

ключения от среднего значения может достигать 35 %. Такое большое отклонение параметров, по-видимому, обусловлено большой неравномерностью распределения электрического поля в слое SiN_x , вызванное его неравномерной толщиной и неоднородным составом, а также изменениями структуры нитрида после переключений.

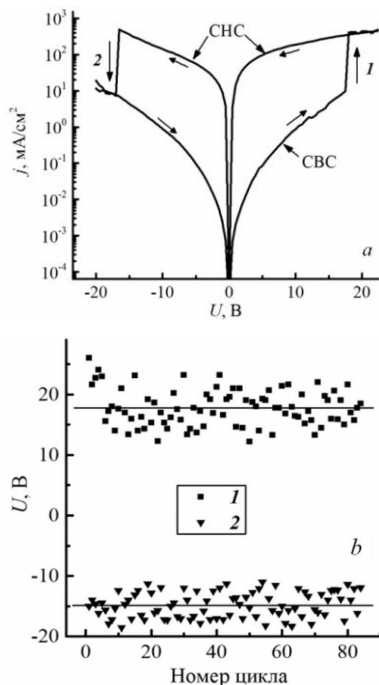


Рисунок 1 – ВАХ (a) и зависимость напряжения переключения от номера эксперимента для элемента памяти ITO/SiN_x/Si-p (b)

Установлено, что засветка структуры Si/SiN_x/ITO галогенной лампой приводит к увеличению тока прямой ветви ВАХ как в состоянии с высоким, так и в состоянии с низким сопротивлением. В режиме обогащения (положительный потенциал на Si) засветка не влияет на изменение тока.

Заключение. Обнаружен и исследован эффект резистивного переключения в структуре ITO/SiN_x/Si-p, в которой «запоминающий» слой представляет собой пленку SiN_x с градиентом соотношения Si/N по глубине. В CBC механизм проводимости описывается моделью Пула-Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками в SiN_x, тогда как CHC, по-видимому, обусловлено миграцией ионов In или Sn из контакта ITO в слой SiN_x – формированием металлического филамента. Для структуры ITO/SiN_x/Si также обнаружен эффект фотопереключения, который в сочетании с резистивным переключением может послужить началом разработки элементов ПЗУ, перепрограммируемых световым импульсом в структурах на основе нитрида кремния.

Литература

1. Charge transport mechanism in SiN_x-based memristor / A. A.Gismatulin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 115, № 25. – P. 253502.
2. Yen, T.J. High performance all nonmetal SiN_x resistive random access memory with strong process dependence / T. J. Yen, A. Chin, V. Gritsenko // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 1–9.

УДК 621.317

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Коробко Ю.С., Кравченко А.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования металлических болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров в целях расширения общего диапазона измерения температур и повышения точности измерений. Предложены методы измерений температуры. Даны рекомендации по проведению калибровки болометрических термометров и организации рабочего места калибровщика.

Ключевые слова: температура, измерение, терморезистор, болометр, диапазон измерения, метод измерения, погрешность измерения.

APPLICATION OF BOLOMETERS FOR ACCURATE TEMPERATURE MEASUREMENT WIDE RANGE

Korobko Yu., Kravchenko A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The issues of using metal bolometers as sensitive elements of thermistor thermometers in order to expand the overall temperature measurement range and increase the measurement accuracy are considered. Methods for measuring temperature are proposed. Recommendations for the calibration of bolometric thermometers and the organization of the workplace of the calibrator are given.

Key words: temperature, measurement, thermistor, bolometer, measurement range, measurement method, measurement error.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Термометрия возникла, развивалась, и будет развиваться по мере развития естествознания и необходимости измерений такой физической величины, как температура. Сегодня термометрия глубоко вошла во все сферы деятельности человека – начиная от элементарных бытовых вопросов измерения температуры до необходимости астрономических измерений. Нет ни одной области деятельности, где бы ни стоял вопрос ее измерения. Современные требования как к средствам измерения температуры, так и к точности ее измерения также высоки: диапазон измерения варьируется от сверхнизких температур (0–4,2 К), до сверхвысоких (выше 5000 К), а погрешность измерения может составлять сотые и тысячные доли градуса.

Широкий диапазон подлежащих измерению температур, разнообразие условий и объектов исследования обусловили многочисленность методов и средств измерения температуры.

В докладе анализируются возможные методы применения металлических болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров, а также преимущества их использования для точных измерений в широком диапазоне температур.

Известно, болометр – это устройство для обнаружения электромагнитного излучения, действие которого основано на изменении его электрического сопротивления при нагревании в результате поглощения энергии излучения [1, 3]. Болометр чувствителен ко всему спектру излучения, в том числе и инфокрасному (ИК). Наибольшее применение он нашел в астрономии, когда источником теплового излучения является, например, свет звезд [2]. Также болометры широко применяются в первичных преобразователях ваттметров диапазонов ВЧ и СВЧ. Однако свойство болометров изменять свое электрическое сопротивление при изменении собственной температуры и высокая чувствительность процесса позволяет использовать его в терморезисторных термометрах для точных измерений температур в довольно широком диапазоне.

По конструкции болометры бывают металлическими и полупроводниковыми [2, 3]. Металлический болометр представляет собой линейный отрезок проводника малого диаметра и длины. Проводник запаивают в стеклянный баллон, который, обычно, заполняют инертным газом. Часто болометры выполняются из тонкой пленки металла, нанесенной на подложку из стекла или слюды.

Электрическое сопротивление металлов зависит от их температуры и определяется соотношением

$$R_t = R_0[1 + \chi(t - t_0)],$$

где R_0 – сопротивление металла при температуре t_0 ; R_t – сопротивление металла при температуре t ; χ – температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\chi = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}.$$

Металлические болометры характеризуются простотой конструкции, высокой чувствительностью (можно фиксировать изменение температур до 10^{-7} градуса), низким уровнем шумов, невысокими производственными затратами. Характеристики металлических болометров определяются свойствами используемого металла (платина, золото, никель и др.) и его размером. Их активные элементы имеют высокие физико-химические свойства, обладают стабильностью параметров и способны работать в широком диапазоне температур (от -260 °С до $+860$ °С для платины), обеспечивая при этом высокую точность. Быстродействие болометров может составлять единицы наносекунд. Недостатками металлических болометров являются зависимость их чувствительности от длины проводника активного элемента и относительная дороговизна (стоимость активного элемента – платины, золота и др.).

Использование полупроводниковых болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров не рассматривалось. Несмотря на их большую разновидность и относительную дешевизну их применение ограничено небольшими температурными диапазонами применения, что затрудняет реализацию широкодиапазонного термометра.

В докладе проведен анализ возможных методов применения металлических болометров для точных измерений температур и даны рекомендации по их применению. Наиболее приемлемыми методами, обеспечивающими высокую точность измерения температур, являются мостовые методы. При использовании мостов постоянного тока наилучшим методом с точки зрения точности, несмотря на некоторую трудоемкость, является метод измерения с помощью «балансного (уравновешенного) моста». С точки зрения быстродействия наиболее приемлемым является метод измерения с помощью «разбалансного (неуравно-

вешенного) моста». Данные методы измерений широко описаны в литературе, например в [4].

Кроме того, в докладе даны рекомендации по организации и проведению работ связанных с калибровкой средств измерений температуры, использующих в качестве чувствительных элементов металлические болометры. Рекомендации могут быть использованы для описания методик (методов) калибровки, организации рабочих мест для проведения калибровки, а также для подготовки нормативно-технической документации по калибровке указанных средств измерения температуры.

УДК 620.179.142

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Крень А.П., Гнутенко Е.В., Кутепов А.Ю., Протасеня Т.А.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Обоснована возможность применения магнитного пондеромоторного метода для оценки качества нанесения толстослойных никелевых покрытий на детали и сборочные единицы космической техники. Основными определяемыми показателями качества выступают толщина покрытия и равномерность распределения внутренних напряжений.

Ключевые слова: внутреннее напряжение, контроль, никелевые покрытия, магнитный пондеромоторный метод.

ESTIMATION OF THICKNESS AND INTERNAL STRESS IN NICKEL COATINGS

Kren A., Hnutsenka Y., Kutsepau A., Pratasenia T.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The possibility of using the magnetic ponderomotive method for assessing the quality of deposition of thick-layer nickel coatings on parts and assembly units of space technology has been substantiated. The main determinable indicators of quality are the thickness of the coating and the uniformity of the distribution of internal stresses.

Key words: internal stress, control, nickel plating, magnetic ponderomotive method.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

В настоящее время нанесение различных функциональных покрытий на поверхность деталей и сборочных единиц космической техники с целью придания им требуемых свойств является одной из важнейших операций для обеспечения их надежной работы. Одними из основных показателей качества покрытий являются такие характеристики, как толщина (непосредственно влияет на массогабаритные характеристики) и наличие внутренних напряжений (которые могут привести к разрушению покрытия). В этой связи разработка современной аппаратуры и технологии контроля толщины и оценки распределения напряжений в таких специальных покрытиях, как толстослойные никелевые, обладающих улучшенными коррозионными, теплозащитными и износостойкими свойствами, представляется весьма актуальной задачей.

Литература

1. Волков, Ю. В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / Ю. В. Волков. – СПб : ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 89 с.
2. Датчики: справочное пособие / В. М. Шарапов [и др.]. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин : учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : Издательство ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
4. Измерительная техника. Электрорадиоизмерения : учебное пособие / Заневский, Д.В. [и др.]. – Минск : ВА РБ, 2013. – 159 с.

Влияние различных технологических факторов (температуры, скорости прокачки электролита и др.) при оценке качества нанесения покрытий можно условно свести к одному показателю магнитных свойств (например, магнитной проницаемости), поскольку все они изменяют внутренние напряжения в покрытии, которые, в свою очередь, оказывают влияние на магнитные свойства. В тоже время известно [1], что наиболее сильное влияние внутренних напряжений на магнитные свойства металлов наблюдается в слабых магнитных полях, уменьшаясь при воздействии сильных полей. Поэтому наиболее приемлемыми методами контроля толщины никелевых покрытий являются методы, в которых используются сильные поля, а оценку изменения напряженного состояния наиболее оптимально проводить в полях малой величины.