфере с присутствием водорода (слева) и научной группой, в состав которой входит автор данной работы (справа).

отсчета был использован режим травления, описанный выше. При увеличении количества пропускаемых через реактор газов и температуры поверхность образца становится менее однородной: появляются пирамидальные образования с меньшим углом при вершине, причем, как правило, неоднородность касается не отдельных пирамид, а имеет доменный характер. Растет также и скорость травливания. При существенном увеличении значений всех параметров происходит избирательное вытравливание материала, предположительно, вдоль областей с наименее совершенной кристаллической структурой (дислокации, области сращивания кристаллитов), что потенциально может открыть возможность для безуглеродного самоотделения выращенных пленок нитрида галлия.

В результате был получен широкий набор режимов травления, обеспечивающих получение поверхности нитрида галлия различной шероховатости и однородности. При этом, в некоторых режимах наблюдался интересный эффект: как и в работе [10] происходило вытравливание материала из-под поверхности образца, образовывались «каверны». На рисунке 3 отчетливо видно качественное сходство пустот, полученных при травлении в таком режиме, с результатами, полученными китайскими коллегами.

Ослабленный интерфейс формируется за счет множества тонких колонн и может быть легко разрушен напряжениями, возникающими при росте или в про-

цессе остывания. Предполагается, что более точный подбор режима травления обеспечит получение однородных, равномерно распределенных полостей по всей площади подложки.

5. Результат проведения серии ростовых экспериментов.

В результате экспериментов была получена серия образцов с толщиной пленок GaN от 50 до 400 микрон (посмотреть записи Фила по толщинам) и толщиной пленок углерода от 10 до 60 нм. При этом наилучший результат был достигнут при толщинах углерода и нитрида галлия 40 нм и 365 мкм соответственно. В этом случае в процессе остывания образца произошло полное отделение пленки нитрида галлия диаметром 2 дюйма (схематично результат представлен на рис. 4 б). Неоднородность образца по толщине вдоль диаметра, измеренная с помощью микрометрического винта, составила не более 5%. При изучении азотной стороны полученной пленки на установке сканирующей электронной микроскопии (SEM), оборудованной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDX) были обнаружены следы углерода (рис. 4 в),

что подтверждает факт осаждения нитрида галлия именно на углеродной пленке. Также в результате применения электронной микроскопии были обнаружены выколы сапфира из подложки микронных размеров, изображенные на рис. 4 б. Качество кристаллической структуры оценивалось путем измерения ширины кривой качания полученного образца с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4. Значение в 164 угловых секунды говорит о том, что полученный образец не уступает по качеству пленкам, выращенным без применения углеродного слоя (рис. 5)

Оценка плотности дислокаций проводилась по концентрации темных пятен на SEM-изображениях поверхности образца, выполненных в режиме катодолюминесценции. Полученное значение $7.8 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ также говорит о том, что наличие углеродного слоя не оказывает отрицательного влияния на качество полученной пленки (значение для образца толщиной 1,5 мм на сапфировой подложке $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$) (рис. 6)

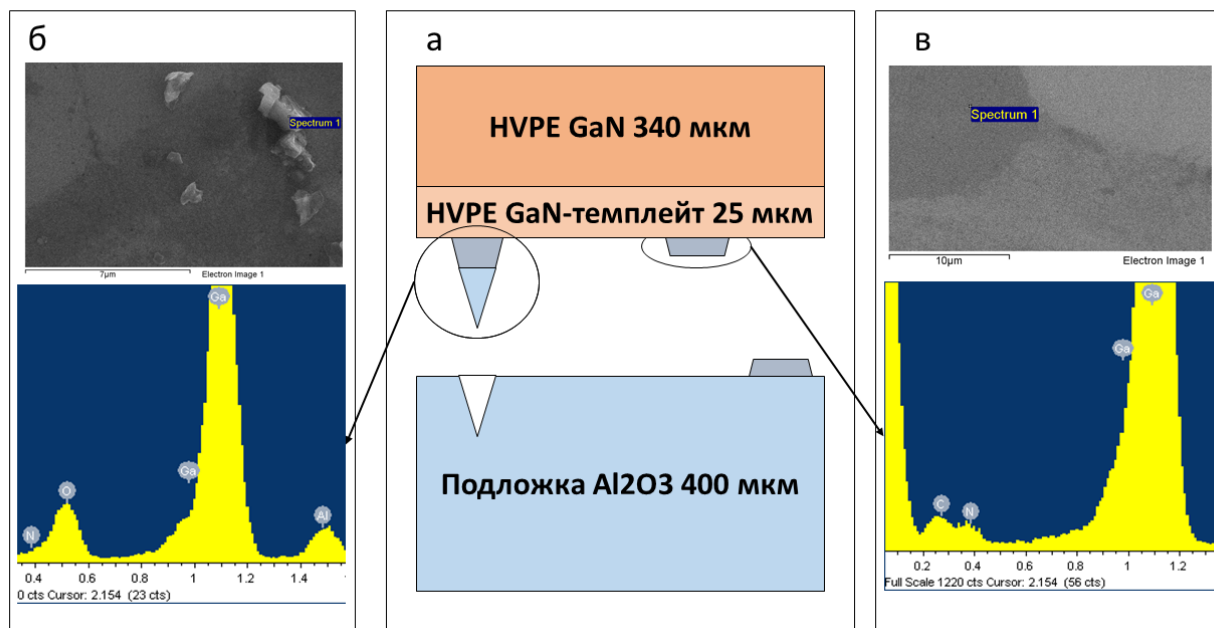


Рис. 4: Схематичное изображение отделившейся структуры и ростовой подложки (а); SEM-изображение азотной стороны полученного образца с применением энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, на микрофотографии присутствуют кусочки сапфира, выколотые из ростовой подложки (б); SEM-изображение азотной стороны полученного образца с применением энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, на микрофотографии присутствуют следы углерода, оставшиеся от слоя аморфного алмазоподобного углерода (в).

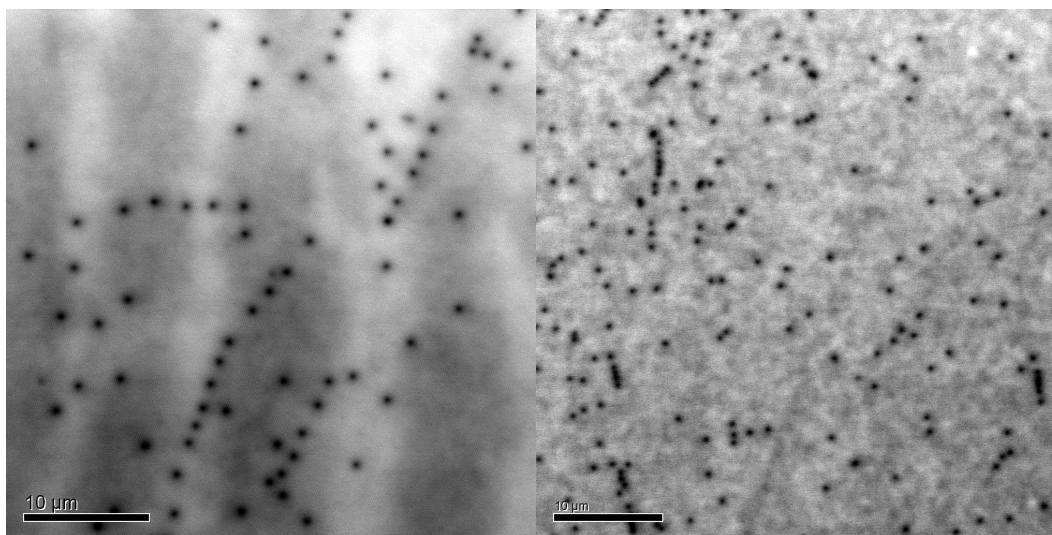


Рис. 6: SEM-изображение ростовой поверхности полученных образцов в режиме катодолюминисценции. Темные пятна соответствуют выходу дислокаций на поверхность. Нитрид галлия толщиной 1,5 мм на сапфировой подложке (слева) и свободностоящая пленка нитрида галлия толщиной 365 мкм (справа).

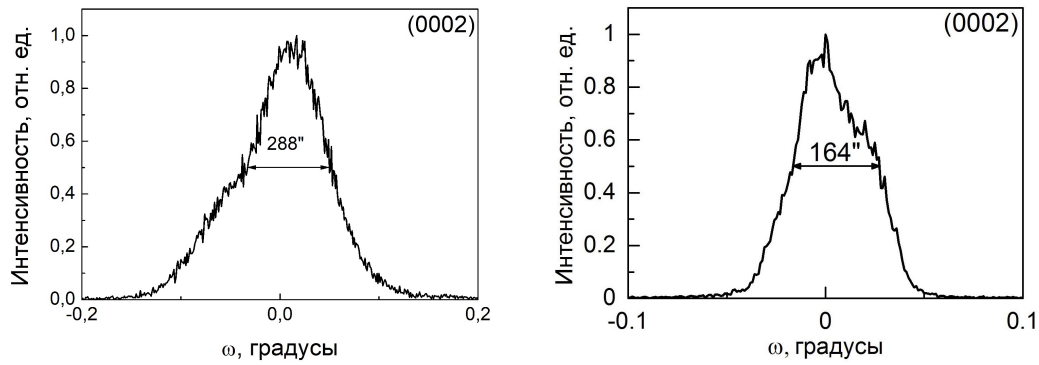


Рис. 5: Кривые качания образцов, полученные на дифрактометре ДРОН-4: свободностоящего толщиной 365 мкм, выращенного на углеродной пленке (справа) и на сапфировой подложке, выращенного без углеродной пленке (слева).

Диаметр ямок роста ("питов"), представляющих из себя двенадцатигранные пирамиды с углом при вершине около 60 градусов, в плоскости поверхности не превышает 230 мкм [7]. Применяв теорему Пифагора, легко можно вычислить глубину пита (примерно 185 мкм). Следовательно, при сошлифовке запитованного слоя толщина оставшейся пластины составит около 160 мкм, этого значения вполне достаточно для транспортировки или иных манипуляций с образцом без риска повредить его целостности. Внешний вид сапфировой подложки и отделенной от нее пленки GaN толщиной 365 мкм представлен на рис. 8.

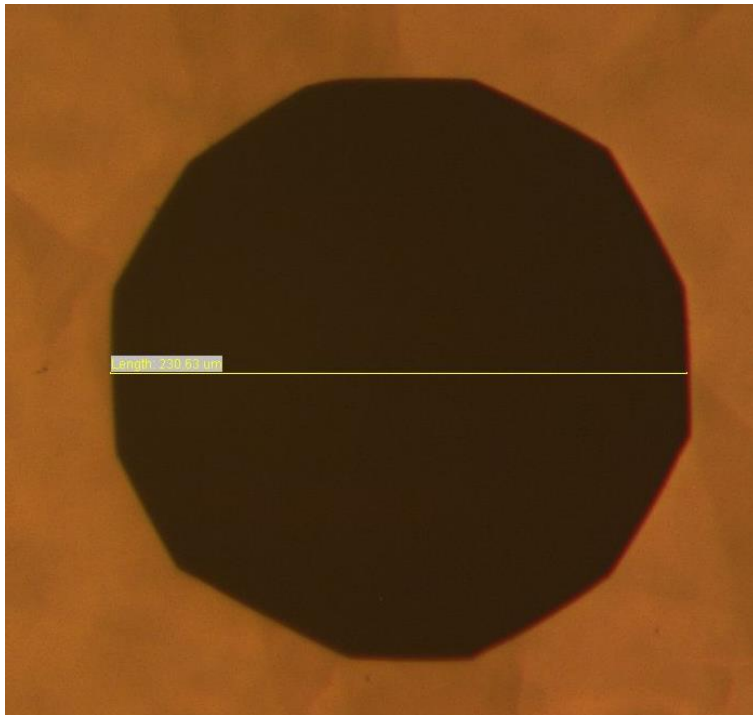


Рис. 7: Микрофотография ямки роста диаметром 230 мкм, выполненная с помощью оптического микроскопа.

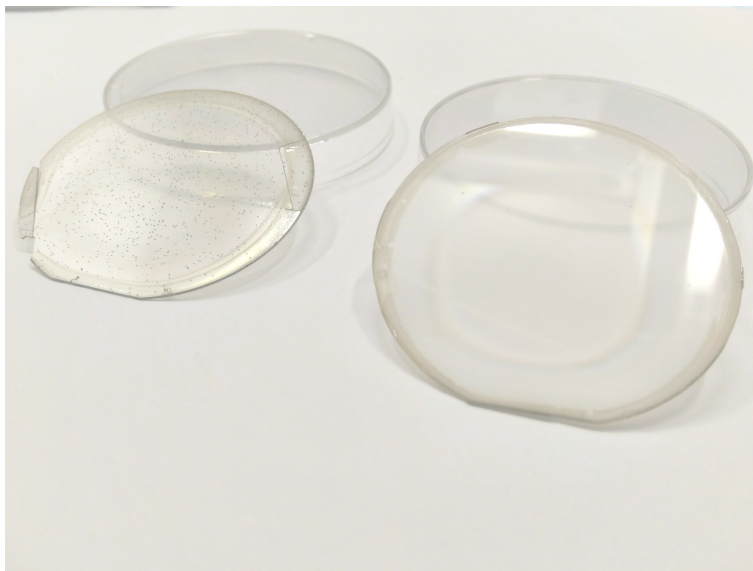


Рис. 8: Свободностоящая пленка нитрида галлия толщиной 365 мкм (на фото слева) и подложка сапфира, от которой была отделена пленка.

Список литературы

- [1] Hadis Morkoç. General Properties of Nitrides, pages 8–44. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] Michael Slomski, Plamen P. Paskov, Jacob H. Leach, John F. Muth, and Tania Paskova. Thermal conductivity of bulk gan grown by hvpe: Effect of si doping. *physica status solidi (b)*, 254(8):1600713–n/a, 2017. 1600713.
- [3] S. Porowski, B. Sadovyi, S. Gierlotka, S.J. Rzoska, I. Grzegory, I. Petrusha, V. Turkevich, and D. Stratiichuk. The challenge of decomposition and melting of gallium nitride under high pressure and high temperature. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 85(Complete):138–143, 2015.
- [4] H. P. Maruska and J. J. Tietjen. The preparation and properties of vapordeposited singlecrystalline gan. *Applied Physics Letters*, 15(10):327–329, 1969.
- [5] H.M. Kim, J.E. Oh, and T.W. Kang. Preparation of large area free-standing gan substrates by hvpe using mechanical polishing liftoff method. *Materials Letters*, 47(4):276 – 280, 2001.
- [6] Michael K. Kelly, Robert P. Vaudo, Vivek M. Phanse, Lutz Gцrgens, Oliver Ambacher, and Martin Stutzmann. Large free-standing gan substrates by hydride vapor phase epitaxy and laser-induced liftoff. *Japanese Journal of Applied Physics*, 38(3A):L217, 1999.
- [7] H. Goto, S. W. Lee, H. J. Lee, Hyo-Jong Lee, J. S. Ha, M. W. Cho, and T. Yao. Chemical lift-off of gan epitaxial films grown on c-sapphire substrates with crn buffer layers. *physica status solidi (c)*, 5(6):1659–1661, 2008.
- [8] Г.И. Дистлер и др. Декорирование поверхности твердых тел. Издательство "Наука Москва, 1976.
- [9] Веденеев В.И Арутюнов В.С. Пиролиз метана в области температур 1000-1750 К. *Успехи химии*, 60(12):2663–2684, 1991.

- [10] Yen-Hsien Yeh, Kuei-Ming Chen, Yin-Hao Wu, Ying-Chia Hsu, Tzu-Yi Yu, and Wei-I Lee. Hydrogen etching of gan and its application to produce freestanding gan thick films. *Journal of Crystal Growth*, 333(1):16 – 19, 2011.

Заключение

В результате выполнения научно-квалификационной работы были проанализированы существующие методы отделения и самоотделения пленок нитрида галлия от ростовой подложки. Основываясь на их плюсах и минусах разработан и испытан на практике метод самоотделения в процессе роста пленок нитрида галлия от ростовой подложки с помощью слоев аморфного алмазоподобного углерода.

В ходе подготовки и проведения серии ростовых экспериментов была выявлена необходимость провести серию опытов по травлению GaN в атмосфере HCl, H₂ и N₂, что позволило на основе полученных результатов выдвинуть предположение о возможности использовать такую смесь газов для самоотделения выращиваемых пленок.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

1. Вирко М.В., Коготков В.С., Леонидов А.А. и др. Лазерное отделение пленок n-GaN от подложек, основанное на эффекте сильного поглощения ИК-излучения свободными носителями заряда в n+-GaN подложках. // *Физика и техника полупроводников*. - 2016. - т. 50. - № 5. - С. 711-716.
2. Вороненков В.В., Вирко М.В., Леонидов А.А., и др. Отделение слабо легированных пленок n-GaN микронной толщины от подложек, основанное

на эффекте поглощения ик излучения в сапфире. // Физика и техника полупроводников. - 2017. - т. 51. - № 1. - С. 116-123.

3. Вороненков В.В., Бочкарева Н.И., Леонидов А.А., и др. Подложки нитрида галлия: современное состояние, проблемы и перспективы. // Наноиндустрия. - 2017. - № S(74). - С. 478-483.

Публикации в других изданиях:

1. Р.И. Горбунов , Ф.Е. Латышев, А.А. Леонидов и др. Использование слоев углерода для отделения пленок нитрида галлия // XI Всероссийская Конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы". Тезисы докладов. - 2017. - Москва. - С 22-23.