

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ОАО «Научно-исследовательский  
институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского»



И.А. Воробьев

2015 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Харламова Николая Александровича «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

Работа посвящена поиску новых путей получения слоев и расширению возможности практического применения широкозонных полупроводников на основе карбида кремния и его твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  для силовых и оптоэлектронных устройств. Известно, что, благодаря уникальным свойствам карбида кремния, нитрида алюминия и их твердых растворов приборы на их основе имеют ряд преимуществ перед традиционными кремниевыми и нитридгаллиевыми аналогами. Важным направлением развития технологии микроэлектроники является совмещение широкозонных материалов ( $\text{GaN}$ ,  $\text{AlN}$ ) с кремниевой электроникой. Важнейшей проблемой в технологии создания тонкопленочных гетерокомпозиций на основе карбида кремния и его твердых растворов является также разработка наиболее эффективных и



экономически целесообразных методов их получения при высоких требованиях к совершенству атомной структуры и электрофизическим параметрам. В работе рассматривается метод магнетронного распыления многокомпонентных мишеней различного состава для формирования слоев  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , имеющий ряд неоспоримых преимуществ перед газофазными и жидкофазными способами. Использование в качестве исходных подложек монокристаллического кремния еще больше подчеркивает актуальность темы. Все отмеченное позволило сформулировать автору цель и задачи исследований.

В числе основных задач необходимо отметить выявление кинетических закономерностей магнетронного распыления многокомпонентной однородной мишени  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и получения наноразмерных слоев, определение условий формирования монокристаллических слоев на монокристаллическом кремнии путем эпитаксии и эндотаксии, исследование структурных и электрофизических параметров гетерокомпозиции  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$ , обоснование особенностей механизма магнетронного распыления и физико-химической модели образования твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при низких температурах.

Кроме того, путем моделирования показана возможность применения получаемых гетерокомпозиций (темплейтов)  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$  для диодных и оптоэлектронных устройств.

Работа состоит из 4-х глав, включая обзор известных публикаций, теоретическое обоснование формирования слоев твердого раствора и гетерокомпозиций, получения слоев на монокристаллическом кремнии и описание возможных областей применения слоев и гетерокомпозиций  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , полученных магнетронным распылением.

Для проведения экспериментов использовалась модернизированная серийная установка магнетронного распыления на постоянном токе, обеспечивающая предельное остаточное давление  $10^{-4}$



Па, напряжение на мишени 0,3-1 кВ, разрядный ток 1,5 А. Использовалась система подогрева мишени и нагрева подложек.

Полученные слои и гетероструктуры исследовались с использованием рентгеновской дифрактометрии, электронной и оптической микроскопии, оже-спектроскопии и масс-спектрометрии, интерофотометрии. Исследованы вольт-амперные характеристики структур.

Можно согласиться с формулировками основных положений, выносимых на защиту, научной новизны, практической значимости, указанными в диссертации.

Научная новизна работы состоит в том, что показана экспериментальная возможность формирования монокристаллических наноразмерных слоев твердого раствора  $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$  и  $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$  на монокристаллической кремниевой подложке с ориентацией (111) при температуре 1070-1270 К магнетронным распылением однородной мишени как в условиях эпитаксии, так и эндотаксии. Показана целесообразность использования кластерной модели распыления твердого раствора, физико-химической модели образования непрерывного ряда твердых растворов при низкой температуре. Разработаны модели светодиода с дальним ультрафиолетовым излучением и различным числом квантовых ям, фотодиода и диода Шоттки.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологического процесса ионно-плазменного получения гетероструктур (темплейтов) монокристаллический кремний с ориентацией (111) – монокристаллический слой твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и технологических режимов формирования нано-, микро- и поликристаллических слоев твердого раствора магнетронным распылением однородной компактной мишени. Кроме того, показана принципиальная возможность использования разработанного



технологического процесса для создания светодиодов, фотодиодов и диодов Шоттки с применением темплейтов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$ .

Открывается возможность использования разработанных темплейтов для создания оптоэлектронных устройств с применением других широкозонных полупроводников.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается их экспериментальной воспроизводимостью с заданной погрешностью измерений, применением современных методов исследований, согласованием теоретических и экспериментальных данных между собой и известных результатов, а также практической апробацией. Результаты работы переданы в заинтересованные организации, от которых имеются акты их использования.

Основные результаты, положения и выводы, изложенные в диссертации, были апробированы в научных публикациях, а также в ходе международных научно-практических конференций. По результатам диссертационной работы опубликованы 20 научных работ, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Автореферат полностью отражает содержание рукописи диссертации.

В целом диссертация Харламова Николая Александровича заслуживает высокой оценки. В тоже время по представленной работе можно сделать следующие замечания:

1. Почему при исследовании процесса магнетронного распыления использовались такие параметры как плотность ионов и их энергия, а не удельная мощность, тем более, что поток ионов и энергия взаимосвязаны через вольт-амперную характеристику.



2. Требуется пояснения, каким технологическим способом удавалось возбудить разряд на постоянном токе и стабилизировать его при использовании высокоомной мишени.
3. Можно ли с известной степенью приближения оценить энергоэкономическую эффективность предлагаемых темплейтов на основе монокристаллического кремния и твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ .
4. Не ясно, в чем же различие между предложенной автором термодинамической моделью распыления многокомпонентной мишени и известной статистической.

Вместе с тем данные вопросы и замечания не снижают общего благоприятного впечатления от работы, а их устранение можно рассматривать в качестве рекомендаций для дальнейшего исследования.

Диссертация Харламова Н.А. на тему «Ионно-плазменное получение и возможность использования слоев твердого раствора на основе  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллическом кремнии» представляет собой самостоятельную законченную научно-исследовательскую работу, в которой содержится новое решение актуальной научной задачи физико-технологического обоснования возможности получения гетеструктур на основе кристаллоориентированных наноразмерных слоев твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллической подложке кремния с применением ионно-плазменных процессов. Работа выполнена на высоком теоретическом, информационном и аналитическом уровне.

Диссертация Харламова Н.А. на тему «Ионно-плазменное получение и возможность использования слоев твердого раствора на основе  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  на монокристаллическом кремнии» соответствует требованиям ВАК РФ (п.7 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденное 30.01.2002 г., № 74 в ред. Постановления Правительства РФ от 20.06.2011 №475), ее автор Харламов Николай Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата



технических наук по специальности 05.27.06 - Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Содержание работы и отзыв на диссертацию Харламова Н.А. представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук рассмотрены и одобрены на заседании НТС ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского» 02 июня 2015 г.

#### Протокол заседания НТС №2.

Заместитель генерального  
директора ОАО «НИИВТ им.  
С.А. Векшинского» по научной  
работе, д.т.н., профессор



С.Б. Нестеров

Начальник лаборатории, к.т.н.



О.Г. Ломакина

Ученый секретарь НТС



Г.Н.Иванова

Начальник отдела Специального  
вакуумного технологического  
оборудования, д.т.н.



С.Б. Симакин