

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 531.781.2.084.2

DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-9

*Д. А. Гулиева, Н. С. Чапанов, Т. Б. Неврюзина*ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ*D. A. Gulieva, N. S. Chapanov, T. B. Nevruzina*RESEARCH OF PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE
ELECTRODES FOR PIEZOELEMENTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Пьезоэлементы находят широкое применение в современных технических устройствах разного назначения. Целью работы является исследование влияния различных видов металлизированных покрытий на пьезоэлементы методом магнетронного напыления. **Материалы и методы.** Изготовлены макеты пьезоэлементов, напыленные титан-никель с помощью метода магнетронного напыления. **Результаты.** Проведена отработка технологии напыления высокотемпературной контактной группы титан-никель на установке вакуумного магнетронного напыления EvoVac на вращающуюся карусель подложек. Изготовлены экспериментальные макетные образцы на кремниевых пластинах с высокотемпературными контактами титан-никель, проведена проверка адгезии напыленной пленки методом разварки золотой проволоки. **Выводы.** Магнетронным методом сформированы высокотемпературные электроды на пьезокерамических модулях, позволяющие напылять электроды на высокотемпературные материалы пьезоэлементов системой титанат-ниобат висмута.

A b s t r a c t. Background. Piezoelectric elements are widely used in modern technical devices for various purposes. The aim of the work is to study the effect of various types of metalized coatings on piezoelectric elements by magnetron sputtering. **Materials and methods.** Models of piezoelectric elements sprayed with titanium-nickel were made using the magnetron sputtering method. **Results.** The technology for spraying a high-temperature contact group of titanium-nickel was tested at the EvoVac vacuum magnetron sputtering device on a rotating carousel of substrates. Experimental prototype samples were made on silicon wafers with high-temperature titanium-nickel contacts, and the adhesion of the deposited film was verified by gold wire welding. **Conclusions.** High-temperature electrodes were formed by the magnetron method on piezoceramic modules, which make it possible to spray electrodes on high-temperature piezoelectric materials by a bismuth titanate-niobate system.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлемент, высокотемпературные электроды, метод магнетронного напыления, чувствительный элемент, титан-никель, титанат-ниобат висмута.

К е y w o r d s: piezoelectric element, high-temperature electrodes, magnetron sputtering method, sensitive element, titanium-nickel, titanate-niobate of bismuth.

В настоящее время при создании высокотемпературных контактов широко используются тонкие пленки, полученные магнетронным плазмохимическим методом. Процесс металлизации на кремниевых пластинах является одной из конечных операций при формировании чувствительных элементов современных полупроводниковых приборов [1–3], позволяющей обеспечить надежный механический и омический контакт при сборке кристаллов в корпуса.

Формирование металлизации происходит на напылительном оборудовании на основе магнетронных систем, так как оно обладает рядом достоинств, таких как высокая скорость роста пленок, малое загрязнение посторонними газами и хорошая адгезия пленок к кремниевым подложкам.

В частности, металлизация может представлять собой двухкомпонентную систему из подслоя титана и напыленного на него никеля (Ti-Ni) [4]. В качестве первого слоя наносится титан с отработанными режимами работы и скоростью напыления. В данной системе используется адгезионный слой титана, обеспечивающий хорошую адгезию к кремнию и никелю. Нанесение второго слоя никеля позволяет сформировать двухслойную металлизацию при определенных температурных режимах для подложки с общей толщиной структуры от 1,5 до 2 мкм.

Двухслойное покрытие, нанесенное по способу, описанному выше, обеспечивает необходимый омический контакт, характеризуемый высокой воспроизводимостью и стабильностью параметров получаемых структур, а также отличается большим сроком службы.

В изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния используются материалы чувствительные к механическим деформациям [5–9]. В связи с этим при формировании контактных структур необходимо создать условия напыления, при которых механические напряжения, возникающие при осаждении металлических пленок, будут сведены к минимуму.

Этого можно достигнуть при соблюдении следующих условий: использовании пластичных материалов; проведении напыления при наиболее низких температурах; исключении циклических термообработок.

При достаточно низких гомологических температурах T (безразмерная величина, численно равная отношению температуры вещества к температуре его плавления) вещества адатомы (атомы, находящиеся на поверхности кристалла) никеля и титана будут иметь очень низкую подвижность [10, 11], так как они не могут преодолеть барьер поверхностной диффузии E_d . Это означает, что прибывающие с мишени атомы будут «прилипать» к поверхности растущей пленки в том месте, куда они изначально попали. Из-за этого образуется структура пленки, состоящая из колонн, разделенных порами. Данные колонны в пленке не всегда состоят из одного кристаллического зерна, они могут состоять из многих зерен или быть аморфными (рис. 1). Их образование связано с ростом шероховатости напыляемой поверхности и геометрическим самозатенением, что в свою очередь влияет на качество омического контакта и уменьшение долговечности данных структур.

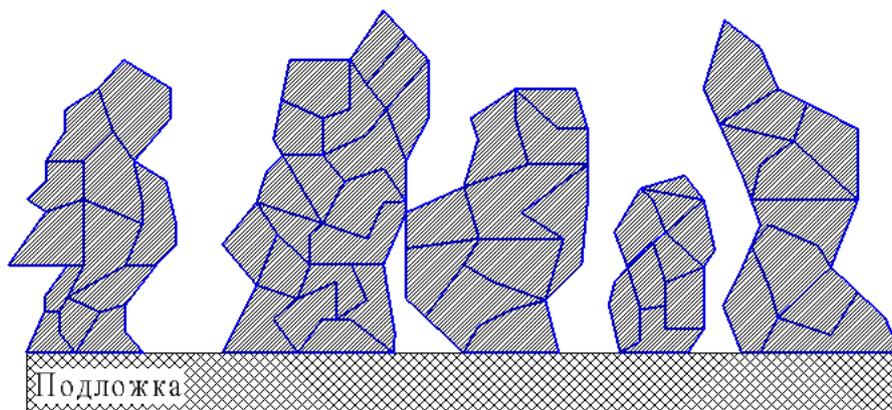


Рис. 1. Структура пленки в условиях низкой гомогенной температуры при отсутствии энергетического бомбардирования

Этого можно избежать при повышении гомологической температуры до той точки, при которой адатомы будут способны преодолевать барьер поверхностной диффузии, а также при обеспечении непрерывной бомбардировки энергичными частицами.

Толщина пленки в заданной точке на подложке определяется по формуле

$$h = M \frac{\cos \phi \cdot \cos \alpha}{r^2} t,$$

где M – постоянный параметр, пропорциональный скорости распыления; t – время нанесения пленки; r – расстояние между точками распыления и конденсации; $\cos \phi$ – угол распыления; $\cos \alpha$ – угол конденсации.

В основном в качестве инертного газа для обеспечения непрерывной бомбардировки в рабочей камере применяется аргон, находясь в объеме разряда в виде нейтральных атомов. Аргон может влиять на процесс нанесения структуры следующим образом: образовывать загрязнение растущей пленки; нарушать угловое и пространственное распределение распыленного материала за счет соударений с частицами распыляемого вещества. С повышением температуры средняя колебательная энергия частиц возрастает настолько, что становится выше энергии связи с другими частицами, и они покидают поверхность (испаряются) и распространяются в свободном пространстве.

Скорость испарения, т.е. количество вещества (в граммах), покидающее 1 см^2 свободной поверхности в 1 с при условной температуре испарения T_y :

$$v_{\text{и}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_y}},$$

где M – молекулярная масса, г/моль.

Скорость испарения большинства элементов при T_y составляет $10^{-4} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Для получения приемлемых скоростей роста пленки, а также экономного расходования материала следует создавать условия движения частиц испаряемого вещества преимущественно по направлению к подложке. При этом необходим достаточно глубокий вакуум, при котором исключаются столкновения молекул остаточного газа с молекулами вещества и рассеивание их потока на пути к подложке [10].

Нарушение углового и пространственного распределения распыленного материала является ключевым фактором при создании необходимой структуры пленки. Это означает, что адатомы будут способны диффундировать по поверхности подложки и зерен, а возникающая термически стимулированная подвижность атомов позволяет им объединяться в зародыши и формировать кристаллические острова [12–14]. В результате поверхностной диффузии каждый островок или зерно будет способно расти в соответствии с их кристаллическим габитусом. В данных условиях адатомы хотя и могут преодолевать диффузионный барьер, но не могут с помощью диффузии выйти из зерна или перейти от одного зерна к другому. Поэтому каждое зерно в структуре растет независимо от других до их соприкосновения. После соприкосновения зерен заполнение пространства между ними происходит независимо от энергичной бомбардировки. Это происходит из-за высокой подвижности адатомов. Вследствие этого островки остаются разделенными только границами зерен, что схематично представлено на рис. 2.

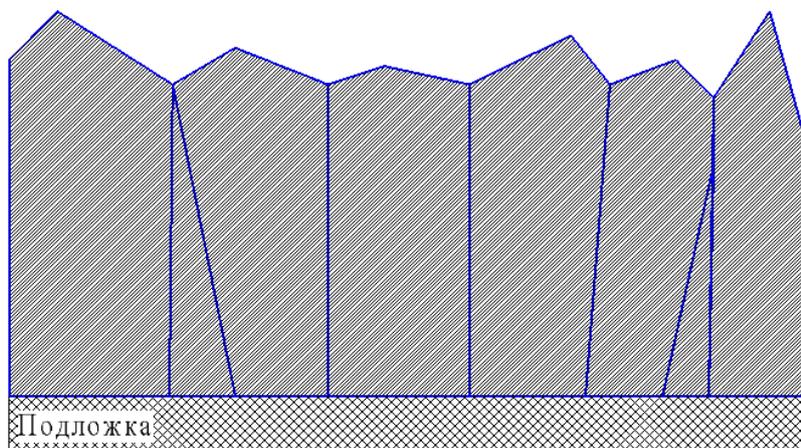


Рис. 2. Структура пленки с беспорядочной ориентацией вне плоскости

Исследование влияния различных видов металлизированных покрытий пьезоэлементов на основе метода магнетронного плазмохимического напыления позволило воспроизвести химический состав титана и никеля для высокотемпературной контактной группы. Нанесение пленки с помощью двухслойного покрытия, описанного в начале статьи, позволило получить структуру пленки, в которой все зерна огранены и ориентированы вне плоскости (рис. 2). Впоследствии получается высокотемпературная контактная группа, обеспечивающая стабильный омический и механический контакт.

Обработка напыления высокотемпературной контактной группы титан-никель до необходимой толщины пленки (рис. 3) производилась на ситалловых подложках с напыленным на них керметом, подложки подвергались очистке в парах изопропилового спирта непосредственно перед напылением.

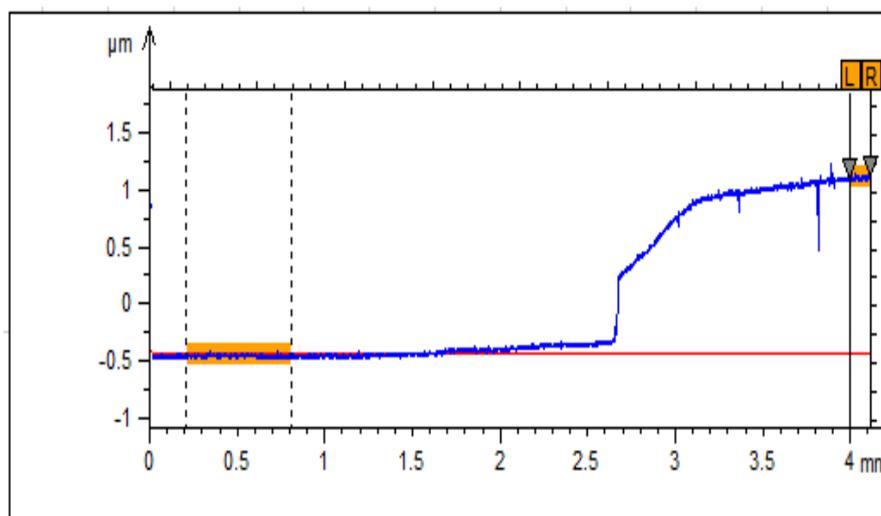


Рис. 3. Толщина пленки и профиль полученной структуры

Изготовлены экспериментальные макетные образцы на кремниевых пластинах, проведена проверка адгезии напыленной пленки методом разварки золотой проволоки. Адгезия составила более 10 г, соответствующая требованиям, предъявляемым заказчиком.

Библиографический список

1. Мельников, А. А. Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 29–34
2. Аверин, И. А. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетероструктуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления / И. А. Аверин, И. В. Волохов, Е. А. Мокров, Р. М. Печерская // Региональная научно-практическая конференция по проблемам и развитию наноиндустрии в Пензенской области 21 апреля 2008 г. : сб. докл. – Пенза : ФНПЦ ФГУП «НИИФИ», 2008. – С. 70–76.
3. Кикот, В. В. Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113.
4. Богуш, М. В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение / М. В. Богуш. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3. – 346 с.
5. Кривцов, В. А. Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. – Ленинград : Наука, 1982. – 167 с.
6. Pak, Ch. G. Investigation of the influence of shock activation on main properties of piezoelectric ceramics / Ch. G. Pak, A. V. Pryshchak, G. A. Koshkin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – P. 162–163.
7. Исследование возможностей повышения пьезоактивности высокотемпературных пьезоэлементов / А. И. Спицин, Д. А. Добрынин, А. М. Храмов, А. Г. Сегалла, А. А. Буш // Фундаментальные про-

блемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2015. – Ч. 3. – С. 27–31.

8. Nanao, M. Piezoelectric Properties of Bi₃TiNbO₉ – BaBi₂Nb₂O₉ Ceramics / M. Nanao, M. Hirose, T. Tsukada // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2001. – Т. 40, № 9S. – 5727 с.
9. Heywang, W. Tailoring of Piezoelectric Ceramics / W. Heywang, H. Thomann // *Annual Review of Materials Science*. – 1984. – Т. 14, № 1. – С. 27–47.
10. Минайчев, В. Е. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : учеб. пособие для ПТУ. Кн. 6. Нанесение пленок в вакууме / В. Е. Минайчев. – Москва : Высш. шк., 1989. – 110 с.
11. Чебурахин, И. Н. Коррекция температурной погрешности, аппроксимация градуировочных характеристик чувствительных элементов датчикообразующей аппаратуры с внутридатчиковой электроникой / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2015. – № 4 (14). – С. 32–41.
12. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
13. Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. А. Гурин, С. П. Евдокимов // *Измерительная техника*. – 2015. – № 6. – С. 49–52.
14. Датчики. Преобразователи. Системы. Каталог АО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.

References

1. Mel'nikov A. A., Tsybin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34. [In Russian]
2. Averin I. A., Volokhov I. V., Mokrov E. A., Pecherskaya R. M. *Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam i razvitiyu nanoindustrii v Penzenskoy oblasti 21 aprelya 2008 g.: sb. dokl.* [Regional scientific and practical conference on problems and development of nanoindustry in the Penza region on April 21, 2008: collection of reports]. Penza: FNPTs FGUP «NIIFI», 2008, pp. 70–76. [In Russian]
3. Kikot V. V., Malanin V. P., Shcherbakov M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2016, no. 3 (39), pp. 105–113. [In Russian]
4. Bogush M. V. *P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii. P'ezoelektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric sensors for extreme operating conditions. Piezoelectric instrumentation]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
5. Krivtsov V. A., Masagutov R. F. *Vysokotemperaturnye akusticheskie datchiki s organosilikatnoy izolyatsiey* [High-temperature acoustic sensors with organosilicate insulation]. Leningrad: Nauka, 1982, 167 p. [In Russian]
6. Pak Ch. G., Pryshchak A. V., Koshkin G. A. *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018)*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 162–163.
7. Spitsin A. I., Dobrynin D. A., Khramtsov A. M., Segalla A. G., Bush A. A. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation: materials of the international conference. scientific-technical Conf.]. Moscow, 2015, part 3, pp. 27–31. [In Russian]
8. Nanao M., Hirose M., Tsukada T. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001, vol. 40, no. 9S, 5727 p.
9. Heywang W, Thomann H. *Annual Review of Materials Science*. 1984, vol. 14, no. 1, pp. 27–47.
10. Minaychev V. E. *Tekhnologiya poluprovodnikovyykh priborov i izdeliy mikroelektroniki: ucheb. posobie dlya PTU. Kn. 6. Nanesenie plenok v vakuume* [Technology of semiconductor devices and microelectronics products: textbook for vocational schools. Book 6. Applying films in a vacuum]. Moscow: Vyssh. shk., 1989, 110 p. [In Russian]
11. Cheburakhin I. N., Nefed'ev D. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 32–41. [In Russian]
12. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
13. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S., Gurin S. A., Evdokimov S. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2015, no. 6, pp. 49–52. [In Russian]
14. *Datchiki. Preobrazovateli. Sistemy. Katalog AO «NIIFI»* [Sensors. Converters. The system. Catalog of JSC "NIIFI"]. Penza: Penzenskaya pravda, 2011, pp. 70–98. [In Russian]

Гулиева Дарья Александровна

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Чапанов Никита Сергеевич

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Неврюзина Тина Бакировна

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-технолог
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: tina_nevruzina@mail.ru

Gulieva Dar'ya Aleksandrovna

process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Chapanov Nikita Sergeevich

process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Nevryuzina Tina Bakirovna

mastergraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Гулиева, Д. А. Исследование свойств высокотемпературных электродов для пьезоэлементов /
Д. А. Гулиева, Н. С. Чапанов, Т. Б. Неврюзина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. –
2020. – № 1 (31). – С. 67–72. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-9.