



ИНН 7735042384, КПП 773501001, р/с 40702810538150100756 в ПАО Сбербанк г. Москва,
к/сч 30101810400000000225, БИК 044525225, ОГРН 10477350100756, ОКПО 40363540, ОКДП 2429534

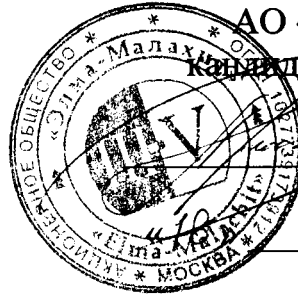
№ _____

«Утверждаю»

Генеральный директор
АО «Элма-Малахит»,

кандидат технических наук

А.А.Арендаренко



02 _____ 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Майбороды Ивана Олеговича на тему «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.

Актуальность темы диссертации Полупроводниковые соединения на основе нитридов элементов III группы являются перспективными материалами с широким спектром практических применений. Уникальные физические свойства этих материалов обеспечивают электронным приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, во многих отношениях существенно превосходящие устройства на кремнии или других полупроводниковых материалах. В частности, нитрид-галлиевые гетероэпитаксиальные структуры широко используются в оптоэлектронике, при разработке компонентной базы силовой и СВЧ-электроники. Однако, при получении таких структур возникают серьезные технологические проблемы, связанные с отсутствием доступных «родных» подложек для автоэпитаксиального роста и необходимостью использования подложек из других материалов – сапфира, кремния, карбида кремния – заметно

отличающихся от нитридных соединений по параметрам кристаллической решетки и коэффициенту температурного расширения. Это неминуемо приводит к повышенной дефектности эпитаксиальных слоев как в структурном, так и в электрофизическом аспектах, что не позволяет в полной мере реализовать все потенциальные возможности этих уникальных соединений.

В мировой практике используется целый ряд технологических ухищрений, направленных на преодоление этих проблем, при этом, зачастую, эти решения носят чисто эмпирический характер и не основываются на глубоких теоретических и экспериментальных исследованиях ростовых процессов, ограничиваясь чисто прикладными исследованиями. Это, очевидно, сдерживает прогресс в развитии как качественных характеристик нитридных гетероструктур, так и возможных областей их применения.

В настоящей диссертационной работе представлены результаты по исследованию механизмов роста высокотемпературных эпитаксиальных слоев AlN и AlGaN методом аммиачной МЛЭ на подложках сапфира для получения буферных слоев низкой дефектности и создания на их основе гетероэпитаксиальных структур для СВЧ устройств миллиметрового диапазона. Таким образом, тема диссертации И.О. Майбороды и вопросы, освещаемые в рамках работы, являются, несомненно, актуальными.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверность и новизна исследования.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается комплексным подходом автора к достижению цели исследования, значительным объемом проведенных экспериментов с использованием современных методов и аппаратуры, сопоставлением с опубликованными в литературе данными, а также публикацией статей по материалам диссертационной работы в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах и выступлениями на конференциях. Сформулированные в диссертационной работе научные положения и выводы непротиворечивы и согласуются с фундаментальными физическими

принципами, а предложенные в работе теоретические модели подтверждается согласием расчетов, проведенных на их основе, с экспериментальными данными.

Новизна проведенных исследований заключается в обнаружении ряда неизвестных ранее закономерностей роста эпитаксиальных слоев AlN, AlGaN в процессе аммиачной МЛЭ, разработке модели роста, объясняющей наблюдаемые эффекты, установлении связи между структурными особенностями эпитаксиальных слоев и параметрами приборов, изготовленных на их основе, в частности:

- впервые установлено, что за счет варьирования степени нитридации подложки сапфира, температуры подложки и потока аммиака при росте AlN методом аммиачной МЛЭ можно контролируемо менять плотность инвертированных доменов (ИД) в AlN более чем на 4 порядка. Показано, что количество ИД в AlN на сапфире определяется кинетикой роста зародышевых слоев, и для его уменьшения необходимо выбирать ростовые параметры, способствующие формированию более плотного и однородного покрытия поверхности зародышевыми островками;

- 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) и предложена кинетическая модель зависимости скорости роста AlGaN от температуры осаждения в условиях сильной десорбции галлия, которая, в частности, описывает и наблюдаемый эффект увеличения скорости латерального роста.

- впервые показано, что домены инвертированной полярности в буферных слоях AlN наследуются последующими слоями, а с ростом их числа растут токи утечек по межприборной изоляции.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Автором сделан заметный шаг к пониманию процессов роста гетероэпитаксиальных структур нитридных соединений методом аммиачной

МЛЭ, управляемому формированию их электрофизических и структурных характеристик. Это позволило получить целый ряд практически важных результатов, в частности:

- методом аммиачной МЛЭ на подложках сапфира получены слои AlN со среднеквадратичной шероховатостью 2 \AA для участков размером $10 \times 10 \text{ мкм}$ и плотностью инвертированных доменов менее 10^6 см^{-2} . Результат достигнут за счет разработанной в работе методики подавления ИД и использования галлия в качестве активной ростовой добавки для улучшения морфологии поверхности и кристаллического качества AlN.

- с использованием разработанных на основе проведенных исследований технологических приемов методом аммиачной МЛЭ получены гетероструктуры для GaN НЕМТ, в которых достигнута плотность токов насыщения более $1,5 \text{ А/мм}$ при слоевом сопротивлении двумерного проводящего канала до $220\text{--}240 \text{ Ом/кв}$, что соответствует характеристикам лучших структур, получаемых на подложках сапфира методом MOCVD. По морфологическим характеристикам полученные образцы не уступают гетероструктурам, выращиваемым методом аммиачной МЛЭ на MOCVD GaN темплейтах, что также очень важно для последующего процессирования структур при изготовлении НЕМТ.

- оптимизация режимов аммиачной МЛЭ при получении нитридных гетероструктур на подложках сапфира позволила снизить утечки по межприборной изоляции до менее 10 мкА/мм при напряжениях 80 В , что обеспечивает эффективное функционирование СВЧ приборов.

Практическая значимость и применимость результатов работы подтверждается заключением комиссии по приемке ОКР «Многоцветник – 45» (контракт от 06.03.2014 №144111.169999.11.076 с Минпромторгом России), в котором рекомендовано использовать гетероструктуры, продемонстрированные в рассматриваемой диссертационной работе, для изготовления МИС СВЧ, разработанных в рамках ОКР «Многоцветник – 45».

Все это определено указывает на значимость полученных автором диссертации результатов для развития отечественной полупроводниковой электроники и, в частности, для ее наиболее перспективного направления,

связанного с использованием гетероструктур нитридных соединений для СВЧ электроники.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы, содержащие технические и методологические решения проблемы формирования методом молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур на основе нитрида галлия, предназначенных для изготовления приборов СВЧ техники, рекомендуются к дальнейшему развитию и внедрению в институтах и на предприятиях, занимающихся исследованием, разработкой и производством как собственно гетероэпитаксиальных структур, так и СВЧ-приборов на основе нитридов элементов III группы: ИСВЧПЭ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ИФП СО РАН, АО «НПП «Пульсар», АО «Светлана», АО «НПП «Исток» им. Шокина», и др.

Общая оценка диссертации

Рассматриваемая работа вносит заметный вклад в развитие имеющихся представлений о механизмах формирования методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур соединений нитридов элементов III группы - одного из самых перспективных материалов современной СВЧ-электроники. Научная новизна полученных результатов и практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Более того, появление этого исследования, как и наличие целого ряда публикации в научной литературе, позволяет с большим удовлетворением отметить, что в России начинает формироваться, наряду с уже сложившимися и признанными научными школами по молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений (ИФП СО РАН, ФТИ им. Иоффе, ФИАН), еще один творческий коллектив с большим научным и прикладным потенциалом.

Вместе с тем, работа вызывает ряд вопросов и замечаний:

1. В тексте используются различные единицы измерений температуры ($^{\circ}\text{C}$, K , эВ), а также англоязычные и русскоязычные аббревиатуры для обозначения одного понятия (НЕМТ, ТВПЭ), что несколько затрудняет восприятие работы.

2. К сожалению, автор крайне скупо изложил конструкцию и технологию изготовления тестовых транзисторов на полученных в работе гетероструктурах, а это было бы весьма полезно для более полного представления о результатах исследования.

3. При разработке модели формирования зародышей AlN автором рассматривался как поток алюминия, так и поток аммиака, поступающие на подложку, однако в кинетической модели роста AlGaN учитывались только потоки металлов (Al , Ga). Почему?

4. В тексте диссертации не раскрыта суть расчетов из первых принципов, численные результаты которых подтверждают справедливость кинетической модели роста AlGaN , хотя ссылка на публикацию, в которой упомянутые расчеты представлены, приведена.

Однако, эти замечания ни в коей мере не снижают общей положительной оценки диссертационной работы И.О. Майбороды.

Тема диссертации, результаты, полученные в работе, и использованные методы решения задач соответствует специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Заключение

Таким образом, диссертация Майбороды Ивана Олеговича «Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественной микроэлектроники, что отвечает требованиям

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 21.04.2016 г), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Майборода Иван Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании НТС АО «Элма-Малахит» (протокол № 02-19 от 11.02.2019).

Заместитель генерального
директора по развитию,
кандидат технических наук



Цыпленков И. Н.