

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ МЭМС СЕНСОРАХ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. А. Филатов¹, И.А. Таратын², Ю.М.Кернасовский², Е.В. Батырев¹, М.Н. Долгих¹,
О.С. Филатова¹, Н.А. Гавриленко

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», г. Минск, Беларусь

В современных системах регистрации оптического и терагерцового излучения эффективно используются многоэлементные датчики выполненные по МЭМС технологии, с чувствительными элементами в виде многоэлементных планарных термопар, обеспечивающей высокое временное разрешение и малую инерционность при низком уровне шумов [1-3]. Успехи в развитии этого направления обусловлены результатами разработок технологических процессов формирования микро- и наноразмерных мембран на кремниевой подложке с использованием процессов анизотропного травления кремния, рисунок 1-2.

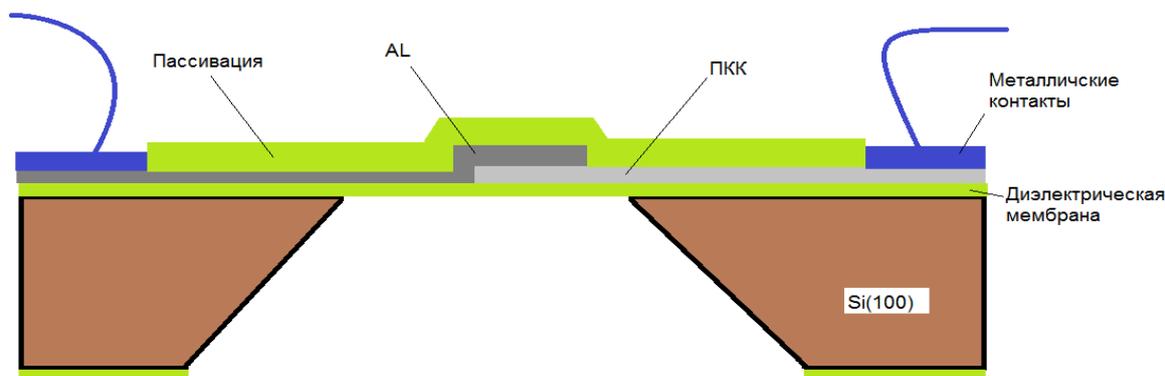


Рисунок 1. Базовая конструкция МЭМС датчика на основе термоэлектрической пары алюминий-поликристаллический кремний (ПКК) на поддерживающей диэлектрической мембране из нитрида кремния толщиной менее 1 мкм

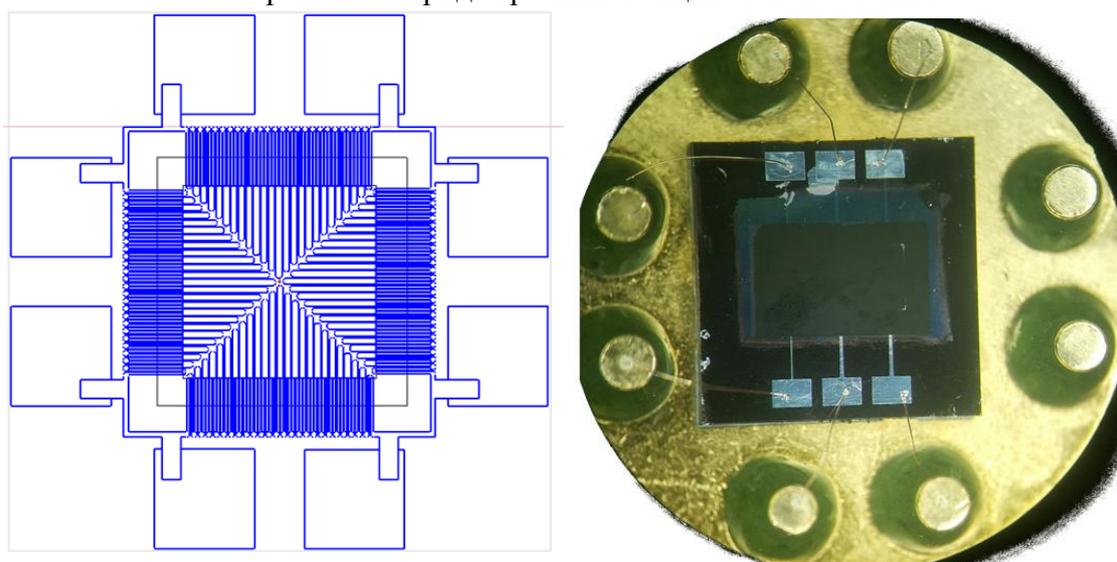


Рисунок 2. Базовая топология и внешний вид кристалла МЭМС датчика с абсорбером до герметизации

Оптимизация конструкции датчика выполнена на основе результатов численного моделирования теплообмена в элементах датчика с использованием пакета ELCUT (ООО «Тор», РФ), рисунок 3.

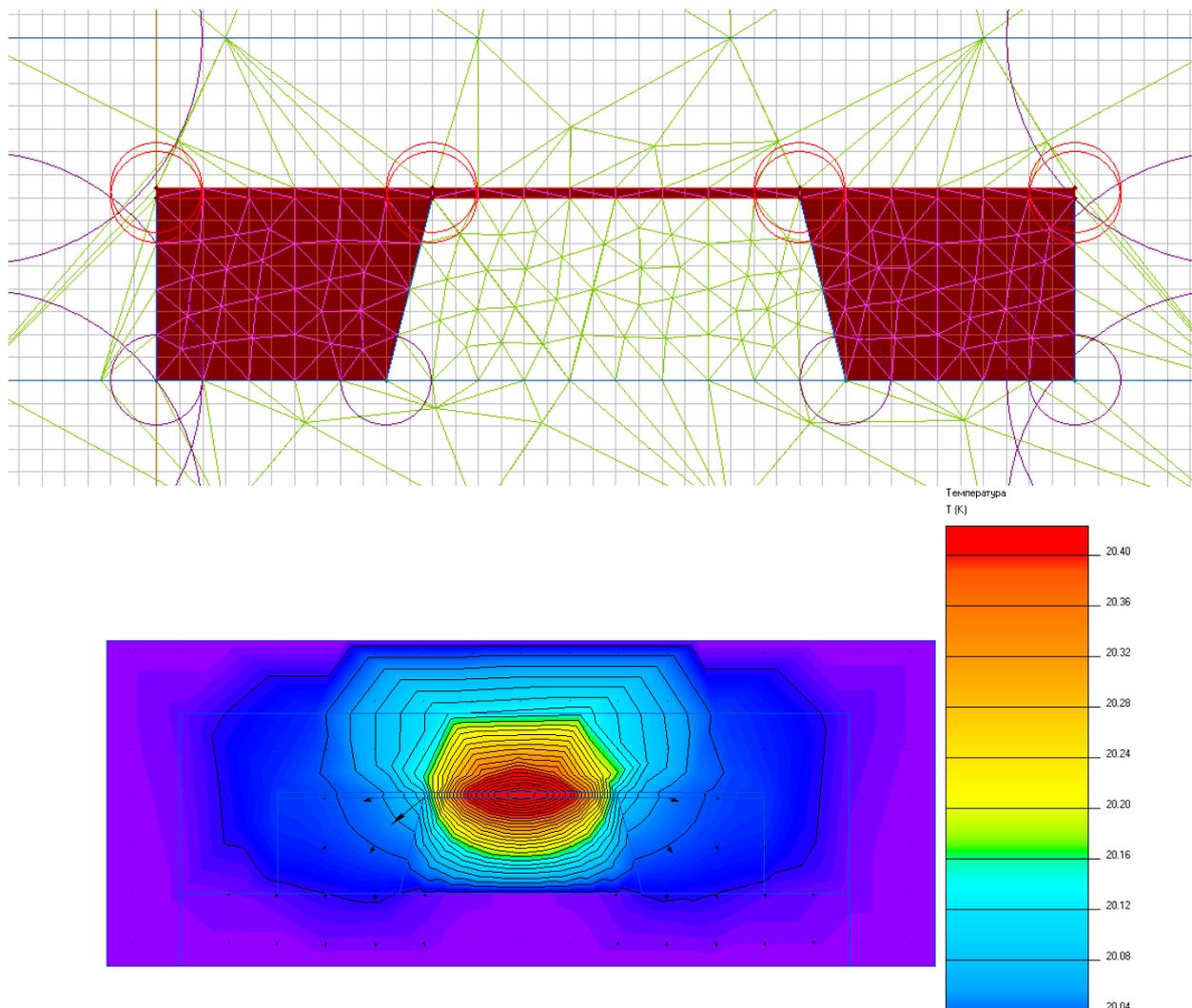


Рисунок 3. Фрагмент расчетной сетки и результаты расчета при моделировании нестационарного теплообмена кристалла МЭМС датчика с абсорбером в программном комплексе ELCUT

Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, вследствие малой толщины рабочих слоев и диэлектрической мембраны сама конструкция чувствительных элементов практически не поглощает оптическое излучение в видимом, ИК и УФ диапазоне, рисунок 4, что требует применения специальных поглощающих слоев (абсорбера) для увеличения чувствительности датчика. Кроме того увеличение коэффициента поглощения оптического абсорбера снижает рассеяние и пропускание излучения конструкцией датчика, что позволяет снизить уровень отраженного излучения в конструкции датчика и увеличить его чувствительность и воспроизводимость измерений.

Для проведения испытаний использовался специализированный стенд для измерения характеристик датчика теплового потока. При проведении испытаний поток оптического излучения составил $4,0 \pm 0,1$ кВт/м², 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). Спектры пропускания и отражения поддерживающей наноструктурированной диэлектрической мембраны датчика теплового потока приведен на рисунке 4-5, характерная топология наноструктурированной поверхности мембраны – на рисунке 6.

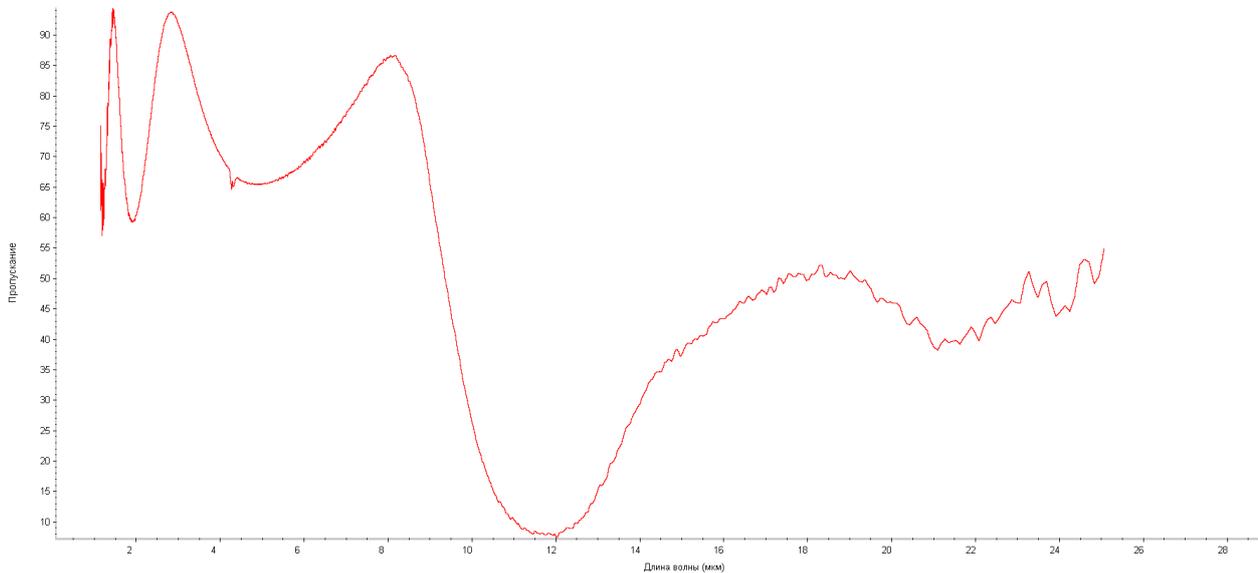


Рисунок 4. Спектр пропускания мембраны (интегральный коэффициент пропускания мембраны в диапазоне 0,1-14,0 мкм равен 0,75)

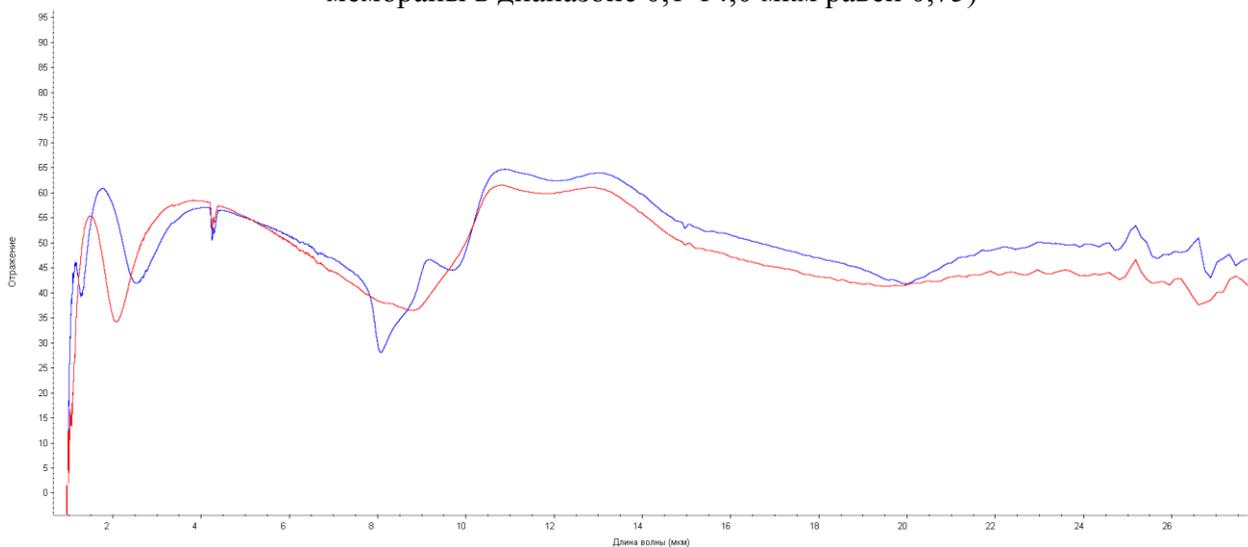


Рисунок 5. Спектр отражения оптического излучения термоэлектрического чувствительного элемента (спектр отражения оптического излучения тестового чувствительного элемента без диэлектрического покрытия – красный, спектр отражения оптического излучения тестового чувствительного элемента с диэлектрическим покрытием – синий) Интегральный коэффициент отражения тестового чувствительного элемента с наибольшей площадью датчика теплового потока с диэлектрическим покрытием в диапазоне 0,1-14,0 мкм равен 0,75.

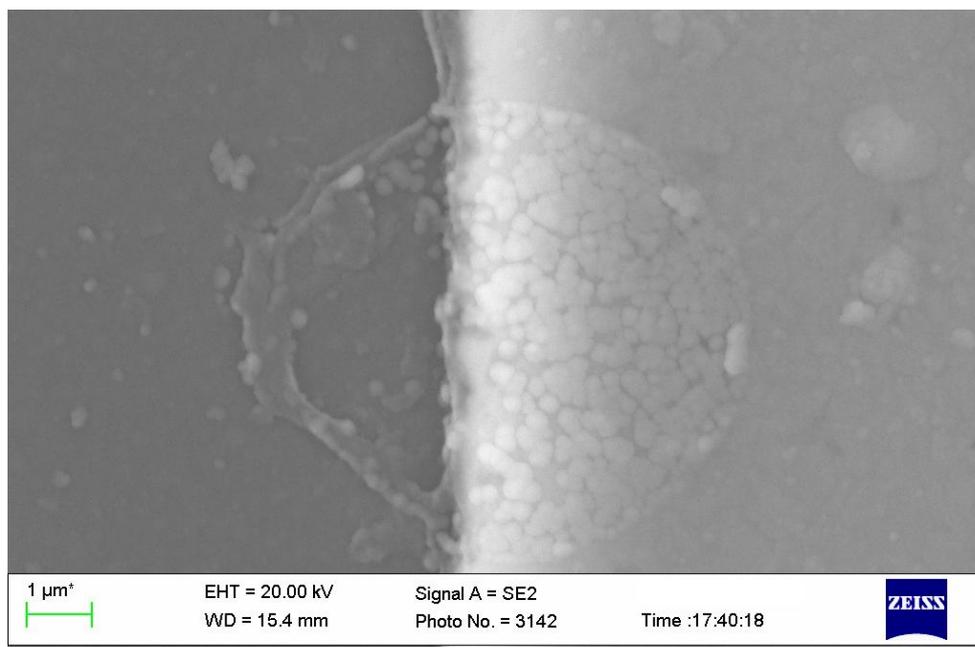


Рисунок 6. Характерный вид топологии наноструктурированного диэлектрического покрытия

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, рисунок 7. Спектры пропускания датчика с поглощающим абсорбером приведены на рисунках 7-8.

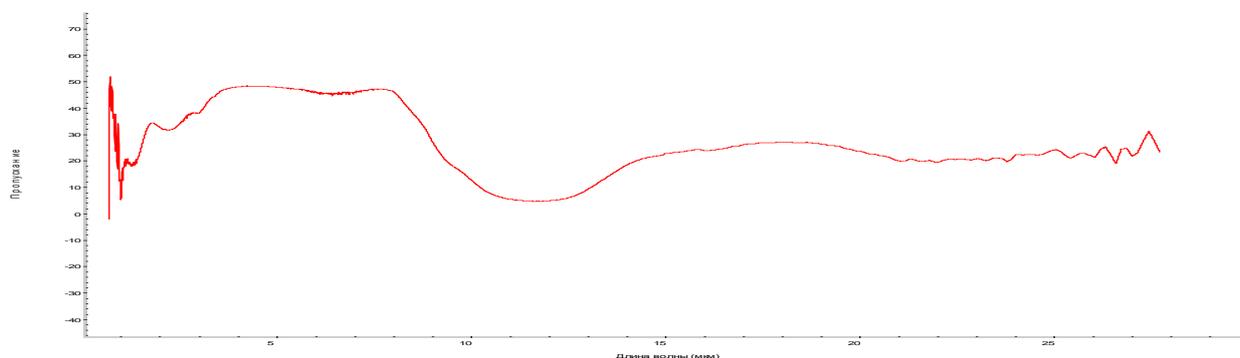


Рисунок 7. Спектр пропускания абсорбера датчика с поглощающим покрытием (интегральный коэффициент пропускания T в диапазоне 0,1-14,0 мкм равен 0,26).

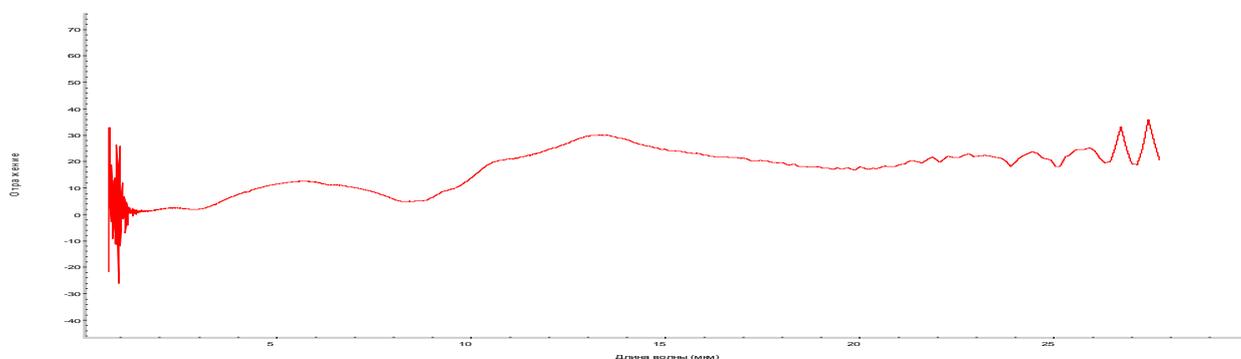


Рисунок 8. Спектр отражения оптического излучения тестового чувствительного элемента датчика теплового потока с поглощающим покрытием (0,57 в диапазоне 0,1-14,0 мкм).

Для расширения области работы на терагерцовый диапазон было предложено использовать неструктурированный графен, дефектные структуры в котором обеспечивают множественные дискретные графен-плазмонные резонансы с большим относительным частотным интервалом, рисунок 9-11. 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.

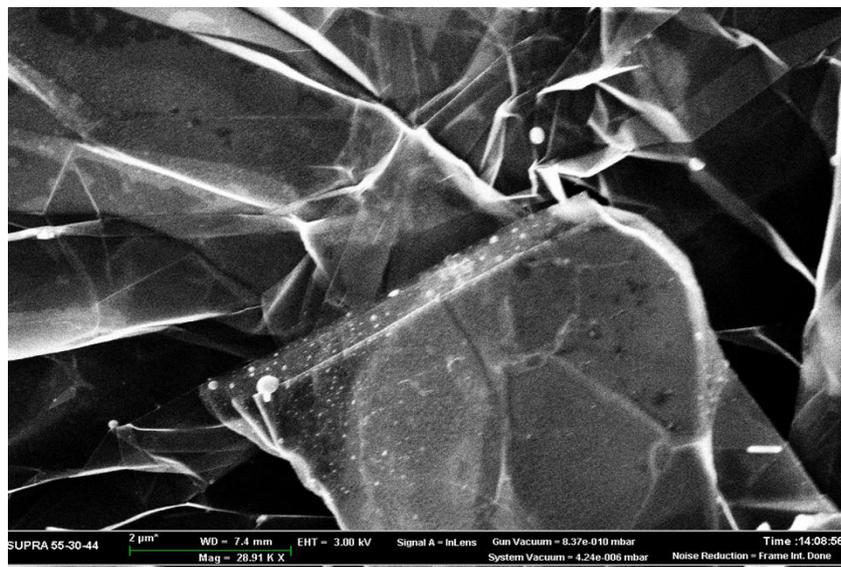


Рисунок 9. Характерный вид топологии наноструктурированного абсорбера из многослойного графена на диэлектрической подложке

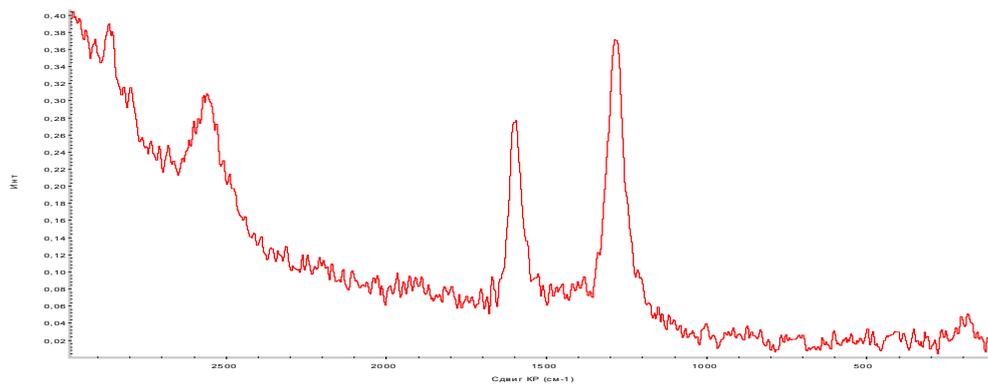


Рисунок 10. Характерный Рамановский спектр поверхности абсорбера с несовершенной структурой графена

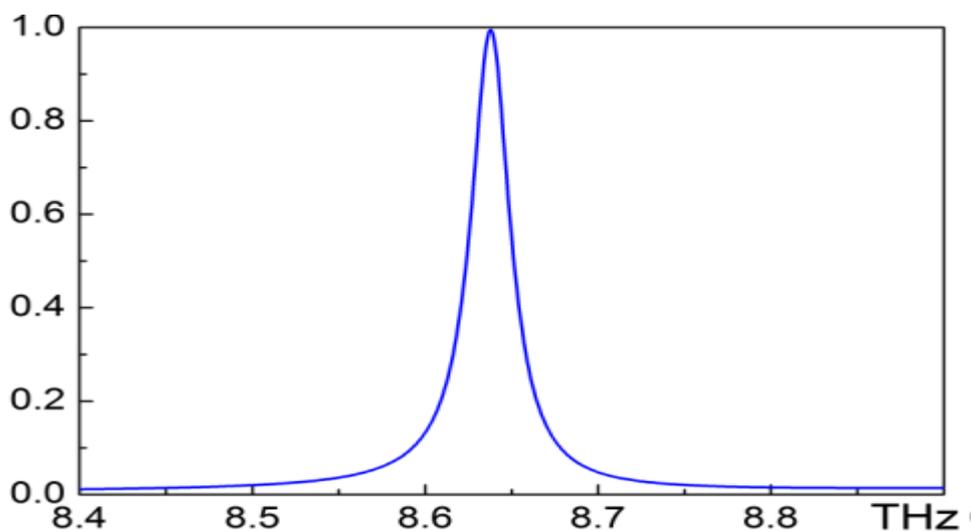


Рисунок 11. Расчетное положение пика поглощения монослоя графена на диэлектрической наноструктурированной подложке с металлическим подслоем .

Анализ характера поглощения терагерцового излучения графеном на диэлектрической подложке, выполненный с помощью пакета Lumerical показывает возможность резонансного режима поглощения в терагерцовом диапазоне [8], причем положение пиков спектров поглощения может быть настроено только путем изменения уровня Ферми графена и изменением числа слоев неструктурированного графена, формируемого на диэлектрической подложке.

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

Литература.

1. Герашенко О.А. Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971. 191 с.
2. Rogalski A. Infrared Detectors. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 2000
3. Graf A, Arndt M, Sauer M, et al. Review of micromachined thermopiles for infrared detection. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(7): R59–R753.
4. Amin, M., Farhat, M. & Bağcı, H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber. *Optics Express* **21**, 29938–29948 (2013).
5. Wang, Z. & Hou, Y. Ultra-multiband absorption enhancement of graphene in a metal-dielectric-graphene sandwich structure covering terahertz to mid-infrared regime. *Optics Express* **25**, 19185–19194 (2017).
6. Wu, B. *et al.* Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz. *Scientific Reports* **4**, 4130 (2014).
7. Alae, R., Farhat, M., Rockstuhl, C. & Lederer, F. A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial. *Optics Express* **20**, 28017–28024 (2012).
8. Andryieuski A., Lavrinenko A. V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach // *Opt. Express* **21**, 9144 (2013).