

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ФГУП «НИИ физических проблем

им. Ф.В. Лукина»

Гудков А.Л.



«10» июня 2015 г.

### Отзыв официального оппонента

доктора технических наук, советника директора ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина» **Киреева В.Ю.** на диссертацию **Харламова Николая Александровича** на тему: «**Ионно-плазменное получение и возможность использования слоев твердого раствора на основе  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллическом кремнии**», представленную на соискание ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Благодаря уникальным свойствам карбида кремния, нитрида алюминия и их твердых растворов, силовые и оптоэлектронные приборы на их основе имеют ряд существенных преимуществ перед аналогичными микроэлектронными приборами из монокристаллического кремния и нитрида галлия. Это касается, прежде всего, возможности использования указанных приборов при повышенных температурах, уровнях радиации и в химически агрессивных средах. Однако производство приборов на основе карбида кремния, нитрида алюминия и их твердых растворов требует использования подложек из сапфира или карбида кремния, которые имеют высокую себестоимость.

Поэтому тема диссертационной работы, посвященной разработке ионно-плазменной технологии формирования монокристаллических слоев твердых растворов на основе  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на подложках монокремния и исследования структуры, свойств и областей приборного применения сформированных слоев, является весьма актуальной и направленной на решение важной научно-технической и практической проблемы: создание дешевых подложек и эффективной технологии для производства силовых и оптоэлектронных приборов на основе карбида кремния, нитрида алюминия и их твердых растворов.

**Наиболее важными результатами диссертационной работы являются:**

1. Разработан технологический процесс формирования монокристаллических слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$  и  $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$



толщиной до 100 нм на подложке монокремния с ориентацией (111) при температуре (800 - 1000) °С магнетронным распылением поликристаллической однородной компактной мишени со скоростью до 0,1 нм/с при энергии ионов аргона до 500 эВ и плотности ионного потока до 10 мА/см<sup>2</sup>.

2. Показано, что химический и фазовый состав слоев, полученных магнетронным распылением поликристаллической однородной компактной мишени  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , практически одинаков с её составом после предварительного распыления в течение (10 - 15) минут и при плотности тока (7 - 8) мА/см<sup>2</sup>.

3. Установлено, что атомная структура наноразмерных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллической подложке кремния с ориентацией (111) определяется как температурой подложки, так и скоростью нанесения слоя. Поликристаллические слои формируются при температуре подложки ниже 800 °С при скорости роста до 0,2 нм/с. Монокристаллические слои при эпитаксии образуются при температуре подложки 800 °С и выше и скорости роста (0,10 - 0,15) нм/с.

4. Показано, что получение монокристаллических слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллическом кремнии с ориентацией (111) возможно и при использовании принципов эндотаксии. Установлено, что отжиг гетероструктуры "поликристаллический слой твердого раствора толщиной до 60 нм на монокристаллической кремниевой подложке" при температуре (800 - 900) °С в среде аргона в течение (30 - 40) минут обеспечивает формирование монокристаллического слоя. Чистота (шероховатость) поверхности монокристаллических слоев твердого раствора во всех случаях находится на уровне чистоты (шероховатости) подложки монокремния и соответствует 14 классу чистоты поверхности.

#### **Научная новизна работы подтверждается:**

1. Разработкой модели расчета структуры и топология диодов Шоттки для силовой электроники и экспериментальным подтверждением путем их изготовления с применением магнетронных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и гетероструктур на их основе. В изготовленных диодах в диапазоне температур от 25 до 150 °С практически полностью отсутствует эффект обратного восстановления (время восстановления не более 50 нс), значения тока утечки не превышают 20 мкА при напряжении пробоя на уровне 650 В, а прямой ток достигает значений до 25А.

2. Проведением физико-химического обоснования возможности получения непрерывного ряда твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при температурах (800 - 900) °С с учетом межатомного взаимодействия при различном химическом составе и его экспериментального подтверждения.

3. Созданием с помощью разработанной модели структуры и топологии светодиода с дальним ультрафиолетовым излучением и различным числом квантовых ям и фотодиода на основе твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ .

**Практическая значимость результатов работы заключается:**



- в разработке технологического процесса ионно-плазменного получения гетероструктур (темплейтов): монокристаллический кремний - монокристаллический наноразмерный слой твердых растворов  $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$  и  $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$  с применением магнетронного распыления однородной поликристаллической мишени аналогичного состава при температуре до 1000 °С;

- в разработке физико-топологической модели ультрафиолетового светодиода с длинной волны в максимуме излучения от 350 до 220 нм на основе твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  с различным числом квантовых ям;

- в экспериментальном изготовлении с применением магнетронных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и гетероструктур на их основе работоспособных диодов Шоттки для силовой электроники, имеющих высокие рабочие характеристики.

В научных трудах Харламова Н.А. достаточно полно изложены результаты его диссертационной работы. Обоснованность выводов и рекомендаций диссертации основывается на полученных экспериментальных результатах большого количества исследований по влиянию режимов формирования магнетронных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на структуру, химический состав и физико-химические характеристики гетероструктур и приборов на их основе. Исследования проведены с применением современных методов исследований: оптической, электронной и силовой атомной микроскопии, вторичной ионной масс спектроскопии (ВИМС), рентгеновской дифрактографии и механической профилометрии.

**Достоверность полученных результатов подтверждена** проведенными экспериментальными исследованиями, а также практическим получением работоспособных диодов Шоттки для силовой электроники, имеющих высокие рабочие характеристики, с применением магнетронных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и гетероструктур на их основе.

**Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации**, которые опубликованы в 20-ти работах, в том числе 3 статьи в журналах, входящем в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки России изданий по специальности. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ми международных и российских научно-технических конференциях.

Диссертация и автореферат отвечают критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям для присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

**Личный вклад Харламова Н.А. в получении результатов проявился:**

- в поиске и анализе опубликованных результатов по теме диссертации;



- в усовершенствовании узла расположения мишени, подложек и методики получения слоев, обеспечивающих стационарное проведение процесса магнетронного распыления компактной многокомпонентной мишени;
- в проведении серии экспериментальных работ по магнетронному получению наноразмерных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и гетероструктур на их основе;
- в анализе результатов использованных аналитических методов, определения параметров слоев твердых растворов и гетероструктур;
- в обосновании и уточнении физического кластерного механизма магнетронного распыления многокомпонентной мишени и получении дополнительных физико-химических доказательств изоморфного ионного замещения при низкотемпературном формировании слоев твердых растворов;
- в проведении моделирования параметров электронных устройств на основе твердых растворов на монокристаллической подложке;
- в обобщении полученных результатов, подготовке научных публикаций и представлении их на конференциях.

По содержанию и оформлению работы можно сделать следующие замечания:

1. И в диссертации, и в автореферате автор использует технический жаргон, и наблюдаются стилистические неточности, например:
  - во 2-ом и 3-ем абзаце на стр. 5 автореферата и на стр. 6 диссертации автор пишет: **«ионная полировка поверхности подложки перед эпитаксией, достигающая выше, чем 14 класс шероховатости»** и **«Все процессы реализуются в вакууме без его разрыва»**, очевидно, что речь идет о классах чистоты поверхности и процессах без выноса подложки из вакуумной камеры;
  - во 2-ом абзаце на стр. 6 автореферата и стр. 7 диссертации автор пишет: **«получение кристаллориентированных слоев твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллическом кремнии с применением принципов эпитаксии и эндотаксии при магнетронном распылении мишени»**, очевидно, что речь идет о процессах, т.к. с помощью принципов получить слои невозможно.
2. На рис. 1 стр. 12 автореферата на графике не показана ошибка (разброс) экспериментальных точек. Аналогичное замечание относится ко всем рисункам автореферата и диссертации, где присутствуют экспериментальные точки.
3. На рис. 2.3 стр. 39 диссертации на графике и в подрисуночной надписи произошла путаница величин  $r_\sigma$  и  $r_\delta$ .
4. На стр. 14 автореферата 1-й абзац снизу автор пишет: **«Зависимость состава плёнок от плотности потока ионов исследовалась, исходя из анализа составов образцов пленок  $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ , полученных напылением твердого раствора при плотностях тока 3 мА/см<sup>2</sup>, 5 мА/см<sup>2</sup> и 8 мА/см<sup>2</sup>. Энергия ионов составляла 500 кэВ»**. Очевидно, что энергия ионов составляла 500 эВ, т.к. при 500 кэВ автор получил бы имплантацию, а не ионное распыление.



5. На стр. 55 диссертации 1-й абзац сверху автор пишет: «Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение атомов мишени, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности катода». Очевидно, что нужно говорить об ионизации и возбуждении атомов рабочего газа, а не атомов мишени.

6. На стр. 60 диссертации 3-й абзац сверху автор пишет: «Подложки кремния обрабатывались методом RCA, который состоит из последовательно выполняемых операций». Очевидно, что речь идет о запатентованном фирмой RCA процессе, а не методе очистки.

7. На стр. 68 диссертации 4-й абзац автор пишет «Сделано допущение, что скорость роста слоя совпадает со скоростью распыления материала мишени. Это связано с тем, что площадь мишени практически в два раза превышала площадь подложки». Это неверное допущение, т.к. скорость осаждения равна скорости распыления деленной на квадрат расстояния от мишени до подложки.

Однако указанные недостатки не снижают ценности диссертации, которая, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи, имеющей существенное значение для технологии изготовления силовых и оптоэлектронных приборов на основе  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ .

Исходя из вышеизложенного, работа Харламова Н.А. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 05.27.06, а он заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата технических наук.

Советник директора ФГУП «НИИ  
физических проблем им. Ф.В. Лукина»,  
д.т.н.



В.Ю. Киреев

Подпись Киреева В.Ю. удостоверяю  
зам. директора ФГУП «НИИ  
физических проблем им. Ф.В. Лукина»  
по кадрам и режиму



В.А. Дождев

Киреев Валерий Юрьевич, советник директора  
ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»  
Адрес: 124460, РФ, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 6  
Тел.: +7 (903)972-71-66; e-mail: valerikireev@mail.ru