Высокоэффективные квазиоптические частотные фильтры ТГц диапазона на основе частотно-избирательных поверхностей

С.А. Кузнецов^{1,2}, А.В. Гельфанд¹, П.А. Лазорский¹, В.Н. Федоринин¹, А.В. Аржанников^{2,3},
Н.А. Николаев^{2,4}, А. А. Мамрашев⁴, А.А. Рыбак^{2,4}, А.Н. Генцелев³, В.П. Бессмельцев⁴

¹ Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН "КТИПМ",
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 2/1

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

³ Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск,
630090, пр. Академика Лаврентьева, 11

⁴ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,
630090, пр. Академика Коптюга, 1

тел: +7 (383) 363-42-95, эл. почта: sakuznetsov@nsu.ru

DOI 10.34077/RCSP2021-48

В последнее десятилетие происходит активное освоение терагерцового диапазона частот электромагнитного спектра (0,1–10 ТГц), стимулированное развитием эффективных методов генерации и детектирования ТГц излучения. Данная спектральная область, простирающаяся от коротковолновой части миллиметрового диапазона до дальнего ИК ($\lambda=0,03\text{--}3$ мм), представляет большой практический интерес ввиду ряда уникальных свойств. К ним относятся отсутствие ионизирующего эффекта, сравнительно высокая проникающая способность во многие оптически непрозрачные материалы, высокая чувствительность к металлическим и водным средам, возможность достижения мм/субмм пространственного разрешения при визуализации скрытых объектов, наличие вращательных переходов в молекулах ряда важных органических веществ, высокая информационная ёмкость при передаче данных. Указанные свойства делают ТГц волны перспективными для систем безопасности, неразрушающего контроля и диагностики материалов, биомедицинских технологий, новых поколений систем связи (6G, 7G), и др.

Успешное решение задач ТГц фотоники предполагает необходимость частотной фильтрации квазиоптических пучков ТГц излучения для выделения нужного спектрального интервала. С инструментальной точки зрения ТГц диапазон удобно позиционирован между примыкающими к нему СВЧ и ИК областями, поскольку позволяет сочетать в ТГц аппаратуре инструментальные решения как оптической, так и микроволновой техники. Примером таких решений служат тонкие планарные метало-диэлектрические структуры субволновой топологии, известные в микроволновой литературе как «частотно-избирательные поверхности» (ЧИП), а в физике метаматериалов – как «метաповерхности». ЧИП являются, как правило, резонансными электродинамическими структурами, работающими на локализованном плазмонном резонансе, и эксплуатируются в режиме, когда их характерные резонансные частоты лежат ниже точки возбуждения высших дифракционных гармоник, что отличает такие структуры от дифракционных решеток. Последнее достигается малостью периода расположения элементарных ячеек ЧИП в ее латеральной плоскости в сравнении с рабочей длиной волны. При этом характерные топологические размеры микрорисунка ЧИП имеют масштаб от единиц до сотен микрометров, что позволяет использовать для качественного производства ЧИП хорошо отработанные технологии микроstructuring.

В настоящей работе освещаются теоретические, технологические и прикладные аспекты выполненных в Новосибирском научном центре разработок высокоэффективных ЧИП структур для фильтрации излучения в области частот 0.07–3 ТГц. Рассмотрены фильтры различных типов: полосовые пропускающие (band-pass), полосовые режекторные (band-stop), фильтры высоких частот (high-pass), фильтры низких частот (low-pass), фильтры Фабри-Перо. Для указанных фильтров: а) представлены результаты анализа электродинамических особенностей ЧИП, которые следует учитывать для получения структур с наиболее эффективными фильтрующими свойствами; б) рассмотрены особенности производства с применением технологий фотолитографии, гальванопластики, глубокой рентгеновской литографии, микроstructuring посредством фемтосекундных лазерных импульсов; в) рассмотрены особенности спектрального тестирования техникой ЛОВ-, Time-Domain и Фурье-спектроскопии; г) приведены примеры использования в ТГц метрологических системах. Показано, что разработанные устройства являются лучшими на рынке российских ТГц технологий.