

# Многослойные интерференционные метаматериалы для субдискретизации и антиалиасной фильтрации в оптической терагерцовой спектроскопии

Н. А. Николаев<sup>1,2</sup>, А. А. Рыбак<sup>1,2</sup>, С. А. Кузнецов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В работе представлен дизайн узкополосных и низкочастотных квазиоптических терагерцовых (ТГц) фильтров, основанный на интерференционной многослойной структуре из метаповерхностей. Предложена и апробирована концепция, антиалиасной фильтрации и субдискретизации, для реализации которых ключевыми элементами являются низкочастотные и узкополосные фильтры соответственно. Оба подхода основаны на увеличении интервала выборки в соответствии с теоремой отсчетов при дискретизации волновой формы амплитуды ТГц поля. Апробация предложенной концепции в эксперименте показала выигрыш во времени измерения сигнала и снижение его шумов.

*Ключевые слова:* квазиоптические микроструктуры, фильтр низких частот, полосовой фильтр, терагерцовый диапазон, субдискретизация, антиалиасная фильтрация.

*Цитирование:* Николаев, Н. А. Многослойные интерференционные метаматериалы для субдискретизации и антиалиасной фильтрации в оптической терагерцовой спектроскопии / Н. А. Николаев, А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 107–109.

## Введение

В настоящее время системы импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии (ИТС) находят свое применение для решения ряда медицинских и промышленных задач: ранняя диагностика кожных заболеваний, включая меланому, и синдрома диабетической стопы [1]; диагностика глиобластомы головного мозга [2]; бесконтактная диагностика качества диэлектрических покрытий и полимерных изделий [3]. Многие приложения требуют визуализации исследуемого объекта. Поскольку в настоящее время отсутствуют чувствительные матричные детекторы данного диапазона, и средняя мощность генераторов в ИТС составляет < 1 мкВт, визуализация в основном строится на поточечном двумерном картировании, требующем значительного времени. В этой связи актуальными являются методы сокращения времени измерения спектрометров.

Система регистрации ИТС основана на дискретизации амплитуды терагерцового поля в временной области. Для детектирования без потери информации, должна удовлетворяться теорема отсчетов Уиттекера-Котельникова-Шеннона. Несмотря на то, что современные ИТС охватывают диапазон частот от 50 ГГц до 6 ТГц, в ряде задач информативной является лишь

малая область спектра, в то время как в согласии с теоремой отсчетов требуется сохранять частоту выборки не менее 12 ТГц, поскольку нормировочный сигнал несет в себе всю полосу. При этом, из вышеперечисленных приложений, почти все могут быть реализованы с помощью спектрально ограниченных сигналов. Маркеры глиомы имеют характерные различия в диапазоне 1,2–1,8 ТГц; в промышленных задачах применение частот > 1,6 ТГц часто лишено смысла, из-за их сильного поглощения атмосферой; используемый для визуализации опухолей диапазон лежит ниже 1 ТГц. В этой связи, применение соответствующих квазиоптических фильтров низких частот (ФНЧ) с высоким внеполосовым подавлением сигнала поможет повысить скорость сбора данных при снижении частоты дискретизации в ИТС.

### **Ключевые результаты**

Предложен подход, основанный на применении емкостных субволновых микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров в ИТС. Тестирование проведено при измерении спектров пропускающих полосовых фильтров с центральными частотами 156 и 376 ГГц и шириной полосы ~12%. Показано уменьшение времени измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.

Предложен и разработан дизайн узкополосного фильтра, основанный на эталоне Фабри-Перо с сеточными рефлекторами, совмещенного с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. На примере исследования пропускающей кремниевой пластины в окрестности частоты 0,85 ТГц экспериментально реализован метод субдискретизации в ИТС, сокращающий время измерения в 2 раза.

С применением предложенной техники исследована комплексная диэлектрическая проницаемость кристаллов КТП и SBN в субтерагерцовой области спектра.

### **Заключение**

Предложенные подходы, основанные на антиалиасной фильтрации с последующим увеличением шага дискретизации и полосовой фильтрации с применением субдискретизации, позволяют сократить время измерения сигналов в ИТС при исследовании сред в ограниченной частотной области. Это может помочь повысить скорость систем терагерцовой визуализации, построенных на базе ИТС.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при поддержке РФФИ проект № 20-32-90137, а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проектов № FSUS-2020-0029 НГУ и Госзадания ИАиЭ СО РАН.

Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН» НГУ, поддержанному Минобрнауки РФ (соглаш. №075-12-2021-697) и ЦКП «Спектроскопия и Оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленное оборудование.

## Список литературы

- [1] **Nikitkina, A. I.** Terahertz radiation and the skin: a review/ P. Y. Bikmulina, E. R. Gafarova, N. V. Kosheleva // Journal of Biomedical Optics. — 2021. — Vol. 26. — № 4. — P. 043005.
- [2] **Cherkasova, O.** Diagnosis of glioma molecular markers by terahertz technologies/ Y. Peng, M. Konnikova, Yu. Kistenev et al. // Photonics. — 2021. — Vol. 8. — № 1. — P. 22.
- [3] **Naftaly, M.** Industrial applications of terahertz sensing: State of play/ N. Vieweg, A. Deninger // Sensors. — 2019. — Vol. 19. — № 19. — P. 4203.

## Multilayer interference-based metamaterials for undersampling and antialiasing filtration in terahertz time-domain spectroscopy

*N. A. Nikolaev<sup>1,2</sup>, A. A. Rybak<sup>1,2</sup>, S. A. Kuznetsov<sup>1,3</sup>,*

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Division of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics “TDIAM”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The design of narrow-band and low-pass quasi-optical terahertz (THz) filters based on an interference multilayer structure of metasurfaces is presented. A concept based on the adaptation of analog-to-digital conversion techniques in optical terahertz spectroscopy is proposed and tested, namely antialiasing filtering and undersampling. The above-described filters are the key elements for the implementation of the proposed approaches, which are based on increasing the sampling interval in accordance with the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem when detecting the waveform of the optical THz field after filtering. The approbation of the proposed concept in experimental measurements showed a significant reduction in data acquisition time and a reduction in signal noise.

*Keywords:* Quasi-optical microstructures, Low-pass filter, Band-pass filter, Terahertz range, undersampling, Antialias filter.