

## Материалы на основе твердых растворов карбида кремния с нитридом алюминия для экстремальной электроники: монокристаллы, эпитаксиальные пленки

Г.Д.Кардашова, Г.К.Сафаралиев

Махачкала, Дагестанский государственный университет, ул. Гаджиева, д. 43-а

E-mail: [gulya-kal1@yandex.ru](mailto:gulya-kal1@yandex.ru)

Соединения, образующиеся в системе SiC-AlN, отличаются от традиционных полупроводников большей стойкостью к механическому и радиационному воздействиям. В них путем изменения состава возможно в широких пределах управлять оптическими, электрическими и структурными свойствами. Поэтому исследования, направленные на изучение механизма формирования новых широкозонных полупроводниковых твердых растворов на основе SiC и AlN, зависимостей электрических, оптических, механических свойств, структуры и морфологии от методов их получения имеет важное практическое значение. В работе приведены результаты получения и исследования тонких пленок на основе твердых растворов (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>. Получение эпитаксиальных слоев этих материалов проводили методом магнетронного и ВЧ-магнетронного распыления. Полученные пленки (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>, исследовались рентгенодифракционным методом (XRD). Замечено, что в исследованных образцах структура твердого раствора (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> при составе  $x=0.21$  имеет меньшую кристалличность, чем при составе  $x=0.64$ .

**Materials based on solid solutions of silicon carbide with aluminum nitride for extreme electronics: single crystals, epitaxial films.** G.D.Kardashova, G.K.Safaraliev. The compounds formed in the SiC-AlN system differ from traditional semiconductors in their greater resistance to mechanical and radiation effects. By changing the composition, it is possible to control optical, electrical and structural properties over a wide range. Therefore, research aimed at studying the mechanism of formation of new wide-gap semiconductor solid solutions based on SiC and AlN, dependencies of electrical, optical, mechanical properties, structure and morphology on the methods of their production is of practical importance. The paper presents the results of the preparation and study of thin films based on solid solutions (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>. The epitaxial layers of these materials were obtained by the method of magnetron and HF magnetron sputtering. The obtained films (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>, were studied by the X-ray diffraction method (XRD). It is noted that in the samples under study, the structure of the solid solution (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> with the composition  $x = 0.21$  has a lower crystallinity than with the composition  $x = 0.64$ .

Внимание исследователей продолжают привлекать твердые растворы на основе широкозонных полупроводников. Большой интерес при этом представляют твердые растворы на основе карбида кремния с нитридом алюминия, так как эти твердые растворы могут наследовать многие уникальные свойства, присущие этим соединениям. Перспективность подобных соединений связана с возможностью управления типом проводимости в процессе роста, что является серьезной проблемой, ограничивающей применение AlN. Кроме того, твердые растворы (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> являются достаточно эффективными люминофорами. На их основе возможно создание инжекционных лазеров и светодиодов, излучающих в голубой, синей и фиолетовой областях спектра. Правда, в последнее время оптоэлектронные коротковолновые изделия делают на основе материалов с GaN, но в условиях экстремальных нагрузок (жесткая радиация, высокие температуры) приборы на основе SiC и твердых растворов на основе SiC будут вне конкуренции. Псевдобинарные твердые растворы (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>, аккумулируя свойства как SiC, так и AlN позволяют существенно расширить диапазон их применения для создания оптоэлектронных и высокотемпературных приборов нового поколения. Эпитаксиальные слои (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> (ЭС) можно применить и как буферные для выращивания кристаллов нитридов III-группы на подложках карбида кремния [1, 2].

Получение твердых растворов на основе карбида кремния с нитридом алюминия также интересно тем, что удельное сопротивление подобных широкозонных систем достаточно велико. Это позволяет использовать эти твердые растворы в качестве подложечного материала для наращивания слоев чистого карбида кремния с целью изготовления на его основе многоэлементных структур или микросхем, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики.

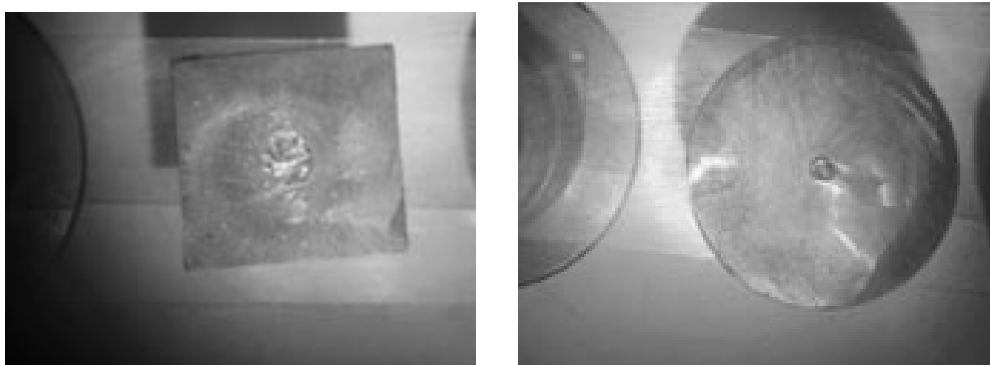
Уникальные динамические характеристики, высокая рабочая температура и малые потери проводимости полупроводников из карбида кремния выводят развитие элементной базы для силовой электроники на новый этап.

Твердые растворы  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  во всем диапазоне изменения  $x$  выращивали сублимационным методом из газовой фазы. Для выращивания использовали высокотемпературные установки с различной нагрузочной емкостью, которые могут обеспечить нагрев до 2800 К в вакууме или в атмосфере инертных газов.

Образцы твердых растворов получали в специальных контейнерах из плотного графита или карбида циркония в атмосфере аргон - азотной смеси при 2300-2550К. В качестве источников использовали смеси порошков и поликристаллические спеки  $\text{SiC-AlN}$ , что позволило выращивать монокристаллические слои  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  в широком диапазоне изменения составов ( $0 < x < 0.95$ ). Для получения образцов требуемой площади применяли ростовые ячейки специальных форм для разращивания кристаллов – затравок. На рис. 1 представлена фотография одного из таких разращенных образцов  $\text{SiC}$  для последующего использования в качестве подложек, а на рис.2 – разрезанные пластины карбида кремния из подобных монокристаллов.



*Рис.1. Разращенный монокристалл SiC.*



*Рис.2. Монокристаллические пластины SiC после разрезания.*

Получение тонких пленок на основе твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  представляет гораздо больший интерес. Это связано с возможностью их применения в качестве эффективных источников света в синей и УФ – областях спектра и в качестве защитных покрытий. Получение эпитаксиальных слоев этих материалов проводили методом магнетронного и ВЧ-магнетронного распыления [3], причем ВЧ магнетронное распыление использовали для

получения слоев с высоким содержанием AlN, так как мишени с большим содержанием нитрида алюминия очень высокоомны.

Для получения плёнок  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  использовалась вакуумная установка, модернизированная с учётом особенностей предполагаемой методики получения. Установка содержит 2-х ступенчатую систему откачки вакуума (до  $10^{-6}$  мм.рт.ст.), систему напуска газов (аргона, азота), магнетронную распылительную систему и систему нагрева подложки. Распыление проводилось магнетроном планарного типа, изготовленного на основе магнитов NdFeB, охлаждаемого проточной водой. Для получения разряда использовался источник питания со стабилизацией тока "Statron 4205". Для регулирования и поддержания стабильной температуры подложки применялась автоматическая система высокоточного регулирования температуры ВРТ-3.

Полученные пленки  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ , исследовались рентгенодифракционным методом (XRD) на дифрактометре Shimadzu-7000 с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением длиной волны  $\lambda_\alpha=1.54051 \text{ \AA}$ . Рентгеновские дифрактограммы получали как от подложки, так и от эпитаксиальной пленки. Об образовании твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  судили по изменению местоположения дифракционных максимумов относительно максимумов SiC подложки (рис.3). Кристаллическое совершенство подложки и ЭС твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  оценивали по полуширине пиков дифрактограммы.

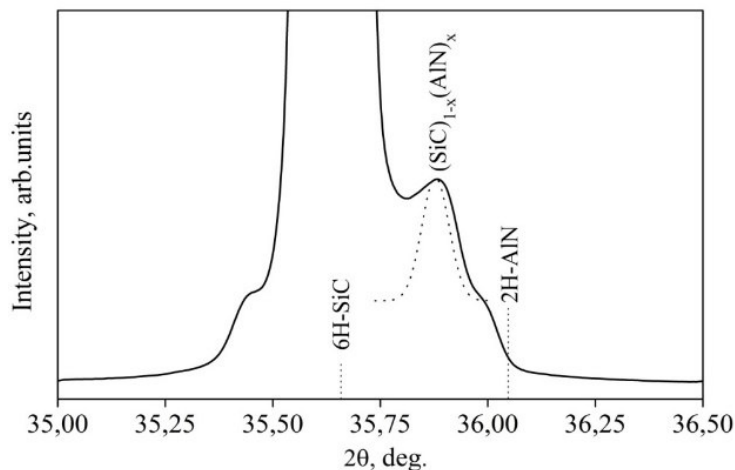


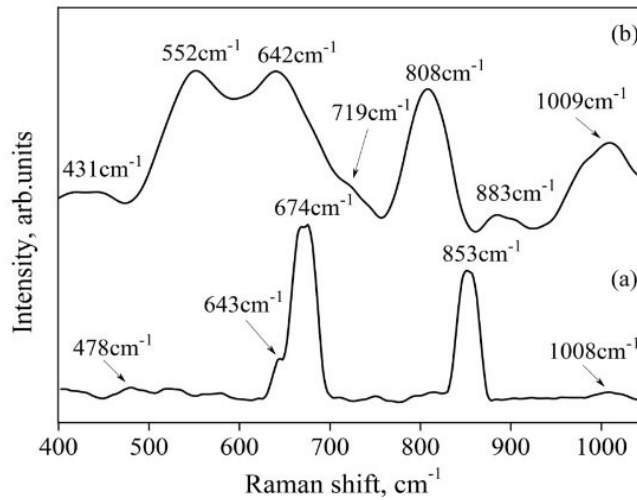
Рис. 3. Дифрактограмма от структуры 2H-(SiC)<sub>0,36</sub>(AlN)<sub>0,64</sub>/6H-SiC.

Как видно из рис. 3 на фоне пика от подложки 6H-SiC располагается малый пик  $2\theta=35.89^\circ$ . Возникновение промежуточного пика между стандартными угловыми значениями от 6H-SiC и 2H-AlN (PDF card) свидетельствует об образовании пленки твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ . По вычисленному значению межплоскостного расстояния  $d=2.50013 \text{ \AA}$  был определен (по экстраполирующей линии стандартных значений для  $d_{\text{SiC}}=2.5159$  и  $d_{\text{AlN}}=2.49$ ) параметр кристаллической решетки  $c=5.0026$  твердого раствора  $(\text{SiC})_{0.36}(\text{AlN})_{0.64}$ .

Оценки структурного совершенства ЭС  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  составов  $x=0.21$  и  $x=0.64$ , выращенные на подложке 6H-SiC при  $T\sim 1350\text{K}$  показали, что при малых составах структурное совершенство получаемых пленок возрастает. Для ЭС  $(\text{SiC})_{0.79}(\text{AlN})_{0.21}$  отличие параметра  $\omega_0$  подложки и пленки составило  $\sim 0.006^\circ$ , что свидетельствует о практическом повторении структуры подложки. Подобным же образом были измерены параметры решеток и для других образцов с другими составами. Параметр  $c$  решетки меняется по линейному закону с изменением состава  $x$ . Еще было замечено, что в исследованных образцах структура твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при составе  $x=0.21$  имеет меньшую кристалличность, чем при составе  $x=0.64$ .

Полученные образцы были также исследованы методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на NtegraSpectra (NT-MDT). (КРС) это эффективный метод химического анализа, изучения состава и строения веществ. Возбуждение при КРС осуществлялось диодным лазером LM532 при комнатной температуре  $\sim 300\text{K}$ . На рис.4

показаны спектры КРС от твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при концентрациях  $x=0.64$  (a) и  $x=0.21$  (b).



*Рис. 4. Спектр комбинационного рассеяния от твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при концентрациях  $x=0.64$  (a),  $x=0.21$  (b).*

Как видно из рис. 4, пики спектра КРС от пленки твердого раствора  $(\text{SiC})_{0.36}(\text{AlN})_{0.64}$  смещены относительно  $6\text{H-SiC}$  и  $2\text{H-AlN}$ . Смещение пиков КРС пленок твердого раствора  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  мы связываем с изменением межатомных расстояний в кристаллической решетке с изменением концентрации  $x$ , то есть в некоторых узлах атомы Si замещаются атомами Al, а атомы C замещаются атомами N, в зависимости от их электроотрицательности и ионных радиусов.

#### Литература

1. Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К., Кардашова Г.Д., Азизова Г.А., Архипов А.В., Ахмедов Р.Р., Магомедова З.С., Магомедова Д.К. Механизмы роста и морфология эпитаксиальных пленок  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  полученных методом магнетронного распыления. // Международная молодежная научная конференция «Математическая физика и ее приложения» (МФП-2012). – Пятигорск. – 2012 – Т.4. С. 53-55.
2. Нурмагомедов Ш.А., Сафаралиев Г.К., Пихтин А.Н., Разбегаев В.Н., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Получение и исследования эпитаксиальных слоев широкозонных твердых растворов  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ . // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 12, в. 17. С. 1043-1045.
3. Б.А. Билалов, Г.К. Сафаралиев, Г.Д. Кардашова, М.А. Гитикчиев, А.С. Ахмедов, Т.Э. Абдуллаев. Ионно-лучевое азотирование поверхности сапфира для формирования наноразмерных слоев нитрида алюминия. // «Электроввакуумная техника и технология», Труды международного постоянно-действующего семинара. Под редакцией руководителя Семинара А.В. Горина. – М.: НОВЕЛЛА. – 2018. С.56-58.