

# Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры

А. А. Рыбак<sup>1,2</sup>, С. А. Кузнецов<sup>1,5</sup>, Н. А. Николаев<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, России

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

Рассмотрен подход к созданию терагерцового узкополосного пропускающего фильтра на основе интерференционной микроструктуры (эталон Фабри — Перо), который представляет из себя полипропиленовую пленку с нанесённой на обе стороны частотно-избирательной поверхностью в форме квадратных прорезей в металлическом слое. С помощью численного моделирования пропускания предложенной структуры определен оптимум её геометрических параметров для достижения полной ширины на полувысоте фильтра менее 4%. Полученный фильтр может найти применение в астрономии, в системах миллиметровой связи в открытом пространстве и в импульсной терагерцовой спектроскопии, для которой проведена апробация его применения.

**Ключевые слова:** квазиоптические микроструктуры, частотно-избирательные поверхности, эталон Фабри — Перо, полосовой фильтр, терагерцовый диапазон.

*Цитирование:* Рыбак, А. А. Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры / А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов, Н. А. Николаев // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 373–378.

## Введение

Прогресс технологий терагерцового (ТГц) спектрального диапазона необходим для эволюционного развития систем связи и передачи больших объемов данных; разработки новых подходов диагностики и скрининга в медицине; внедрения передовых методов контроля качества продукции на производстве, а также в других областях. ТГц излучение является квазиоптическим и обладает высокой степенью направленности по сравнению с радиочастотами из-за субмиллиметровой длины волны. В этой связи разработка оптических элементов, которые могут найти применение в вышеописанных областях, является актуальной задачей. Так, например, высокой потребностью могут обладать квазиоптические узкополосные пропускающие полосовые фильтры (ППФ).

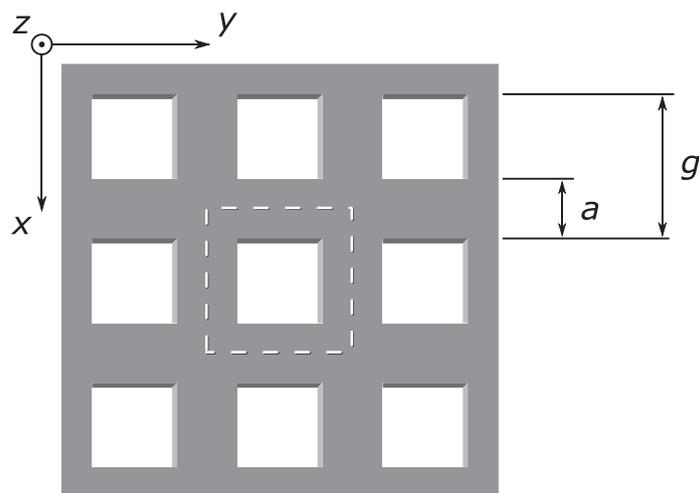
Распространенный подход к разработке квазиоптических фильтров основан на применении метаповерхностей или частотно-избирательных поверхностей (ЧИП). В общем случае они представляют собой искусственно-структурированные металлодиэлектрические среды с характерным периодом расположения составляющих их элементарных ячеек меньше или много меньше рабочей длины волны. Отклик метаматериала на электромагнитное возбуждение определяется структурой индуцируемых в нем токов, которые напрямую зависят от геометрии ячеек и от диэлектрических свойств окружения (подложки).

Распространен дизайн пропускающих фильтров на основе ЧИП, состоящей из субволновых резонансных щелевых элементов дипольного типа. Такие фильтры с шириной на полувысоте 10–20% были описаны авторами ранее [1–4]. Щелевые элементы ЧИП работают на локализованном плазмонном резонансе, возбуждаемом локальными стоячими волнами на щелях [5–7]. Ширина фильтрующей полосы в них убывает с уменьшением ширины щелей по квазилинейному закону [8–9]. Однако, пиковое пропускание фильтра быстро деградирует при сужении щели, что обусловлено возрастанием омических потерь на частоте резонанса и рассогласованием импеданса сетки и свободного пространства, приводящего к возрастанию коэффициента отражения. Поэтому уменьшение полосы ППФ ниже 10% не является целесообразным при стремлении к сохранению высокого коэффициента пропускания фильтра.

В данной работе рассмотрен подход к созданию узкополосного ППФ на основе эталона Фабри — Перо с сеточными рефлекторами (фильтр Фабри — Перо, ФФП), который в первом порядке должен обеспечивать узкую полосу пропускания. Подавление резонансов высших порядков реализовано совмещением ФФП с широкополосным ППФ, описанным ранее [1–4]. Предложенный подход и разработанная ЧИП могут быть адаптированы на любую частоту ТГц спектра в достаточно широких пределах от 0,1 до 3 ТГц. Однако в нашем случае стоит задача мониторинга методами ТГц спектроскопии поглощения газа монооксида углерода, для чего выбрана линия в окрестности 806 ГГц, которая попадает в локальное окно прозрачности атмосферы.

### **1. Дизайн фильтра Фабри — Перо**

В качестве базового дизайна ЧИП ФФП использована «классическая» геометрия квадратно-упакованных ячеек с прорезями квадратной формы (рис. 1), что обеспечивает отсутствие локализованных плазмонных резонансов вплоть до точки дифракции. АЧХ пропускания подобных сеток – плавно возрастающая функция, что является необходимым критерием для сохранения селективных характеристик ФФП в пределах его рабочей полосы. ЧИП размещена с двух сторон на поверхностях полипропиленовой (ПП) пленки, обеспечивающей фиксацию зазора между рефлекторами и имеющей низкий тангенс диэлектрических потерь.



**Рис.1.** Структура ЧИП, состоящая из металлических (серый цвет) сеточных отражателей со щелями в форме квадратных отверстий (белый цвет). Где  $g$  — латеральный период сетки,  $a$  — ширина металлических перемычек между ячейками. Пунктиром выделена область элементарной ячейки структуры.

Комплексная диэлектрическая проницаемость ПП измерена ранее на импульсном ТГц спектрометре и задавалась равной  $\varepsilon = 2,28 \times (1 - j10^{-3})$ . Проводимость и толщина металла сеток заданы как  $1,5 \times 10^7$  Ом/м и 0,4 мкм, соответственно. Толщина  $d$  ПП пленки задавалась в окрестности 112 мкм, что связано с доступными образцами плёнок и близостью данного значения к длине волны  $\lambda_0$  фундаментального резонанса ФФП, который по условию задачи должен совпадать с длиной волны излучения 372 мкм, соответствующей частоте 806 ГГц:  $d \approx \lambda_0/2n$ , где  $n = \text{Re}\sqrt{\varepsilon}$ . Для параметризации структуры нами введен также параметр  $p = g/\lambda_0$ .

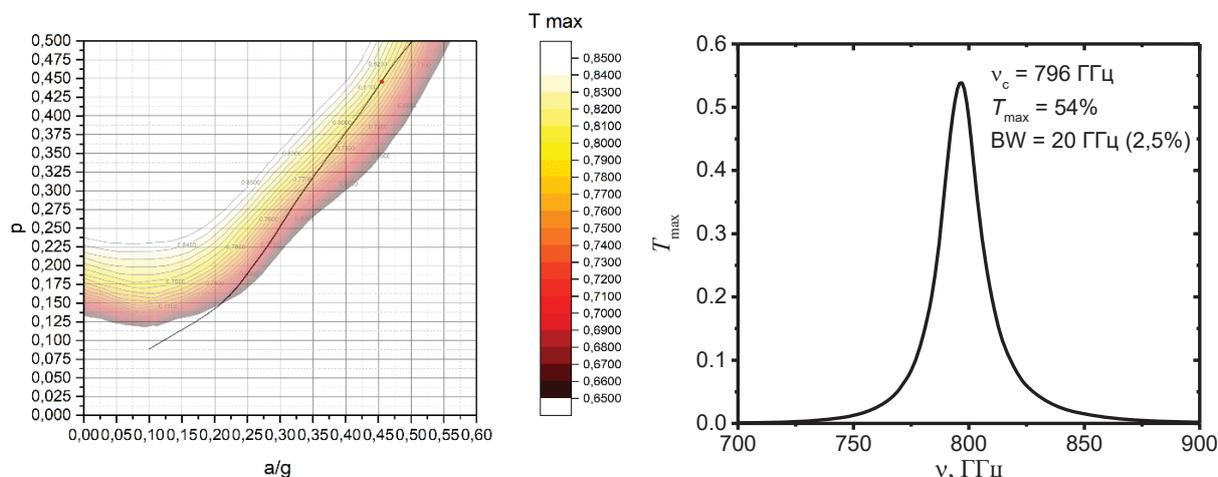
Перед нами стояла задача найти такие параметры  $p$  и  $a/g$  структуры, представленной на рис. 1., чтобы обеспечить полную ширину на полувысоте контура пропускания ФФП в нулевом порядке менее 4%.

Расчёт и оптимизация структуры выполнены с использованием коммерческого пакета трехмерного электродинамического моделирования ANSYS® HFSS R19, использующий метод конечных элементов для численного интегрирования уравнений Максвелла в частотной области. При моделировании ФФП как регулярно-периодической структуры использован режим портов Флоке с периодическими граничными условиями («Master-Slave» Boundary Conditions), применяемыми к элементарной ячейке ФФП (рис. 1). Порты Флоке располагались на расстоянии равном удвоенному латеральному периоду ячейки структуры ( $2g$ ) сверху и снизу от её поверхностей по оси  $z$ .

## 2. Результаты

Перебирая параметры  $p$  и  $a/g$  описанной структуры с шагом 0,1 в диапазоне от 0,05 до 0,8 был получен набор спектров пропускания полученного ФФП в окрестности интересующей частоты, представляющих из себя единичный пик пропускания нулевого порядка. Далее определялись параметры этого пика: пропускание в точке максимума  $T_{\text{max}}$  и ширина на

полувысоте  $BW = \Delta\nu/\nu$ , где  $\nu$  — частота. Полученные значения были отложены на двумерной контурной карте рис.2. Промежуточные значения на карте получены с помощью сплайн интерполяции.



**Рис. 2.** Слева: двумерная контурная карта пропускания максимума нулевого порядка  $T_{\max}$  (цветной градиент) ФФП в зависимости от параметров структуры  $p$  и  $a/g$ , предоставленной на рис. 1. Сплошная линия (черный цвет) контур аналогичной карты параметра  $BW$ , соответствующий значению 4%. Справа: спектр пропускания результирующего фильтра, состоящего из разработанного ФФП с параметрами  $p = 0,448$  и  $a/g = 0,457$  и ППФ с центральной частотой 800 ГГц и шириной полосы 20%.

На кривой пересечения двух функций  $T_{\max}(p, a/g)$  и  $BW(p, a/g) = 4\%$  было найдено максимальное значение пропускания ФФП:  $\text{Max}[T_{\max}(p, a/g)]$ . Иначе говоря найден максимум функции  $T_{\max}(p, a/g)$  на черной сплошной кривой отображенной на рис. 2 слева. В результате определены значения параметров, соответствующие заданному условию на ширину полосы пропускания фильтра, которые составили:  $p = 0,448$  и  $a/g = 0,457$ . На рис. 2 справа приведены спектр пропускания и параметры результирующего узкополосного пропускающего фильтра, состоящего из разработанного ФФП и ППФ с шириной полосы 20%. Заниженная частота максимума пропускания фильтра не является проблемой, так как может быть подстроена в сторону высоких частот небольшим закосом всей структуры по отношению к направлению распространения ТГц волны.

### Заключение

Предложен дизайн терагерцового узкополосного пропускающего фильтра на основе эталона Фабри — Перо, который представляет из себя полипропиленовую пленку 112 мкм с нанесённой с обеих сторон частотно-избирательной поверхностью в форме квадратных прорезей в металлическом алюминиевом слое толщиной 0,4 мкм. С помощью численного моделирования пропускания предложенной структуры определены оптимальные значения геометрических параметров для достижения полной ширины на полувысоте фильтра  $BW < 4\%$ , которые составили: латеральный период структуры —  $g = 166,7$  мкм, ширина перемычки между квадратными прорезями —  $a = 76,2$  мкм. В результате фильтр обладает

следующими характеристиками: центральная частота — 796 ГГц, пропускание в максимуме — 54%, BW = 20 ГГц (2,5%). Полученный дизайн может быть адаптирован для решения различного рода задач в сфере науки и техники. В нашем случае разработанный фильтр найдет применение в спектроскопии поглощения газа монооксида углерода, на линии 806 ГГц.

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 20-32-90137) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSUS-2020-0029). Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН НГУ» за предоставленное для выполнения проекта вычислительное оборудование.

### Список литературы

- [1] **Thumm, M. K. A.** Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM / M. K. A. Thumm, A. V. Arzhannikov, V. T. Astrelin, et al. // *Terahertz Sci. and Tech.* — 2012. — Vol. 5. — No.1. — P. 18–39.
- [2] **Аржанников, А. В.** / Диагностический комплекс для исследований генерации субтерагерцового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3 / А. В. Аржанников, А. В. Бурдаков, Л. Н. Вячеславов и др. // *Физика плазмы.* — 2012. — Том. 38. — № 6. — С. 496–505.
- [3] **Kuznetsov, S. A.** Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications / S. A. Kuznetsov, M. A. Astafyev, A. V. Gelfand, A. V. Arzhannikov // *Proc. 44th European Microwave Conf. (EuMC 2014), Rome, Italy, October 6–9.* — 2014. — Article no. 6986576. — P. 881–884.
- [4] **Кузнецов, С. А.** Исследование спектральных характеристик микроструктурных квазиоптических полосовых фильтров субтерагерцового диапазона / С. А. Кузнецов, А. В. Гельфанд // *Известия высших учебных заведений. Физика.* — 2015. — Том. 58. — № 11. — С. 113–120.
- [5] **Kuznetsov, S. A.** Microstructured Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications / S. A. Kuznetsov, A. V. Arzhannikov, A. V. Gelfand et al. // *Вестник НГУ. Серия: Физика,* — 2010. — Том. 5. — № 4. — С. 79–90.
- [6] **Munk, B.** *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* / B. Munk. — J. Wiley & Sons, 2000.
- [7] **Касьянов, А. О.** Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения / А. О. Касьянов, В. А. Обуховец // *Антенны.* — 2005. — №9. — С. 4–12.
- [8] **Möller, K. D.** Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions / K. D. Möller, J. B. Warren, J. B. Heaney, and C. Kotecki // *Appl. Opt.* — 1996. — Vol. 35. — P. 6210–6215
- [9] **Chase S. T.** Resonant array bandpass filters for the far infrared / S. T. Chase and R. D. Joseph. // *Appl. Opt.* — 1983. — Vol. 22. — P. 1775–1779.

# Terahertz narrow-bandpass filter based on an interference microstructure

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

Here we present a design of a terahertz narrow-bandpass filter based on an interference microstructure (Fabry – Perot etalon). It is based on a polypropylene film with a frequency-selective surface deposited on both sides in the form of square slots in a metal layer. With the help of numerical simulation of the transmission of the proposed structure, the optimum of its geometric parameters was determined to achieve a full width at half maximum of the filter less than 4%. The resulting filter can be used in astronomy, in free space millimeter-wave communication systems, and in terahertz spectroscopy, for which its application has been tested.

*Keywords:* Quasi-optical microstructures, Frequency-selective surfaces, Fabry – Perot etalon, Band-pass filter, Terahertz range.