

дении испытаний поток оптического излучения составил  $4,0 \pm 0,1$  кВт/м<sup>2</sup>, контроль потока оптического излучения в диапазоне 0,1–14,0 мкм осуществлялся с помощью балансомера Пеленг СФ-06, контроль теплового потока осуществлялся с помощью измерителя плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ4.03/5 «Поток». Оптические характеристики наноструктурированных покрытий и элементов датчика были определены с помощью ИК Фурье спектрометра Nicolet Nexus 670 (компания Thermo, США), рис. 3.

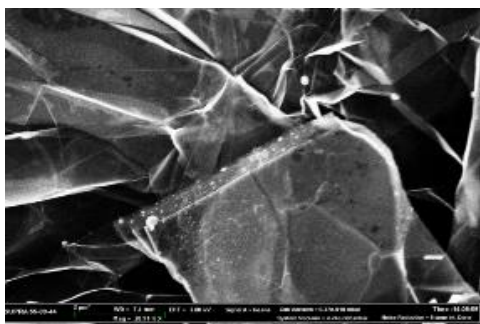


Рисунок 3 – Характерный вид топологии наноструктурированного диэлектрического покрытия

Для увеличения коэффициента поглощения оптического абсорбера в видимой и ближней ИК области спектра было предложено использовать структуры из неупорядоченных углеродных нанотрубок на поверхности чувствительных элементов и неструктурированный графен, дефектные структуры в котором обеспечивают множественные дискретные графен-плазмонные резонансы с большим относительным частотным интервалом. Терагерцовые устройства привлекают все большее внимание благодаря уникальным свойствам излучения в диапазоне 0,1–10 ТГц, которые имеют сходство как с микроволновым, так и с дальним инфракрасным диапазоном. Традиционно в этой области, металлические метаматериалы

являются ключевыми компонентами большинства конструкций абсорберов оптического излучения, как селективных, так и двухдиапазонных и широкополосных. Выбор графена в качестве базового материала абсорберов терагерцового диапазона связан с высокой подвижностью носителей заряда в графене. Кроме того возможна реализация абсорберов на основе графена в виде метаматериалов (например, типа такие как трехслойных структур металл-диэлектрик-графен [4, 5] и метаповерхностей типа многослойного графена на диэлектрике [6, 7] на поддерживающем диэлектрическом слое.

Предложенные решения позволяют увеличить чувствительность и оптимизировать спектральный диапазон термоэлектрических многоэлементных МЭМС датчиков оптического излучения.

#### Литература

1. Геращенко, О. А. Основы теплотрии / О. А. Геращенко. – Киев: Наукова думка, 1971. – 191 с.
2. Rogalski, A. Infrared Detectors / A. Rogalski. – New York : Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
3. Review of micromachined thermopiles for infrared detection / A. Graf, [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2007. – Т. 18, № 7. – P. R59–R753.
4. Amin, M. An ultra-broadband multilayered graphene absorber / M. Amin, M. Farhat, H. Bağcı // Optics Express. – 2013. – № 21. – P. 29938–29948.
5. Wang, Z. Ultra-multiband absorption enhancement of graphene in a metal-dielectric-graphene sandwich structure covering terahertz to mid-infrared regime / Z. Wang, Y. Hou // Optics Express. – 2017. – № 25. – P. 19185–19194.
6. Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz / B. Wu [et al.] // Scientific Reports. – 2014. – №4.
7. A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial / R. Alaei [et al.] // Optics Express. – 2012. – № 20. – P. 28017–28024.

УДК 621.382.33

### МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ЗОНД-ОБРАЗЕЦ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Самарина А.В.<sup>1</sup>,  
Петлицкий Н.Н.<sup>2</sup>, Мухуров Н.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

<sup>3</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Определение величины зазора зонд-образец в измерительной системе на основе зонда Кельвина может осуществляться оптическими методами с использованием независимого волоконно-оптического датчика либо электрическими методами на основе анализа особенностей самого измерительного сигнала. Основным преимуществом электрических методов контроля зазора зонд-образец является независимость результатов измерений от оптических свойств контролируемой поверхности.

**Ключевые слова:** контактная разность потенциалов, зонд Кельвина, стабилизация зазора.

METHODS OF AUTOMATIC DEFINITION AND STABILIZATION OF PROBE-TO-SAMPLE GAP IN A KELVIN PROBE MEASUREMENT SYSTEM

Tyavlovsky A.<sup>1</sup>, Zharin A.<sup>1</sup>, Pantsialeuy K.<sup>1</sup>, Svistun A.<sup>1</sup>, Samarina A.<sup>1</sup>, Pyatlitski A.<sup>2</sup>, Mukhurov M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company

<sup>3</sup>SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”

Minsk, Belarus

**Abstract.** The probe-to-sample gap in a Kelvin probe-based measurement system could be determined either by optical methods using an independent fiber-optic sensor or by electrical methods based on an analysis of the peculiarities of the measuring signal itself. The main advantage of electrical methods is that the measurement signal is independent of the sample’s surface optical properties.

**Key words:** Contact Potential Difference, Kelvin Probe, Gap Stabilization.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

При измерениях контактной разности потенциалов (КРП) или относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) по методу Кельвина-Зисмана чувствительный элемент измерительного преобразователя (зонд Кельвина) располагается на некотором расстоянии  $d$  от поверхности исследуемого объекта. Измеряемая величина КРП  $V_{CPD}$  соответствует выражению

$$V_{CPD} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{e}, \quad (1)$$

где  $\Phi_1, \Phi_2$  – значения РВЭ зонда Кельвина и исследуемой поверхности, соответственно;  $e$  – элементарный заряд (заряд электрона).

В случае электрофизически однородной поверхности, как следует из выражения (1), результат измерения не будет зависеть от величины зазора зонд-образец  $d$ . В то же время, для неоднородной поверхности, содержащей участки с различными значениями РВЭ, измеряемые значения КРП будут изменяться с изменением величины зазора вследствие проявления краевых эффектов (рис. 1). Это объясняется известным свойством зонда Кельвина усреднять значения КРП в пределах области чувствительности зонда, размеры которой изменяются при изменении зазора, что приводит к изменению доли площади, занимаемой участками с различными значениями РВЭ, в пределах этой области. Отсюда следует необходимость контроля и поддержания на некотором постоянном уровне величины зазора зонд-образец, причем для повышения пространственной разрешающей способности измерений величина зазора должна быть минимальной, предпочтительно менее поперечных размеров (диаметра) чувствительного элемента [1].

Контроль величины указанного зазора может осуществляться оптическими либо электрическими методами. Учитывая малую величину контролируемого зазора (порядка 0,1–0,3 мм), контроль оптическими методами может осуществляться с использованием волоконно-оптических датчиков приближения. Принцип действия таких датчиков основан на освещении

поверхности образца через один (передающий) волоконно-оптический световод и регистрации освещенности поверхности в области чувствительности второго (приемного) волоконно-оптического световода. Вследствие того, что световой пучок на выходе волоконно-оптического световода распространяется в виде конуса, площадь освещенного участка в области чувствительности приемного световода будет изменяться при изменении величины зазора датчик-поверхность (рис. 2).

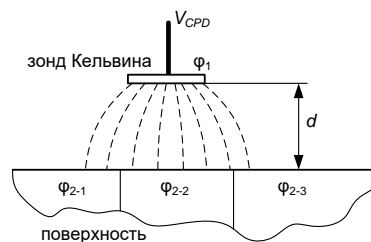


Рисунок 1 – Формирование измерительного сигнала зонда Кельвина в случае электрофизически неоднородной поверхности

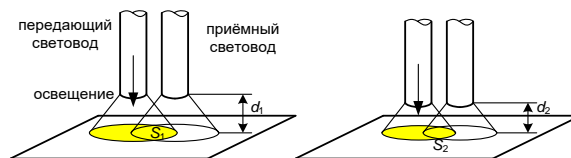


Рисунок 2 – Принцип действия волоконно-оптического датчика приближения

Волоконно-оптические датчики характеризуются высокой чувствительностью и разрешающей способностью; в частности, серийно выпускаемый датчик МП125Н обеспечивает разрешающую способность до 0,25 мкм. В то же время диапазон измерения волоконно-оптических датчиков ограничен небольшой величиной (0–2 мм для МП125Н), причем за пределами данного диапазона характеристика чувствительности датчика инвертируется, что приводит к формированию ложных показаний. Уровень выходного сигнала зависит от оптических свойств (коэффициентов отражения и рассеяния) контролируемой поверхности, что требует калибровки датчика в соответ-

ствии с особенностями конкретного объекта исследования. Также использование оптических методов контроля зазора зонд-образец затруднено или невозможно при наличии на исследуемой поверхности оптически прозрачных покрытий.

Электрические методы контроля основаны на использовании для определения величины зазора зонд-образец дополнительных параметров выходного сигнала самого зонда Кельвина, рассматриваемого в данном случае как многопараметрический сигнал. Комплексно-гармонический анализ выходного сигнала вибрирующего зонда Кельвина показывает, что в случае гармонического закона модуляции зазора зонд-образец отношение амплитуд первой и второй гармоник результирующего измерительного сигнала находится в прямой зависимости от коэффициента модуляции зазора  $m$  [2], что при известном значении амплитуды вибрации  $d_m$  позволяет определять среднюю величину зазора  $d_0$  на основании анализа амплитудного спектра сигнала. Такой анализ должен выполняться в реальном масштабе времени что может быть реализовано на основе цифровых методов обработки сигналов с использованием быстродействующих алгоритмов. В настоящее время в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ осуществляется разработка и отладка цифрового измерительного преобразователя на основе динамического конденсатора, использующего для определения гармонического состава сигнала алгоритма быстрого преобразования Фурье. Результаты исследований демонстрируют возможность определения амплитуд первой и второй гармоник сигнала с достаточной для определения и стабилизации зазора зонд-образец точностью на основании дискретизированных отсчетов 4 периодов измерительного сигнала при частоте дискретизации не менее 250 ksp/s. С учетом отсутствия необходимости определения фазового спектра сигнала, указанные амплитуды могут определяться также по методу быстрого преобразования Хартли [3], обеспечивающего более высокую производительность вычислений.

Помимо анализа гармонического состава сигнала, автоматическое определение и стабилизация зазора зонд-образец может осуществляться

на основе анализа угла наклона компенсационной зависимости цифрового зонда Кельвина, работающего в режиме большого сигнала [4]. Данный метод требует минимум двукратных измерений сигнала при двух различных значениях напряжения компенсации, что увеличивает время выполнения измерений, и потому не может быть рекомендован для применения в быстродействующих сканирующих системах. В то же время, такой метод контроля требует значительно меньшего объема вычислений и может быть реализован с использованием сравнительно маломощного сигнального процессора.

Основным преимуществом электрических методов контроля зазора зонд-образец является независимость результатов измерений от оптических свойств контролируемой поверхности, что является необходимым условием при создании универсальных средств неразрушающего контроля, пригодных для исследования поверхностей различной физической природы.

#### Литература

1. Тявловский, А. К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина / А. К. Тявловский, // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1. – С. 30–36.
2. Tyavlovsky, A. Complex-harmonic analysis of electric circuit containing a vibrating-plate capacitor / A. Tyavlovsky, A. Zharin // Informatyka, Automatyka, Pomiaru w gospodarce i ochronie srodowiska. – 2012. – № 1. – P. 32–35.
3. Цифровая обработка сигнала сканирующего зонда Кельвина на основе быстрого преобразования Хартли // А.К. Тявловский [и др.] / Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. Седьмой междунар. науч.-техн. конф. ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 219–223.
4. Метод управления процедурой приближения и слежения за изменением зазора отсчетного электрода цифрового зонда Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали міжнарод. наук.-техн. конф., 07–08 грудня 2017 р. / Є.І. Сокол (голова оргком.) – Х. : ФОП Мезіна В., 2017. – С. 180–181.

УДК 004.384

#### ОСНАЩЕНИЕ УМНОЙ АУДИТОРИИ

Тявловский К.Л., Свистун А.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Микитевич В.А.,  
Пантелеев К.В., Тявловский А.К.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрен пример оснащения учебной аудитории программными и аппаратными средствами с целью повышения эффективности образовательного процесса и формирования новых функциональных возможностей. Использование цифровых технологий в оснащении умных аудиторий обеспечивает непрерывность образовательного процесса и организацию дистанционного обучения, интеграцию образовательного процесса с другими учебными заведениями.

**Ключевые слова:** умная аудитория, цифровые технологии, образование, обучение.