

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Майбороды Ивана Олеговича

«Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии»»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Благодаря уникальным свойствам нитридов третьей группы (А3N), таким как высокая эффективность излучательной рекомбинации в квантово-размерных гетероструктурах InGaN/GaN и формирование двумерного электронного газа с высокими значениями подвижности и скорости насыщения электронов в гетероструктурах AlGaN/GaN, в последние двадцать лет совершён мощный прорыв в коммерческом производстве светоизлучающих диодов и СВЧ-транзисторов на их основе. Научные исследования этих материалов, в особенности, в области технологии выращивания гетероструктур, имеют важнейшее значение для нашей страны, обеспечивая её технологическую независимость в сфере военных и гражданских разработок опто-электронных и сверхвысокочастотных устройств.

Наряду с технологиями для массового производства приборов на основе газофазной эпитаксии из металлорганических соединений, интенсивно развивается и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), где для получения химически активного азота используется либо активация молекулярного азота в газоразрядной плазме, либо термический крекинг аммиака. Технология МЛЭ характеризуется уникальными возможностями управления и, что особенно важно в научном плане, исследования процесса роста гетероструктур на атомарном уровне.

Актуальность темы. В настоящее время наибольшее распространение в технологии нитридов получила МЛЭ с плазменным источником азота, поскольку она более проста в обслуживании, обеспечивает отсутствие водорода на ростовой поверхности и позволяет снизить температуру роста, что важно для выращивания нитридов индия. Аммиачная МЛЭ, которой посвящена диссертационная работа Майбороды И. О., напротив, обеспечивает более высокие температуры роста, необходимые для получения высококачественных слоёв GaN и AlN. Перспективность аммиачной МЛЭ и гораздо меньшая её изученность определяют актуальность выбранной темы диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы основана на использовании современных экспериментальных

методов: МЛЭ, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, и др.. Результаты работы Майбороды И. О. и формулировки выводов не противоречат ранее полученным данным, неоднократно апробированы на отечественных и международных конференциях, научных семинарах и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, что позволяет заключить: представленные в работе положения и выводы обоснованы убедительно. Положительными качествами работы являются ее идеологическая целостность и завершенность.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Впервые установлено, что за счет варьирования потока аммиака, степени нитридации подложки сапфира и её температуры в процессе аммиачной МЛЭ можно контролируемо изменять плотность инвертированных доменов (ИД) в слоях AlN более чем на четыре порядка. Показано, что плотность ИД в слоях AlN на сапфире определяется кинетикой роста зародышевых слоев, и для её уменьшения необходимо выбирать ростовые параметры, способствующие формированию более плотного и однородного покрытия поверхности зародышевыми островками.

2. При исследовании слоев AlGaN, выращенных методом аммиачной МЛЭ в условиях сильной десорбции галлия, впервые обнаружен эффект усиления латеральной компоненты роста за счет селективного формирования фазы AlGaN, обогащенной галлием, вблизи морфологических неоднородностей (островков, ступеней). Обнаруженный эффект приводит к формированию более гладких слоёв и снижению плотности винтовых дислокаций в них.

3. Впервые предложена кинетическая модель зависимости скорости роста AlGaN от температуры осаждения в условиях сильной десорбции галлия, описывающая обнаруженный автором эффект усиления латеральной компоненты роста.

4. Впервые показано, что ИД в буферных слоях AlN гетероструктур транзисторов с двумерным электронным газом наследуются последующими слоями, а с ростом их плотности растут токи утечек по межприборной изоляции. За счет снижения плотности ИД токи утечек были снижены до менее 10 мкА/мм при напряжениях 80 В.

Практическое значение результатов диссертационной работы:

1. Методом аммиачной МЛЭ на подложках сапфира получены слои AlN со среднеквадратичной шероховатостью 0,2 нм для участков площадью 10×10 мкм² и плотностью ИД менее 10^6 см⁻². Результат достигнут за счет разработанной автором методики подавления ИД и использования галлия в качестве активной ростовой добавки для улучшения морфологии поверхности и кристаллического качества слоёв AlN.

2. Продемонстрированы гетероструктуры транзисторов с двумерным электронным газом, выращенные методом аммиачной МЛЭ на сапфировых подложках, в которых достигнута плотность токов насыщения более 1,5 А/мм при слоевом сопротивлении двумерного проводящего канала до 220 Ом, что соответствует характеристикам лучших гетероструктур, получаемых на подложках сапфира методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений.

3. Утечки по межприборной изоляции в гетероструктурах, выращенных на подложках сапфира методом аммиачной МЛЭ, снижены до менее 10 мкА/мм при напряжениях 80 В за счет снижения плотности ИД.

В первой главе диссертации дан аналитический обзор литературы, где автор поясняет суть затронутых в работе проблем с научной и практической точек зрения и обосновывает перспективность выбранных в работе путей их решения. **Вторая глава** содержит описание экспериментальных и теоретических методов, использованных в диссертационной работе. **Третья глава** посвящена подробному анализу факторов, влияющих на плотность ИД в слоях AlN. **В четвёртой главе** содержится описание разработанной автором технологии роста слоёв AlGaIn в условиях сильной десорбции галлия. **Пятая глава** посвящена исследованию влияния снижения плотностей ИД и винтовых дислокаций, сглаживания поверхности буферного слоя на характеристики полученных транзисторов с двумерным электронным газом.

На защиту вынесено четыре положения. **Положение первое**, о связи механизмов образования ИД с ростовыми параметрами поддержано экспериментальными данными и дополнительным теоретическим анализом, показывающим согласие между наблюдаемыми в эксперименте закономерностями и существующими моделями зародышеобразования. **Второе положение**, касающееся роста слоёв AlGaIn в условиях значительной десорбции галлия, также поддержано взаимодополняющими экспериментальными методами. Предложенная модель роста слоёв AlGaIn и расчеты на ее основе - **третье положение**, подтверждено экспериментальными данными. Весомым аргументом в пользу адекватности модели является количественное совпадение полученных численных оценок энергий связи атомов галлия с поверхностью AlN и результатами соответствующих квантово-механических расчетов из первых принципов. **Четвертое положение**, о влиянии ИД на свойства гетероструктур также подтверждено экспериментально. Содержание выводов согласуется с защищаемыми положениями.

Особого внимания заслуживает обнаруженный в работе механизм усиления латеральной компоненты роста при осаждении пленок AlGaIn в условиях сильной десорбции галлия. Помимо несомненной практической значимости результатов изучения

этого явления, следует отметить, что автору удалось внести ясность в некоторые противоречия опубликованных экспериментальных работ в этой области.

К работе имеются следующие замечания:

1. В представленной автором кинетической модели роста AlGaIn фигурирует константа десорбции галлия, значение которой при заданной температуре определяется двумя параметрами – энергией связи, входящей в показатель экспоненциального множителя, и предэкспоненциальным множителем. Рассматривая влияние морфологии поверхности пленки на величину данной кинетической константы автор показывает, что ее значение для разных участков поверхности меняется за счет изменения локальной энергии связи, но изменение величины предэкспоненциального множителя не обсуждается.

2. В таблице 3.1. (с. 78) указана толщина слоя AlN, при которой происходил переход от трёхмерного механизма роста к двумерному. Если толщина определялась интерференционным методом в процессе роста, то не понятно, как учитывалась зависимость коэффициентов преломления от температуры.

3. В тексте диссертации встречаются следующие терминологические неточности:

- термин «морфология», который является синонимом слова «строение» и применительно к нанобъектам характеризует их форму и пространственную организацию, употребляется без чёткого указания предмета, строение которого имеется в виду. Из контекста понятно, что подразумевается морфология поверхности, но встречающиеся в тексте выражения, например, «...морфология и структура формируемых пленок...» (с. 42), «...улучшение структуры и морфологии буферных слоёв...» (с. 43), «...пленки с неприемлемо развитой морфологией ...» (с. 124), являются сленговыми и содержат элемент тафтологии.

- в тексте безосновательно введен новый термин – «дифракционный паттерн» (с. 77). В соседнем предложении используется общепринятое словосочетание «дифракционная картина». В чём разница между «паттерном» и «картиной» не указано.

- по утверждению автора «к точечным структурным дефектам относятся вакансии и примеси» (с. 37). Здесь уместно было бы упомянуть ещё и межузельные атомы, антиструктурные дефекты, а также дефекты кластерного типа, которые занимают промежуточное положение между точными и протяжёнными дефектами.

3. Недостатки оформления:

- список публикаций автора приведён только в автореферате, в тексте диссертации его нет, и соответственно, отсутствуют ссылки на авторские работы;

- не составлен список принятых сокращений.

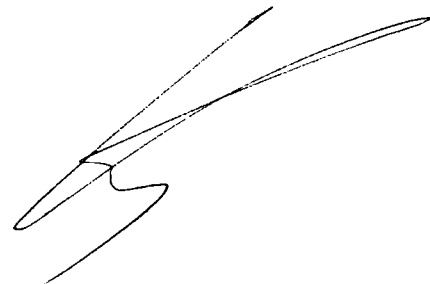
Данные замечания не снижают актуальности, новизны и достоверности работы, как и ее общей значимости.

Заключение

Диссертация Майбороды И.О. на тему «Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой целостное законченное исследование. Тема работы является актуальной, научные положения выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы, достоверны и обладают научной новизной. Содержание работы соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат диссертации в полной мере соответствует содержанию диссертации.

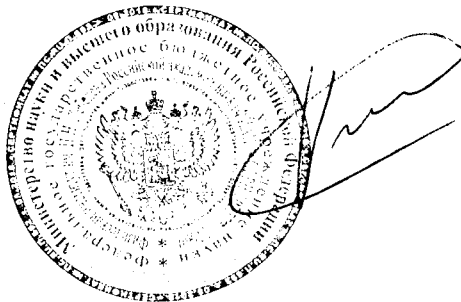
Таким образом, представленная к защите диссертационная работа Майбороды Ивана Олеговича отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (от. 24.09.2013 №842), а её автор Майборода Иван Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, Казаков Игорь Петрович, главный научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии Физического института Российской академии наук, Россия, Москва, Ленинский пр-кт, 53. Доктор физико-математических наук, по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния Тел.: +7 926 457 84 73, эл. почта: kazakovip@lebedev.ru



Подпись официального оппонента д. ф.-м. н. И.П. Казакова заверяю

Исполняющий обязанности учёного секретаря
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук,
к. ф.-м. н.



(В.С. Кривобок).