

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79>



УДК 620.3, 621.315.592

Особенности получения пьезоэлектрических тонких пленок методом плазменного напыления из порошкообразного AlN

В.С. Фещенко^{1,®},
К.Н. Зяблюк¹,
Э.А. Сенокосов²,
В.И. Чукита²,
Д.А. Киселев^{3,4}

¹ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва 121108, Россия

²Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь MD-3300, Приднестровская Молдавская республика

³Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино 141190, Россия

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва 119049, Россия

®Автор для переписки, e-mail: feshchenko@mail.ru

Одним из перспективных материалов в твердотельной электронике является соединение нитрид алюминия (AlN). Из него производят широкую номенклатуру полупроводниковых приборов: фотоприемники, светодиоды, пьезоэлектрические преобразователи и т. п. Широкому применению изделий на основе AlN препятствует невысокая технологичность изготовления структур на его основе. В связи с этим, разработка новых технологий для производства приборов на основе AlN является актуальной.

Работа посвящена исследованию тонких пленок AlN, изготовленных с помощью плазменного напыления из порошка AlN. Проведен обзор существующих технологий получения тонких пленок AlN. Обсуждены их достоинства и недостатки. Приведены сведения о модернизации установки ВУП-5, позволившей произвести напыление пленки AlN из порошкообразного состояния.

Одним из существенных преимуществ разработанного в этой работе процесса является то, что подложка нагревалась до температур не выше 300 °С, что позволяет, в свою очередь, совместить эту технологию с технологией кремниевых полупроводниковых приборов.

В результате получены пленки толщиной 200 нм на различных подложках и исследована структура поверхности. Показано, что наименьшей шероховатостью обладают пленки AlN, напыленные на монокристаллические подложки – алмаз и кремний, а наихудшей шероховатостью обладают пленки, напыленные на ситалле.

Методами ИК-спектроскопии были исследованы спектры пропускания полупрозрачных пленок AlN. С их помощью было показано, что на подложке образуется поликристаллический слой AlN, ориентированный в кристаллографическом направлении 002.

С использованием методов сканирующей зондовой микроскопии были исследованы пьезоэлектрические свойства изготовленных пленок. Показано, что их пьезоэлектрический коэффициент d_{33} составляет для алмазной подложки 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца, что говорит о достаточно высоком качестве полученной пленки.

Сделан вывод, что, хотя качество слоев сильно зависит от подложки, но, тем не менее, они проявляют значительный пьезоэффект, что позволяет использовать этот метод для изготовления пьезодатчиков, излучателей ультразвука и т.п.

Ключевые слова: AlN, ИК-спектроскопия, плазменное напыление, пьезоэлектрики, тонкие слои.

Для цитирования: Фещенко В.С., Зяблук К.Н., Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Киселев Д.А. Особенности получения пьезоэлектрических тонких пленок методом плазменного напыления из порошкообразного AlN. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):67-79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79>

Features of the receiving of piezoelectric thin films by plasma spraying of powdery AlN

Valeriy S. Feshchenko^{1,@},
Konstantin N. Zyablyuk¹,
Eduard A. Senokosov²,
Vitaliy I. Chukita²,
Dmitriy A. Kiselev^{3,4}

¹Proizvodstvenno-tekhnologicheskii tsentr "UralAlmazInvest", Moscow 121108, Russia

²Pridnestrovian State University, Tiraspol, MD-3300, Pridnestrovian Moldavian Republic

³Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino 141190, Russia

⁴National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

@Corresponding author, e-mail: feshchenko@mail.ru

One of the promising materials in solid state electronics is the AlN compound. A wide range of semiconductor devices are produced from it, such as photodetectors, LEDs, piezoelectric converters, etc. But the widespread use of products based on AlN prevents low manufacturability designs based on it. In this regard, the development of new technologies for the production of devices based on AlN is relevant.

The work is devoted to the study of thin AlN films obtained by plasma spraying from AlN powder. The review of existing technologies of production of thin films AlN is carried out.

Their advantages and disadvantages are discussed. Information on the modernization of the VUP-5 installation, which allowed to spray the AlN film from the powdered state, is given.

One of the significant advantages of the process developed in this work is that the substrate is heated to temperatures no higher than 300 °C, which in turn allows to combine this technology with the technology of silicon semiconductor devices.

As a result, films with a thickness of 200 nm on various substrates were obtained and their surface structure was studied. It is shown that AlN films deposited on single crystal substrates such as diamond and silicon have the least roughness, while films on siall have the worst roughness.

The transmission spectra of the obtained AlN films were investigated by IR spectroscopy. With their help, it was shown that a polycrystalline AlN layer oriented in the crystallographic direction 002 is formed on the substrate. The piezoelectric properties of the obtained films were investigated by scanning probe microscopy. It is shown that their piezoelectric coefficient d_{33} is 60% of the value for a single-domain single-crystal sample for a diamond substrate, which indicates a sufficiently high quality of the resulting film.

It is concluded that, although the quality of the layers strongly depends on the substrate, nevertheless, they exhibit a significant piezoelectric effect, which allows the use of this method for the manufacture of piezoelectric sensors, ultrasonic emitters, etc.

Keywords: AlN, IR spectroscopy, plasma spraying, piezoelectric, thin layers.

For citation: Feshchenko V.S., Zyablyuk K.N., Senokosov E.A., Chukita V.I., Kiselev D.A. Features of the receiving of piezoelectric thin films by plasma spraying of powdery AlN. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):67-79 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79>

Введение

Одним из перспективных материалов в твердотельной электронике являются тонкие пленки нитрида алюминия (AlN). Из них изготавливаются светодиоды [1], фотодетекторы [2] и различного рода пьезоэлектрические устройства [3, 4].

Эффективность работы пьезоэлектрических компонентов с AlN определяется качеством пленки. Идеальным вариантом являются эпитаксиальные пленки AlN с ориентацией (002), когда c -ось перпендикулярна направлению подложки, так как в этом направлении нитрид алюминия имеет максимальный пьезоэлектрический отклик [5]. Эпитаксиальные пленки AlN могут быть получены с помощью таких методов, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ) [6] или осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD) [5]. Данные методы достаточно сложны и содержат условия, несовместимые с технологиями производства микроэлектронных компонентов, в частности температура подложки должна быть не менее 800 °C из-за высокой температуры плавления AlN.

Поэтому в качестве альтернативного метода нанесения пленок AlN широко используется реактивное магнетронное распыление в среде азота в плазме постоянного или высокочастотного тока. Магнетронное напыление относительно дешево, не требует нагрева подложки до высоких температур и позволяет получить высокоориентированные поликристаллические пленки AlN с хорошими пьезоэлектрическими свойствами.

Но, несмотря на то, что в большом числе работ сообщается об успешном росте пьезоэлектрических пленок AlN методом магнетронного напыления, сохраняется большой разброс их качественных характеристик. На характеристики пленок могут влиять такие

факторы, как питание плазмы (постоянный ток, импульсный или ВЧ), мощность разряда, давление газа, соотношение концентраций N_2/Ar в газе, расстояние между подложкой и мишенью, напряжение смещения и температура подложки и т.д. Поэтому любое экспериментальное исследование, направленное на изучение условий изготовления и изучение свойств полученных тонких пленок AlN, является актуальным.

Теоретические основы процесса изготовления тонких пленок AlN

Как было отмечено выше, на различные характеристики пленок AlN влияет ряд параметров процесса их получения. Например, в [7] исследовалась преимущественная ориентация пленок AlN, осаждаемых на подложках Si (001) в ВЧ разряде в зависимости от давления газов, соотношения N_2/Ar и смещения подложки. Сообщается, что при концентрации азота 30% и давлении 0.4–0.5 Pa получают (002)-ориентированные пленки, а при увеличении давления выше 0.7 Pa на рентгеновской дифрактограмме появляются пики (102) и (103). Соотношение интенсивностей пиков также зависит от отношения N_2/Ar . Также (002)-ориентированные пленки могут быть получены при более высоком давлении при подаче отрицательного напряжения смещения на подложку. С другой стороны авторы [8] аргументируют, что на характеристики пленок влияют не только указанные выше параметры, но и конструкция магнетронов, что может объяснить разногласие в полученных результатах в литературе при одинаковых условиях. Они исследовали напыление пленок на двух магнетронах с различным пространственным распределением магнитного поля. В частности показано, что на магнетроне с более объемным полем (т. н. разбалансированный магнетрон) требуемая мощность достигается при более низком давлении и синтезируемые пленки имеют ориентацию (002) в широком диапазоне отношений N_2/Ar , а также плотную структуру без пустот.

Пьезоэлектрические пленки AlN имеют неоднородную структуру по толщине, так как процесс роста (002)-пленок начинается с образования зародышей на подложке и затем переходит в столбчатую структуры с преимущественной ориентацией. Поэтому при увеличении толщины ширина (002)-пика на рентгенограмме уменьшается, а пьезоэлектрический модуль d_{33} увеличивается, приближаясь к максимуму после ~ 0.5 мкм, а тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается [9]. Также на величину пьезомодуля d_{33} влияют не только условия напыления, но и материал нижнего электрода под пленкой. Так в [10] отмечено, что пленки AlN, выращенные на Pt, обладают большим d_{33} по сравнению с пленками на Al и Ti.

Другой важной характеристикой (002)-пленок AlN является полярность (Al-сторона или N-сторона сверху). Полярность пленки определяет знак пьезоотклика. Это означает, что хорошая пленка должна иметь определенную полярность, а не состоять из островков с различной полярностью, компенсирующих друг друга. Полярность также зависит от режимов напыления. Так, в работе [11] увеличение давления газа от 0.36 до 4.0 Pa привело к изменению пьезоотклика от +3.7 до -4.4 пКл/м, что свидетельствует в пользу смены полярности пленки от Al к N-стороне. Также изменение пьезоотклика от положительного к отрицательному наблюдалось при уменьшении мощности разряда [12] и при вводе 1% кислорода в смесь N_2/Ar [13]. В [14] полярность пленок непосредственно наблюдалась с помощью электронной микроскопии с атомарным разрешением и было показано, что при

соблюдении определенных условий напыления полярность пленок AlN полностью определяется материалом подложки: так, на Pt(111) растут пленки с N-стороной, в то время как на Al(111) пленки ориентированы Al-стороной вверх.

Оборудование и методика эксперимента

Нанесение слоев производилось на вакуумном посту ВУП-5М, укомплектованном магнетронной приставкой. Для выполнения работы к ВУП-5М было подключено дополнительное оборудование (рис. 1).

Для измерения давления газов использовался вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2. Для подачи газов под колпак ВУП-5М использовался регулятор расхода газов РРГ-3-10-С. В работе использовались баллоны с аргоном и кислородом с редукторами. Для нанесения слоя пьезоэлектрика AlN использовался высокочастотный (ВЧ) генератор с согласующим устройством.

Вакуумный пост укомплектован магнетронной приставкой с тремя магнетронами, позволяющей наносить до трех слоев за 1 цикл откачки (рис. 2).

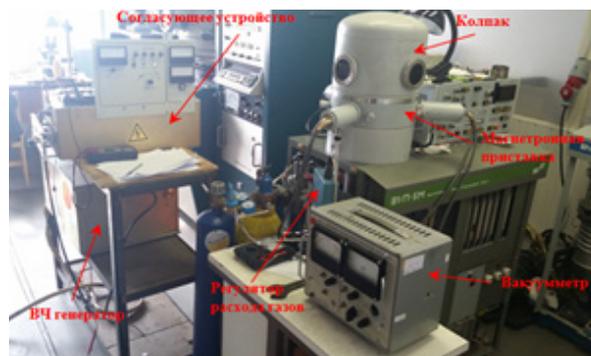


Рис. 1. Оборудование для нанесения слоев на основе вакуумного поста ВУП-5М.

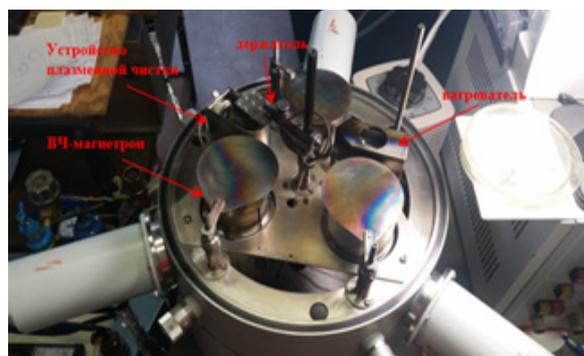


Рис. 2. Магнетронная приставка ВУП-5М.

Магнетроны охлаждаются проточной водой и рассчитаны на работу с мишенями Ø 40мм. Один из магнетронов был модифицирован для работы с ВЧ-генератором для нанесения диэлектрических слоев. Образцы, на которые наносятся слои, закрепляются на специально изготовленном держателе, который присоединяется к штоку в центре приставки. Шток вращается вокруг вертикальной оси, позволяя перемещать держатель с образцами между магнетронами в вакууме. Для нагрева держателя до нужной температуры изготовлен нагреватель на основе лампы накаливания. Также между магнетронами расположено устройство плазменной очистки поверхностей образцов.

Для напыления нитрида алюминия использовался один из трех магнетронов приставки ВУПа с некоторыми модификациями. Во-первых, был изготовлен заземленный экран, закрывающий катод магнетрона снизу приставки с зазором в несколько мм от него – таким образом удалось избавиться от нежелательного разряда, возникающего снизу приставки при подаче ВЧ напряжения. Далее, зона ВЧ плазмы имеет больший размер по сравнению с зоной плазмы постоянного тока, что может привести к распылению анода и кольца, которым мишень прижимается к катоду, что в свою очередь приводит к загрязнению пленок. Поэтому вместо стандартного анода с загнутыми сверху краями из нержавеющей

щей стали был изготовлен другой анод. Верхняя плоскость анода имеет форму кольца с внешним/внутренним диаметром \varnothing 60мм/46мм, и находится на одном уровне с верхней плоскостью катода (рис. 3).

Диэлектрическая мишень имеет больший размер по сравнению со стандартным диаметром \varnothing 40мм; она полностью закрывает зазор между катодом и анодом и частично внутренний радиус кольца анода, прижимное кольцо не используется. Таким образом, мишень закрывает максимальную зону ВЧ плазмы, минимизируя паразитные распыления (рис. 4). На внешнем радиусе кольца анода установлен экран высотой 15 мм для предотвращения загрязнения магнетронной приставки материалами распыления.



Рис. 3. ВЧ магнетрон с мишенью из нитрида алюминия.



Рис. 4. Напыление AlN в ВЧ разряде.

Схема питания ВЧ магнетрона представлена на рис 5. Источником питания является генератор, потребляющий 5.5 А от сети 380В, рассчитанный на выходную мощность до 1.5 кВт на частоте 13.56 МГц.

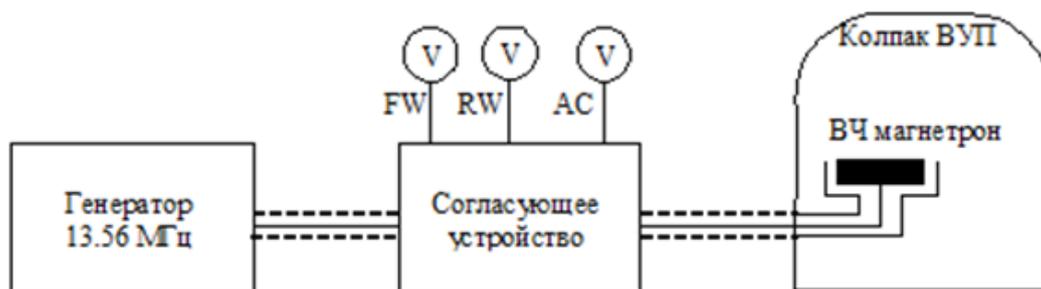


Рис. 5. Схема питания ВЧ магнетрона.

Выход генератора соединен с согласующим устройством посредством коаксиального кабеля Alpha Wire 214/U с волновым сопротивлением 50 Ом длиной 1.8 м. Выход согласующего устройства соединен со входом ВЧ магнетрона с помощью коаксиального кабеля РК-50-7-11 длиной 1.3 м. Корпуса генератора и согласующего устройства заземлены на корпус ВУПа через оплетку кабелей. Кабель РК-50-7-11 обернут алюминиевой фольгой для дополнительной экранировки помех, которые влияют на управляющее устройство регулятора расхода газа при включении генератора.

Схема согласующего устройства представлена на рис. 6.

На входе устройства установлены детектор падающей волны (FW) и детектор отраженной волны (RW). Напряжения на их выходах позволяют контролировать амплитуду

сигнала и, следовательно, мощность ВЧ разряда. Далее сигнал поступает на П-образный контур, состоящий из катушки индуктивности L1, высоковольтных конденсаторов C1–C4 и воздушного конденсатора C5. LC-контур, состоящий из катушки индуктивности L2 и вакуумного конденсатора C6 позволяет подстраивать реактивное сопротивление нагрузки в диапазоне от –200 до +200 Ом. Дроссель L3 и резистивный делитель 1:100 R1, R2 позволяют измерять напряжение автосмещения на выходе согласующего устройства. Мишень из нитрида алюминия (белый восьмиугольник на рис. 3) была изготовлена путем нанесения порошка AlN на диэлектрическое основание. Использовался порошок марки A100, который имеет характеристики согласно заявлению производителя, указанные в таблице. Параметр SSA (*specific surface area*) обозначает удельную площадь поверхности, D50 – размер зерна, ниже которого содержатся 50% частиц.

В процессе напыления центральная часть мишени нагревается до высоких температур (рис. 4). В результате неравномерного нагрева мишень может расколоться, поэтому основание мишени должно быть изготовлено из материала с высокой теплопроводностью. Одним из таких материалов является керамика из того же нитрида алюминия, имеющаяся в продаже. Для изготовления основания мишени были приобретены пластины из керамики AlN размером 48×60×0.5 мм, из которых были вырезаны восьмиугольники с расстоянием между сторонами 48 мм. Напылять AlN можно и непосредственно с данных пластин, однако содержание примесей в них неизвестно (при изготовлении керамики в порошок добавляют связующие вещества). Поэтому предпочтение было отдано пластинам со слоем порошка с характеристиками, указанными в таблице. Для нанесения порошка 5 г AlN добавлялись в 50 мл деионизованной воды, смесь взбалтывалась и выливалась в чашку Петри с основанием мишени. После выпадения осадка вода удалялась

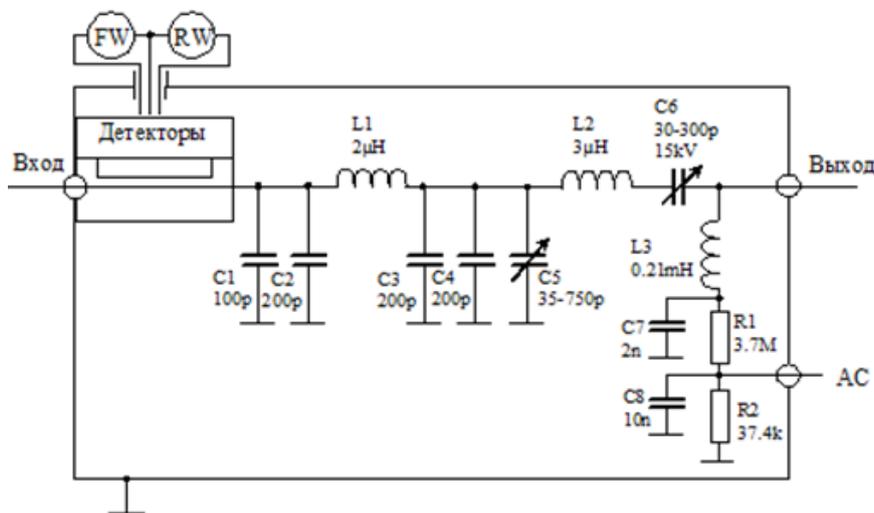


Рис. 6. Схема согласующего устройства.

Заявленные характеристики порошка AlN

	Характеристика	Значение
1	SSA, (м ² /г)	1.2–2.0
2	D50, (мкм)	7.0–10.0
3	Fe, (%)	0.03–0.05
4	Si, (%)	0.05–0.07
5	O ₂ , (%)	0.3–0.7

с помощью шприца, остатки воды высушивались. Толщина высохшего осадка 0.3–0.4 мм. Несмотря на хрупкость слоя AlN, адгезия была достаточной для проведения всех необходимых операций; в процессе напыления отслоение частиц порошка не наблюдалось.

Мощность плазмы регулировалась путем подстройки переменных конденсаторов С5 и С6 согласующего устройства (рис. 6) и контролировалась по показаниям вольтметров, подключенным к разъемам детекторов падающей и отраженной волн. Как правило, конденсатор С5 устанавливался на 3/4 от максимального значения, а точная мощность регулировалась с помощью вакуумного конденсатора С6.

После обработки был выбран следующий оптимальный режим напыления AlN. Мишень из слоя порошка AlN толщиной 0.3–0.4 мм на основании из керамики AlN толщиной 0.5 мм в форме восьмиугольника размером 48 мм лежит на катоде магнетрона, теплоотвод не используется. Для поджига плазмы необходимо либо увеличить давление до 0.7 Па, либо увеличить мощность ВЧ.

Режимы напыления:

- расстояние от мишени до нижней грани держателя – 21–22 мм;
- давление Ar – 0.5–0.7 Па;
- амплитуда падающей волны – 1.0–1.1 В;
- амплитуда отраженной волны – 0.58–64 В;
- автосмещение – 120...–180 В;
- скорость напыления – 300 нм/час.

При заданном уровне мощности температура держателя образцов поддерживается на уровне 300 °С. Увеличение мощности ВЧ приводит к увеличению температуры держателя, а также к быстрому загрязнению мишени. Предположительно происходит загрязнение металлическим алюминием в результате разложения AlN. Загрязнение, указанное на рис. 7, происходит приблизительно через 1 час работы в режиме, указанном выше, однако в ряде случаев первые следы загрязнения появлялись и через 30 минут работы. Дальнейшее напыление с загрязненной мишенью приводит к тому, что почти вся поверхность мишени становится темно-серой, а напыленный слой становится непрозрачным и проводящим. Таким образом, напыление слоя AlN толще 300 нм данным методом необходимо производить в несколько этапов, каждый раз смывая слой загрязненного порошка AlN с мишени и нанося новый.

Методика измерения и основные экспериментальные результаты

В результате были напылены пленки на ряд подложек, таких как алмаз (покрытый слоем платины), кремний и ситал.

На рис. 8 представлены изображения поверхности пленок AlN напыленные на алмаз и ситалл. Поверхность AlN, напыленная на кремний, визуально ничем не отличалась от

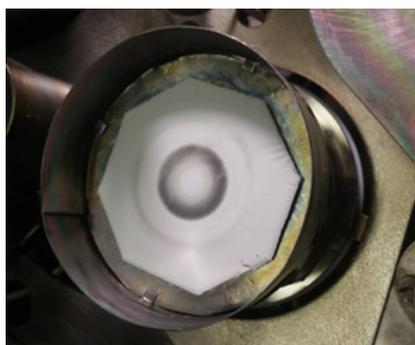


Рис. 7. Загрязнение мишени AlN после продолжительной работы.

пленки, напыленной на слой платины на алмазе, и обе эти поверхности имеют близкие значения шероховатости. Для пленки AlN на алмазе – $R_{ms} = 0.45 \text{ nm}$, $R_a = 0.27 \text{ nm}$, а для пленки AlN на кремнии – $R_{ms} = 0.48 \text{ nm}$, $R_a = 0.3 \text{ nm}$.

Из рис. 8 видно, что при одних и тех же условиях напыления шероховатость поверхности пленки AlN существенно отличается в зависимости от подложки. При напылении на слой монокристалла алмаза, кремния или металлический слой шероховатость минимальная. При напылении на поликристаллический ситалл возникают воронкообразные углубления, очевидно связанные с перепадом напряжений на границах зерен поликристалла. Из-за этого среднеарифметическая шероховатость R_a слоя AlN на ситалле в восемь раз, а среднеквадратичная шероховатость R_{ms} в двенадцать раз больше, чем на алмазе или кремнии.

Для того чтобы убедиться в том, что напыленная пленка состоит из нитрида алюминия, нами были исследованы её спектры ИК пропускания. Исследования проводили на фурье-спектрометре ФСМ – 1201.

Полученный ИК-спектр представлен на рис. 9. Спектр пропускания кремниевой подложки вычитался из суммарного спектра пропускания.

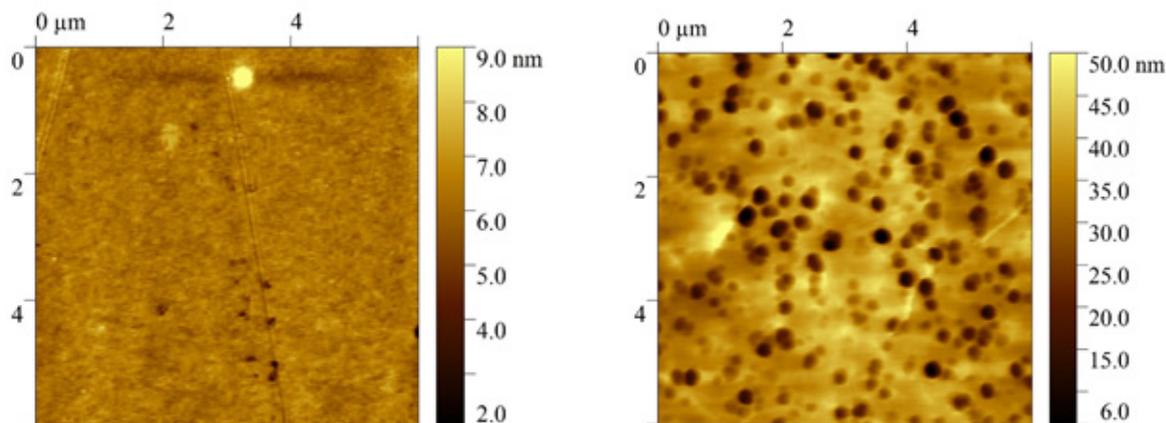


Рис. 8. Топография поверхности образцов, полученная на сканирующем зондовом микроскопе MFP-3D:
 а) AlN на алмазе, параметры шероховатости поверхности: $R_{ms} = 0.45 \text{ nm}$, $R_a = 0.27 \text{ nm}$;
 б) AlN на ситалле, параметры шероховатости поверхности: $R_{ms} = 6.26 \text{ nm}$, $R_a = 4.64 \text{ nm}$.

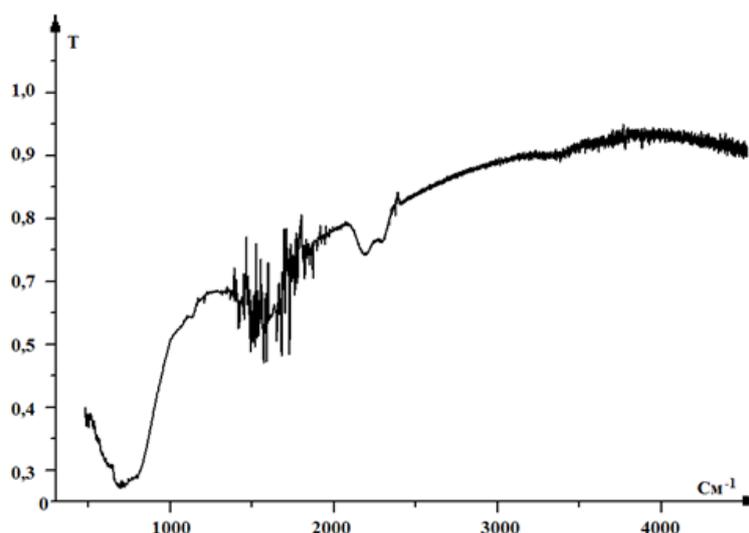


Рис. 9. ИК-спектр пленки, напыленной на кремний.

На спектре, представленном на рис. 9, виден пик в районе 672 см^{-1} , что соответствует полосе поглощения поперечного оптического фонона E1(TO) в кристаллической решетке AlN в форме вюрцита [15]. В то же время, пика поглощения поперечного оптического фонона A1(TO) на длине волны 612 см^{-1} не наблюдается, что согласно [15], соответствует преимущественной кристаллографической ориентации 002 у поликристаллической пленки AlN.

Исследование пьезоэлектрических свойств напыленных пленок проводилось методами сканирующей зондовой микроскопии на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ «МИСиС» по методике, изложенной в [16]. На рис. 10 представлены результаты исследований.

Из рис 10, на котором представлены зависимости деформации пьезоэлектрического слоя от поданного на иглу напряжения [16], видно, что пьезоэлектрический коэффициент для пленки на алмазе равен $d_{33} = 2.2 \text{ пм/В}$, что соответствует 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца. Пленка, напыленная на кремний, имеет $d_{33} = 7.2 \text{ пм/В}$, что соответствует высокоориентированной многодоменной структуре слоя AlN.

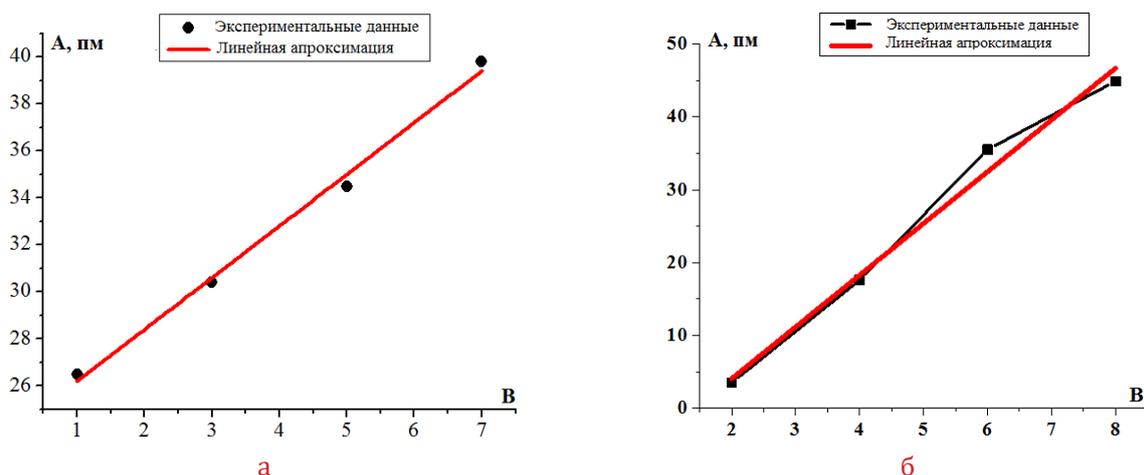


Рис. 10. Измерение пьезоэлектрического коэффициента d_{33} :
а) AlN на алмазе; б) AlN на кремнии.

Заключение

Проведен обзор существующих технологий получения тонких пленок AlN. Обсуждены их достоинства и недостатки. Приведены сведения о модернизации установки ВУП-5, позволившие произвести напыление пленки AlN из порошкообразного состояния.

В представленном в этой работе процессе подложка нагревалась до температур около $300 \text{ }^\circ\text{C}$, что позволяло совместить эту технологию с технологией кремниевых полупроводниковых приборов.

Получены пленки толщиной 200 нм на различных подложках и исследована структура поверхности. С помощью ИК-спектроскопии показано, что на подложке образуется поликристаллический слой, ориентированный в кристаллографическом направлении 002. Исследованы пьезоэлектрические свойства изготовленных пленок. Показано, что их пьезоэлектрический коэффициент d_{33} составляет для алмазной подложки 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца, что говорит о достаточно

высоком качестве полученной пленки. Показано, что качество слоев сильно зависит от подложки, но, тем не менее, они проявляют значительный пьезоэффект, что позволяет использовать этот метод для изготовления пьезодатчиков, излучателей ультразвука и т.п.

Литература:

1. Inoue Sh.-I., Tamari N., Taniguch M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(14):141106. <https://doi.org/10.1063/1.4978855>
2. Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M., Salo V.V. Solid-state photoelectronics of the ultraviolet range (review). *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2016;61(10):1175-1185. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100041>
3. Priya Sh., Song H.-Ch., Zhou Y., Varghese R., Chopra A., Kim S.-G., Kanno I., Wu L., Ha D.S., Ryu J., Polcawich R.G. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems.* 2017;4(1):3-39. <https://doi.org/10.1515/ehs-2016-0028>
4. Piprek J. (Ed.). Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. 519 p. ISBN: 978-3-527-61072-3
5. Tsubouchi K., Mikoshiba N. Zero-Temperature-Coefficient SAW Devices on AlN Epitaxial Films. *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics.* 1985;32(5):634-644. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1985.31647>
6. Rowland L.B., Kern R.S., Tanaka S., Davis R.F. Epitaxial growth of AlN by plasma-assisted, gas-source molecular beam epitaxial. *J. Mater. Research.* 1993;8(9):2310-2314. <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.2310>
7. Clement M., Iborra E., Sangrador J., Sanz-Hervas A., Vergara L., Aguilar M. Influence of sputtering mechanisms on the preferred orientation of aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2003;94(3):1495-1500. <https://doi.org/10.1063/1.1587267>
8. Duquenne C., Tessier P.Y., Besland M.P., Angleraud B., Jouan P.Y., Aubry R., Delage S., Djouadi M.A. Impact of magnetron configuration on plasma and film properties of sputtered aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2008;104(6):063301-1-8. <https://doi.org/10.1063/1.2978226>
9. Yarar E., Hrkac V., Zamponi C., Piorra A., Kienle L., Quandt E. Low temperature aluminum nitride thin films for sensory applications. *AIP Advances.* 2016;6(7):075115-1-11. <https://doi.org/10.1063/1.4959895>
10. Dubois M.-A., Muralt P. Stress and piezoelectric properties of aluminum nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering. *J. Appl. Phys.* 2001;89(11):6389-6395. <https://doi.org/10.1063/1.1359162>
11. Kamohara T., Akiyama M., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N., Kuwano N. Influence of sputtering pressure on polarity distribution of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89:243507-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2405849>
12. Akiyama M., Kamohara T., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Polarity inversion in aluminum nitride thin films under high sputtering power. *Appl. Phys. Lett.* 2007;90(15):151910-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2721865>
13. Akiyama M., Kamohara T., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Influence of oxygen concentration in sputtering gas on piezoelectric response of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93(2). P. 021903-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2957654>
14. Harumoto T., Sannomiya T., Y Matsukawa, Muraishi S., Shi J., Nakamura Y., Sawada H., Tanaka T., Tanishiro Y., Takayanagi K. Controlled polarity of sputter-deposited aluminum nitride on metals observed by aberration corrected scanning transmission electron Microscopy. *J. Appl. Phys.* 2013;113(8):084306-1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4792942>
15. Sanz-Hervas A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films. *Diamond and Related Materials.* 2003;12(3-7):1186-1189. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00228-5)
16. Киселев Д.А., Жуков Р.Н., Ксенич С.В., Кубасов И.В., Темиров А.А., Тимушкин Н.Г., Быков А.С., Малинкович М.Д., Shvartsman V.V., Лупашку Д.Ц., Пархоменко Ю.Н. Влияние ориентации кремниевой подложки на локальные пьезоэлектрические характеристики пленок LiNbO₃. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2016;7:74-80. <https://doi.org/10.7868/S020735281607009X>

Reference:

1. Inoue Sh.-I., Tamari N., Taniguch M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(14):141106. <https://doi.org/10.1063/1.4978855>
2. Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M., Salo V.V. Solid-state photoelectronics of the ultraviolet range (review). *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2016;61(10):1175-85. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100041>

3. Priya Sh., Song H.-Ch., Zhou Y., Varghese R., Chopra A., Kim S.-G., Kanno I., Wu L., Ha D.S., Ryu J., Polcawich R.G. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*. 2017;4(1):3-39. <https://doi.org/10.1515/ehs-2016-0028>
4. Piprek J. (Ed.). Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. 519 p. ISBN: 978-3-527-61072-3
5. Tsubouchi K., Mikoshiba N. Zero-Temperature-Coefficient SAW Devices on AlN Epitaxial Films. *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*. 1985;32(5):634-644. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1985.31647>
6. Rowland L.B., Kern R.S., Tanaka S., Davis R.F. Epitaxial growth of AlN by plasma-assisted, gas-source molecular beam epitaxial. *J. Mater. Research*. 1993;8(9):2310-4. <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.2310>
7. Clement M., Iborra E., Sangrador J., Sanz-Hervas A., Vergara L., Aguilar M. Influence of sputtering mechanisms on the preferred orientation of aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2003;94(3):1495-1500. <https://doi.org/10.1063/1.1587267>
8. Duquenne C., Tessier P.Y., Besland M.P., Angleraud B., Jouan P.Y., Aubry R., Delage S., Djouadi M.A. Impact of magnetron configuration on plasma and film properties of sputtered aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2008;104(6):063301-1-8. <https://doi.org/10.1063/1.2978226>
9. Yarar E., Hrkac V., Zamponi C., Piorra A., Kienle L., Quandt E. Low temperature aluminum nitride thin films for sensory applications. *AIP Advances*. 2016;6(7):075115-1-11. <https://doi.org/10.1063/1.4959895>
10. Dubois M.-A., Murali P. Stress and piezoelectric properties of aluminum nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering. *J. Appl. Phys.* 2001;89(11):6389-95. <https://doi.org/10.1063/1.1359162>
11. Kamohara T., Akiyama M., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N., Kuwano N. Influence of sputtering pressure on polarity distribution of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89:243507-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2405849>
12. Akiyama M., Kamohara T., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Polarity inversion in aluminum nitride thin films under high sputtering power. *Appl. Phys. Lett.* 2007;90(15):151910-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2721865>
13. Akiyama M., Kamohara T., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Influence of oxygen concentration in sputtering gas on piezoelectric response of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2008;93(2):021903-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2957654>
14. Harumoto T., Sannomiya T., Matsukawa Y., Muraishi S., Shi J., Nakamura Y., Sawada H., Tanaka T., Tanishiro Y., Takayanagi K. Controlled polarity of sputter-deposited aluminum nitride on metals observed by aberration corrected scanning transmission electron Microscopy. *J. Appl. Phys.* 2013;113(8):084306-1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4792942>
15. Sanz-Hervas A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films. *Diamond and Related Materials*. 2003;12(3-7):1186-9. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00228-5)
16. Kiselev D.A., Zhukov R.N., Ksenich S.V., Kubasov I.V., Temirov A.A., Timushkin N.G., Bykov A.S., Malinkovich M.D., Shvartsman V.V., Lupascu D.C., Parkhomenko Yu.N. The effect of silicon-substrate orientation on the piezoelectric characteristics of LiNbO₃ films. *Poverkhnost'. rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016;10(4):742-7. <https://doi.org/10.1134/S1027451016040091>

Об авторах:

Фещенко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, начальник научно-производственной лаборатории № 1, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4)

Зяблук Константин Николаевич, кандидат физико-математических наук, начальник научно-производственной лаборатории № 4, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4)

Сенокосов Эдуард Александрович, доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко (MD - 3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128)

Чукита Виталий Исакович, старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко (MD - 3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128)

Киселев Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4)

About authors:

Valeriy S. Feshchenko, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Research and Production Laboratory № 1 of Production-Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd. (4, Ivan Franko St., Moscow 121108, Russia).

Konstantin N. Zyablyuk, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of Research and Production Laboratory № 4 of Production-Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd. (4, Ivan Franko St., Moscow 121108, Russia).

Eduard A. Senokosov, Dr.Sci. (Physics and Mathematics), professor, Head of the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics, T.G. Shevchenko Dniester State University (128, 25 of October St., Tiraspol MD – 3300, PMR)

Vitaliy I. Chukita, Senior Lecturer at the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics, T.G. Shevchenko Dniester State University (128, 25 of October St., Tiraspol MD – 3300, PMR)

Dmitriy A. Kiselev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Department of Materials sciences of Semiconductors and Dielectrics, The Federal State Educational Institution of the Higher Education National University of Science and Technology MISiS (4, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia)