

УДК 681.586.712.019.3

С. В. Тимаков, А. В. Хошев, Д. Е. Макушкин, А. С. Храмов

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК «ХРОМ-НИКЕЛЬ», СИНТЕЗИРОВАННЫХ РАСПЫЛЕНИЕМ ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

S. V. Timakov, A. V. Khoshev, D. E. Makushkin, A. S. Khramov

ANALYSIS OF THE PROPERTIES THIN-FILMS OF CHROME-NICKEL SYNTHESIZED BY SPRAYING FROM AN INDEPENDENT SOURCE

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предложен метод уменьшения температурной погрешности в металлопленочных датчиках давления. Целью работы является снижение негативного влияния температуры на чувствительный элемент датчиков давления. Стоит задача получения тензорезистивной пленки с минимальным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). *Материалы и методы.* Реализация процесса происходит путем магнетронного распыления из отдельных источников. При этом в качестве напыляемого вещества могут использоваться как чистые материалы, так и соединения и сплавы определенного содержания. Величина ТКС при этом сильно зависит от температуры, при которой происходит процесс напыления тензорезистивных пленок «никель-хром». *Результаты.* Предложен метод напыления тензорезистивных пленок на подложку для тонкопленочных чувствительных элементов, представляющий собой качественный подход для уменьшения ТКС под воздействием внешних факторов. *Выводы.* Предложенный метод напыления позволяет при практическом использовании получить максимальный технический эффект при решении технических задач по уменьшению ТКС в тонкопленочных датчиках давления. Показана конструктивность и практическая применимость данного метода и указаны перспективные пути его совершенствования.

A b s t r a c t. *Background.* A method of reducing the temperature error in metal-film pressure sensors (DMD). The aim is to reduce the negative impact of temperature on the sensor element (SE) pressure sensors. The goal is to produce piezo-resistive film with minimal temperature coefficient of resistance (TCR). *Materials and methods.* The process of implementation takes place by means of magnetron sputtering from separate sources. Thus as the sprayed material can be used as pure materials or alloys, compounds and specific content. The quantity of TCS thus strongly depends on the temperature at which the deposition process piezoresistive films «nickel-chrome». *Results.* We propose a method of spraying piezoresistive films on a substrate for thin-film sensing element, which is a qualitative approach to reduce TCS by external factors. *Conclusion.* The proposed method allows deposition in practical use to get the maximum technical effect in solving the technical problems to reduce the TCS in thin-film pressure sensors. To show structural and practical applicability of this method and indicates promising ways to improve it.

К л ю ч е в ы е с л о в а: температурная погрешность, микроэлектромеханическая система, диффузия, рентгено-флуоресцентный спектральный анализ.

К e y w o r d s: temperature error, the micro electromechanical systems, diffusion, x-ray spectral analysis.

При модернизации и технологическом развитии систем контроля и диагностики ракетно-космической техники одним из основных направлений является совершенствование технологии изготовления датчикообразующей аппаратуры с целью повышения ее качества и надежности.

Надежность и стабильность выходных параметров металлопленочных датчиков давления зависят от надежности и стабильности тензорезисторов мостовой схемы чувствительных элементов датчиков при воздействии внешних факторов (температура, давление, вибрация).

С целью снижения негативного влияния температуры на чувствительный элемент датчиков давления стоит задача получения тензорезистивной пленки с минимальным температурным коэффициентом сопротивления [1].

Широкие возможности получения пленок из различных соединений обеспечивает метод магнетронного распыления из отдельных источников. При этом в качестве материалов мишеней отдельных источников могут использоваться как чистые материалы, так и соединения и сплавы определенного содержания. Учитывая, что скорость распыления является линейной функцией мощности магнетронного разряда, регулируя мощность подаваемых на магнетронный распылитель импульсов питания, можно обеспечить различные скорости распыления мишеней. При скорости распыления 100 нм/мин и частоте следования импульсов питания 100 Гц толщина слоя, осажденного за один импульс, составит 0,016 нм, что существенно меньше толщины монослоя. Таким образом, при распылении различных материалов мишеней в осажденной на подложке пленке реализуется соединение или сплав, состав которого определяется режимами распыления отдельных компонентов [2].

Подложка расположена на карусельном подложкодержателе и при вращении проходит над магнетронными распылителями поочередно. При скорости вращения $\omega = 50 \text{ мин}^{-1}$ и скорости распыления 100 нм/мин за один оборот подложкодержателя на подложку осаждается слой 0,31 нм. После задания режимов распыления и включения источника питания магнетронных распылителей начинается вращение карусельного подложкодержателя и происходит процесс осаждения. Так как осаждающиеся на подложку атомы обладают достаточно высокой энергией, то происходит взаимная диффузия поочередно распыляемых материалов. Получаемые пленки имеют высокую однородность состава по толщине. Используя данный метод, получили тензочувствительные резистивные хромоникелевые пленки с различным содержанием компонентов. В качестве мишеней использовались хром и никель высокой чистоты. Контроль количественного состава компонентов в тонкопленочной гетероструктуре проводился путем рентгено-флуоресцентного спектрального анализа прибором *X-MET-3000TX* +. При этом использовалась специальная калиброванная настройка для контроля никелевых сплавов. Поскольку прибор предназначен для контроля массивных образцов, то для исследования состава были приготовлены образцы достаточно большой толщины на подложках известного состава, не содержащих никель и хром. Зависимость содержания компонентов от тока распылителей имеет вид, близкий линейному, предложенная технология обеспечивает получение пленок требуемого состава.

Результаты замеров толщины пленок свидетельствуют, что толщина полученной структуры существенно (в меньшую сторону) отличается от суммарной толщины пленок хрома и никеля, полученных при аналогичных режимах распыления.

Пленки, полученные совместным распылением при температуре подложки 200 °С, имеют меньшую толщину, чем пленки, полученные на подложках при температуре 20 °С. Полученные данные по толщине пленок позволяют сделать вывод о том, что пленка, формирующаяся при совместном напылении из отдельных источников по предложенной технологии, отличается по свойствам и характеристикам от многослойной пленки и соответствует твердому раствору хрома в никеле и никеля в хrome. На рис. 1 приведены характерные изображения поверхности двухкомпонентных пленок «никель-хром» при различном содержании компонентов. Анализ морфологии поверхности пленок, проведенный посредством атомно-силовой микроскопии, показал, что пленки с содержанием до 5 % хрома имеют структуру, характерную для никеля, с крупным размером кристаллита. При содержании хрома более 5 % размер кристаллита существенно уменьшается (рис. 1,а). Однако в пленках с содержанием хрома

25–40 % наблюдается изменение структуры формирующихся пленок с существенным увеличением размера зерна до 200 нм (рис. 1,б). При дальнейшем увеличении содержания хрома размер зерна снова уменьшается (рис. 1,в) и при содержании никеля менее 10 % практически полностью соответствует структуре пленок хрома.

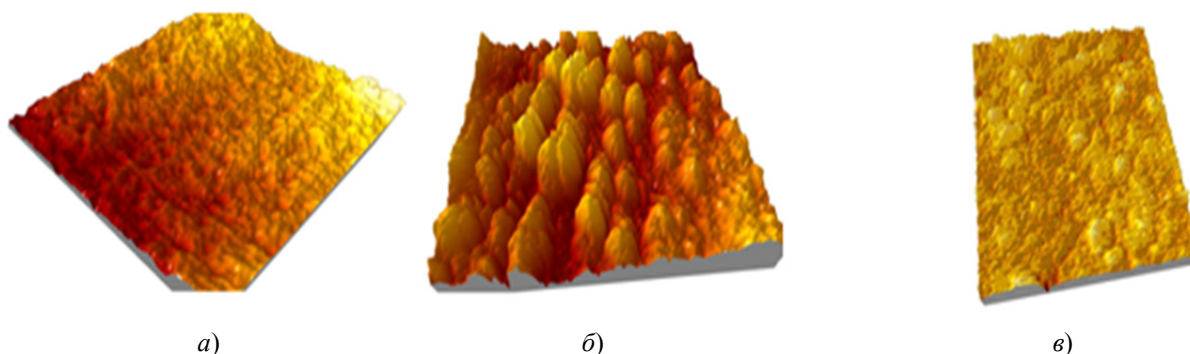


Рис. 1. Поверхности двухкомпонентной пленки:

- а – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 90 %, хром – 10 % ;
б – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 65 %, хром – 35 %;
в – поверхность двухкомпонентной пленки с содержанием компонентов: никель – 30 %, хром – 70 %

Уменьшение размера зерна пленки с увеличением содержания хрома происходит из-за изменения взаимодействия осаждающихся материалов с подложкой. При синтезе пленки за один оборот карусели на подложку осаждается достаточно малое количество атомов того или другого компонента: при токе распылителя 2 А – около 0,2 нм, которые не образуют сплошного покрытия. Атомы хрома, осажденные на подложку, становятся дополнительными центрами роста кристаллов. При этом создаются условия для формирования мелкозернистой структуры, соответствующей твердому раствору [3]. Температурный режим подложки в процессе осаждения на нее тонкопленочного покрытия влияет на параметры синтезированной пленки. Увеличение температуры способствует увеличению вероятности миграции осаждающихся атомов и формированию более крупнозернистой структуры из чистых элементов. При синтезе бинарных пленок увеличение температуры подложки способствует более равномерному смешению компонентов и увеличению их взаимной диффузии. Однако тенденция роста размера зерна сохраняется. На рис. 2 представлены фотографии структуры пленок состава никель – 30 %, хром – 70: полученные при температуре подложки 25 и 200 °С.

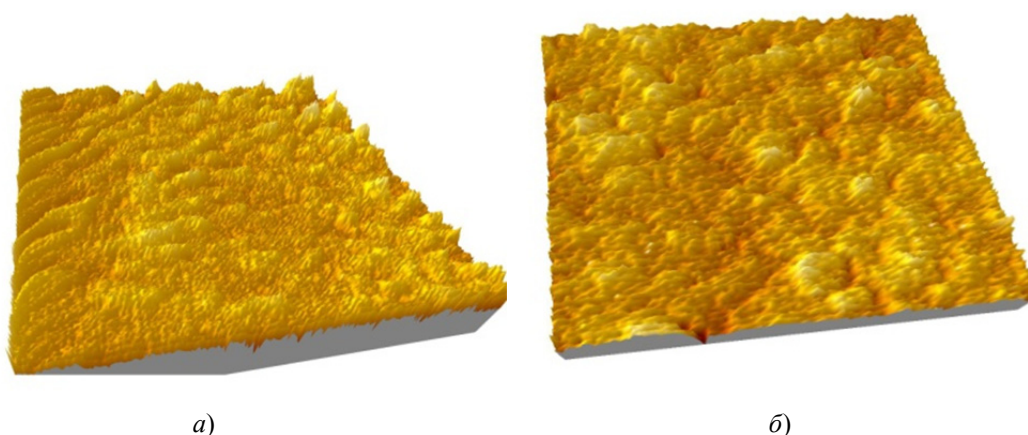


Рис. 2. Поверхность пленки с содержанием компонентов (никель – 30 %, хром 70 %):

- а – температура подложки при осаждении 25 °С; б – температура подложки при осаждении 200 °С

Для пленок, синтезированных методом совместного распыления из различных источников, был проведен замер ТКС в диапазоне температур от минус 70 до плюс 100 °С. Зависимости ТКС от состава представлены на рис. 3.

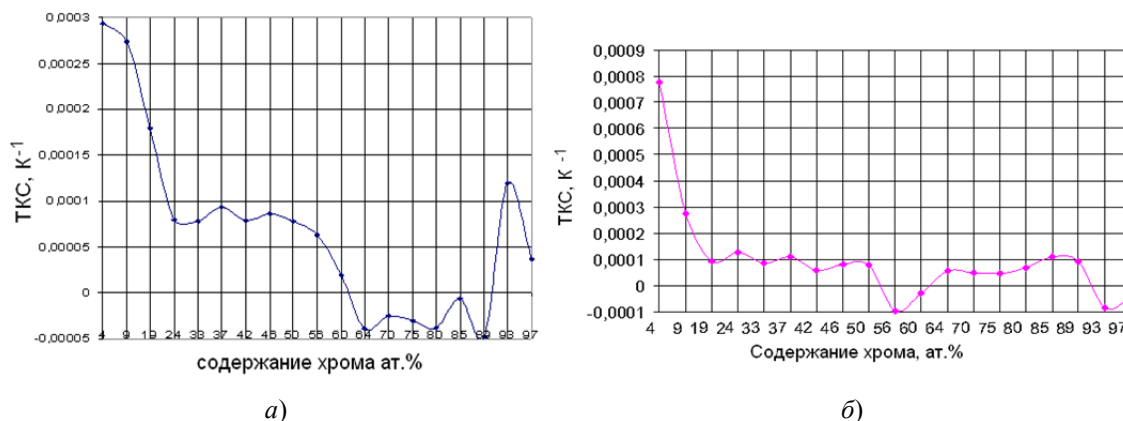


Рис. 3. Зависимость ТКС двухкомпонентных пленок «никель-хром» от состава:
 а – температура подложки при синтезе 25 °С; б – температура подложки при синтезе 200 °С

Анализируя представленные зависимости, необходимо отметить, что на обоих графиках наблюдается резкое снижение значений ТКС (практически на порядок) при увеличении содержания хрома в пленке от 0 до 10 %. При изменении содержания хрома от 15 до 50 % на обоих графиках наблюдается слабое изменение значения ТКС, которое соответствует $1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. При увеличении содержания хрома до 60 % происходит резкое снижение ТКС до отрицательных значений ($5\text{--}10 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). При дальнейшем увеличении содержания хрома до 90 % в пленке, синтезированной при 25 °С, ТКС сохраняет отрицательное значение и увеличивается до положительных значений при содержании хрома более 90 %. Для пленок, синтезированных при температуре 200 °С, при содержании хрома более 65 % наблюдается рост ТКС до положительных значений, соответствующих $0,5\text{--}1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а при содержании хрома более 90 % ТКС вновь приобретает отрицательное значение. Существенная зависимость характеристик пленок с содержанием хрома более 60 % от температурного режима подложки свидетельствует о нестабильности структуры пленки. В то же время она создает возможность регулирования значений ТКС путем подбора режима термообработки [4].

Синтезированные тензорезистивные пленки «никель-хром» с содержанием хрома 15–50 % характеризуются значением ТКС, слабо зависящим от состава и температуры подложки при осаждении. Стабильность характеристик делает эти двухкомпонентные пленки наиболее перспективными для применения в качестве резистивных и тензорезистивных элементов [5].

Тем не менее получение резистивных элементов с величиной ТКС, близкой к нулю, достаточно затруднительно, так как в области перехода через 0 характеристика резко изменяет свои значения. Использование резистивных элементов с градиентом состава по толщине дает возможность получения желаемого результата. На основании сделанного предположения был изготовлен резистивный элемент, 70 % толщины которого состояло из 50 % хрома, а 30 % толщины из 60 % хрома. Изменение состава обеспечивалось программным регулированием скорости распыления хромовой мишени. Полученные резистивные элементы имели значение ТКС $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Предложенная методика получения тонкопленочных элементов с градиентом состава по толщине позволяет расширить технологические возможности магнетронного распыления.

Таким образом, магнетронный метод распыления из отдельных источников позволяет получить тензорезистивные пленки с минимальным ТКС, что приводит к увеличению надежности и стабильности работы металлопленочных датчиков давления под воздействием внешних факторов.

Библиографический список

1. Двухканальная система управления технологическими режимами синтеза тензорезистивных пленок / С. В. Тимаков, И. Н. Чебурахин // Датчики и системы-2011 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : АО «НИИФИ». – С. 74–76.
2. Рентгено-флюороаресцентный анализатор сплавов на рентгеновской трубке X-MET-3000TA. Техническое описание.

3. Совершенствование тензорезисторных тонкопленочных датчиков давления / Е. А. Мокров, Д. В. Лебедев, В. П. Базаев, Е. В. Ефремов, И. А. Семина, П. А. Колчин // Мир измерений. – 2008. – № 4. – С. 41–46.
4. Метод уменьшения температурной погрешности в микроэлектромеханической системе датчика / Е. М. Белозубов, Н. Е. Белозубова, В. А. Васильев, Ю. А. Козлова // Современные научные исследования и инновации. – 2011. – № 8. – С. 15–23.
5. Белозубов, Е. М. Тонкопленочные микроэлектромеханические системы и датчики на их основе / Е. М. Белозубов, Н. Е. Белозубова, В. А. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 2. – С. 23–26.

Тимаков Сергей Владимирович

заместитель главного технолога,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Timakov Sergey Vladimirovich

deputy chief technologist,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Хошев Александр Вячеславович

кандидат технических наук, инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Khoshev Aleksandr Vyacheslavovich

candidate of technical sciences, engineer,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Макушкин Денис Евгеньевич

регулирующий радиоэлектронной аппаратуры
и приборов,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Makushkin Denis Evgen'evich

adjuster radio-electronic equipment and devices,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Храмов Андрей Сергеевич

регулирующий радиоэлектронной аппаратуры
и приборов,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Khramov Andrey Sergeevich

adjuster radio-electronic equipment and devices,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.712.019.3

Тимаков, С. В.

Анализ свойств тензорезистивных пленок «хром-никель», синтезированных распылением из независимых источников / С. В. Тимаков, А. В. Хошев, Д. Е. Макушкин, А. С. Храмов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 55–59.