

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-180

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СТЕРОИДНЫХ ГОРМОНОВ*****APPLICATION OF TERAHERTZ METAMATERIALS FOR STEROID HORMONE DETECTION**Д. С. Устьянцева^{1,2}, М. Р. Конникова^{3,4}, О. П. Черкасова^{1,3}, Н. А. Николаев^{1,2}¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*²*Новосибирский государственный университет*³*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*⁴*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*D. S. Ustyantseva^{1,2}, M. R. Konnikova^{3,4}, O. P. Cherkasova^{1,3}, N. A. Nikolaev^{1,2}¹*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*²*Novosibirsk State University*³*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow*⁴*Lomonosov Moscow State University*

✉ d.ustyantseva@g.nsu.ru

Аннотация

Исследованы терагерцовые метаматериалы для детектирования стероидных гормонов кортизола и кортизона. Дизайн элементарной ячейки имеет форму модифицированного расщепленного кольца. Изучены сдвиги резонансных частот и амплитуды пропускания сенсоров в зависимости от количества гормонов. Рассчитаны основные показатели эффективности ТГц-метаматериалов и определены наиболее перспективные для дальнейшего применения.

Abstract

Terahertz split-ring metamaterials for the detection of cortisol and cortisone are investigated. Shifts in resonance frequencies and transmittance as a function of the hormone quantity are studied. The main performance indicators of THz metamaterials are calculated and the most promising ones for further application are determined.

Терагерцовое (ТГц) излучение (0,1–10 ТГц) [1] представляет особый интерес для биомедицинских исследований, поскольку в этом диапазоне лежат характерные резонансные частоты вращательных и низкочастотных колебательных мод многих биологически важных молекул [2]. Методы ТГц-спектроскопии позволяют распознавать биомолекулы быстрым, высокочувствительным и неразрушающим способом [3]. Применение ТГц-метаматериалов делает возможным повышение чувствительности спектроскопии при анализе биологических образцов [4]. Цель работы состояла в разработке методики детектирования стероидных гормонов кортизола и кортизона с помощью ТГц-метаматериалов.

В работе изучали два типа метаматериалов на основе расщепленных кольцевых резонаторов (*split-ring resonators*, SRR): поляризационно-нечувствительный сенсор на основе массива золотых резонаторов на кварцевой подложке (резонансная частота 1,53 ТГц) и поляризационно-чувствительный сенсор с алюминиевым проводящим слоем на кремниевой подложке (резонансные частоты 0,66, 1,52 и 1,87 ТГц) [5].

Эксперименты проводили с использованием импульсного ТГц-спектрометра в диапазоне 0,1–2 ТГц [6]. Растворы гормонов (кортизол и кортизон) готовили в этиловом спирте с концентрацией 1 мкг/мкл. Растворы наносили на поверхность сенсоров по 3 мкл с последующим измерением спектров пропускания после полного испарения растворителя.

Результаты показали, что поляризационно-нечувствительный сенсор с золотым покрытием (1,53 ТГц) демонстрирует линейное уменьшение поглощения и линейное увеличение резонансной частоты в зависимости от количества кортизола. В случае поляризационно-чувствительного сенсора с покрытием из алюминия наблюдалась нелинейная зависимость поглощения от количества кортизола для частоты 1,52 ТГц, описываемая уравнением Хилла. Оба сенсора демонстрировали селективность к кортизолу, практически не реагируя на присутствие кортизона.

* Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН (эксперимент), НИЦ «Курчатовский институт» (изготовление ТГц-метаматериалов) и МГУ им. М. В. Ломоносова (дизайн метаматериалов). В работе использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

© Д. С. Устьянцева, М. Р. Конникова, О. П. Черкасова, Н. А. Николаев, 2025

Сравнение основных параметров сенсоров показало, что ТГц-метаматериал с золотым покрытием обладает более высокой чувствительностью и добротностью по сравнению с метаматериалом с алюминиевым проводящим слоем, что делает его более перспективным для практического применения. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию дизайна метаматериала для повышения чувствительности сенсора к кортизолу и снижению предела обнаружения.

Литература

1. Царев М. В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: учеб. пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2011. С. 75.
2. Смирнова И. Н., Федулова Е. В., Назаров М. М., Черкасова О. П. Структурно-чувствительные изменения в спектрах терагерцового поглощения ряда кортикостероидных гормонов // Вестн. НГУ. 2010. Т. 5, № 4. С. 170–175.
3. Chen X., Lindley-Hatcher H., Stantchev R. I. et al. Terahertz (THz) biophotonics technology: Instrumentation, techniques, and biomedical applications // Chem. Phys. Rev. 2022. Vol. 3. Art. 011311.
4. Wang H., Zheng F., Xu Y. et al. Recent progress in terahertz biosensors based on artificial electromagnetic subwavelength structure // TrAC Trends Anal. Chem. 2023. Vol. 158. Art. 116888.
5. Синько А. С. и др. Мультиспектральный узкополосный источник терагерцового излучения на основе молекулярного кристалла RbAP и перестраиваемого фильтра из метаматериала // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 12. С. 13–28.
6. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // Автометрия. 2010. Т. 46, № 3. С. 110–117.