

Управление спектральными характеристиками терагерцового излучения с использованием многослойных диэлектрических структур

И.Н. Николаева^{1,2,3*} Г.С. Рогожников³

¹Филиал Московского государственного университета имени

М.В. Ломоносова в городе Сарове. Россия, 607328, г. Саров, ул. Парковая, д.8

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

³Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
Россия, 607188, г. Саров, пр-кт Мира, д. 37

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 29.06.2024)

Проведены экспериментальные исследования, связанные с взаимодействием непрерывного терагерцового излучения миллиметрового диапазона длин волн с многослойными диэлектрическими структурами. Показаны возможности управления пространственными и спектральными характеристиками излучения в интересах создания устройств, которые могут найти применение в устройствах защищенной связи, запреградного видения и дистанционного зондирования.

PACS: 07.57.-c

УДК: 535.4

Ключевые слова: терагерцовое излучение, спектральный терагерцовый фильтр, многослойные диэлектрические структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионное управление пространственно-временными характеристиками терагерцового (ТГц) излучения открывает новые возможности в области создания систем защищенной связи [1, 2], запреградного видения, визуализации [3, 4] и дистанционного зондирования. Для этого используются устройства, действующие на разных физических принципах, в том числе использующие явления интерференции и дифракции, поляризации излучения, аподизации и гомогенизации пучков. Данная работа посвящена исследованию спектральных фильтров на основе многослойных диэлектрических структур, разработанных с целью селектирования отдельных участков спектров ТГц-излучения. Исследовано влияние количества слоев тонких пленок толщиной от 5 до 180 мкм из полиэтилена, полиэстера, лавсана, уретан акрилата, полиуретан акрилата и олигоуретанметакрилата на спектральные характеристики ТГц-пучка. Результаты данной работы могут способствовать созданию более эффективных, недорогих и простых в изготовлении устройств для управления ТГц-излучением, что является ключевым для развития ТГц-приложений, включая исследование материалов, систем беспроводной связи и видения.

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Любая многослойная диэлектрическая структура по своей сути является спектральным фильтром для падающих на неё электромагнитных волн, однако механизмы фильтрации существенно зависят от показателей преломления слоев, их толщины, расположения и угла падения излучения на её поверхность.

Спектральный фильтр представляет собой устройство, предназначенное для выделения заданного диапазона частот из спектра, попадающего на него излучения. Принцип работы спектрального фильтра основан на селекции волн с характеристиками, удовлетворяющими физическим параметрам устройства, за счет пропускания, отражения или отклонения этих волн в направлении, отличающимся от направления распространения основного пучка.

При падении электромагнитной волны на многослойную структуру, она частично отражается от каждого слоя и на выходе образуется последовательность убывающих по амплитуде лучей с равной разностью хода между ними.

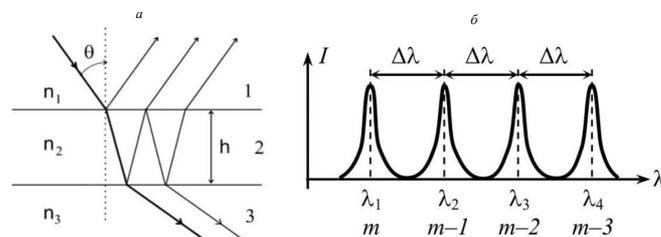


Рис. 1. а — схема многослойного фильтра, б — полосы пропускания многослойного интерференционного фильтра

* oefimova@otd13.vniief.ru

Если период структуры (расстояние между слоями) совпадает с длиной волны падающего излучения, то отраженные волны интерферируют, образуя максимум пропускания. В результате спектральные фильтры на основе многослойных структур демонстрируют окна пропускания вблизи частоты, на которой период структуры совпадает с длиной волны падающего электромагнитного излучения. Ширина окна пропускания зависит от числа слоев, их толщины и материала, из которого они изготовлены. В таком варианте спектральный фильтр представляет собой вид интерферометра Фабри–Перо, состоящего из диэлектрического слоя и тонких пленок, нанесенных на обе его поверхности.

Если материалы, из которых изготовлены слои, имеют показатели преломления подобранные таким образом, что способствуют выводу определенных длин волн, такие фильтры являются дисперсионными. Потери излучения в дисперсионном фильтре гораздо больше, зато он более широкополосный и подходит для создания селективирующих устройств со сложной спектральной структурой.

Положение максимума полосы пропускания фильтра зависит от угла падения света. С увеличением угла наклона растет ширина полосы пропускания, позволяя более широкому диапазону длин волн проходить через фильтр. Подобное разделение пучка позволяет получать монохроматическое линейно-поляризованное излучение [5].

В случае оптического диапазона изготовление спектральных фильтров представляет собой сложный технологический процесс из-за характерных размеров структур, которые должны быть сопоставимы с длиной волн — от сотен нанометров до единиц микрометров. Терагерцовый диапазон в этом случае гораздо более удобен — характерные размеры структур от десятков микрон до единиц миллиметров. В [6–10] приводятся конструкции интерференционных фильтров, которые предназначены для работы с импульсным терагерцовым излучением. При работе с непрерывным ТГц-излучением возникают свои нюансы, которые мы попытаемся учесть в данной работе.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для исследования взаимодействия ТГц-излучения с многослойными структурами была создана экспериментальная установка (рис. 2). Источником непрерывных ТГц-волн с частотой 0.14 ТГц и средней мощностью 20 мВт являлся генератор, управляемый напряжением, на основе лавинно-пролетного диода и умножителей частоты (ГУН-140/2/10). Излучение на выходе генератора модулировалось рассекателем и попадало в телескоп из внеосевых параболических зеркал, в центре которого располагалась кассета с исследуемыми образцами. На выходе из телескопа излучение коллимировалось тефлоновыми линзами и попадало на

делительную пластину из кремния. Часть излучения отражалась в пироэлектрический приемник на основе танталата лития, соединенного с цифровым осциллографом GDS-2104 для регистрации временного профиля модулированного излучения, а прошедшее через делительную пластину излучение регистрировалось матричным ТГц-приемником TERA-4096.

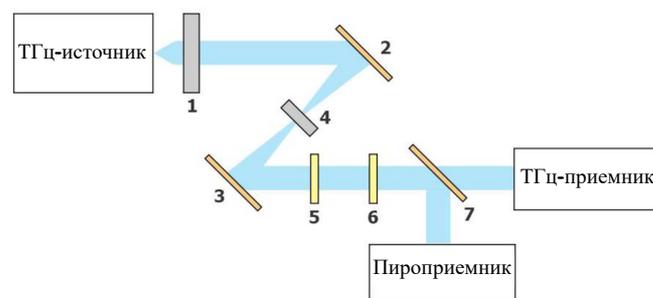


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по взаимодействию ТГц-излучения с многослойными диэлектрическими структурами: 1 — оптический модулятор, 2, 3 — телескоп из внеосевых параболических зеркал, 4 — кассета с исследуемыми образцами, 5, 6 — телескоп из РТФЕлинз, 7 — делительная пластина

На рис. 3 изображена схема структуры изготовленных образцов, состоящих из чередующихся слоев диэлектрика толщиной порядка длины волны падающего излучения 2.14 мм и полимерных пленок толщиной менее 200 мкм. Поскольку сухие диэлектрические материалы прозрачны в ТГц диапазоне, в качестве основного материала был выбран картон с показателем преломления 1.53. Размер изготовленных структур 24x24 мм.

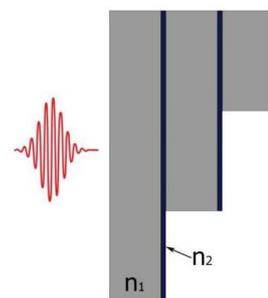


Рис. 3. Схема изготовленных образцов, состоящая из чередующихся слоев диэлектрик/диэлектрическая пленка (толщиной менее 200 мкм)

Показатель преломления для полимеров в ТГц диапазоне варьируется от 1.4 до 1.8 [8, 11]. В работе для создания многослойной структуры использовались такие материалы, как полиэстер, полиэтилен, лавсан, уретан акрилат, полиуретан акрилат, олигоуретанметакрилат.

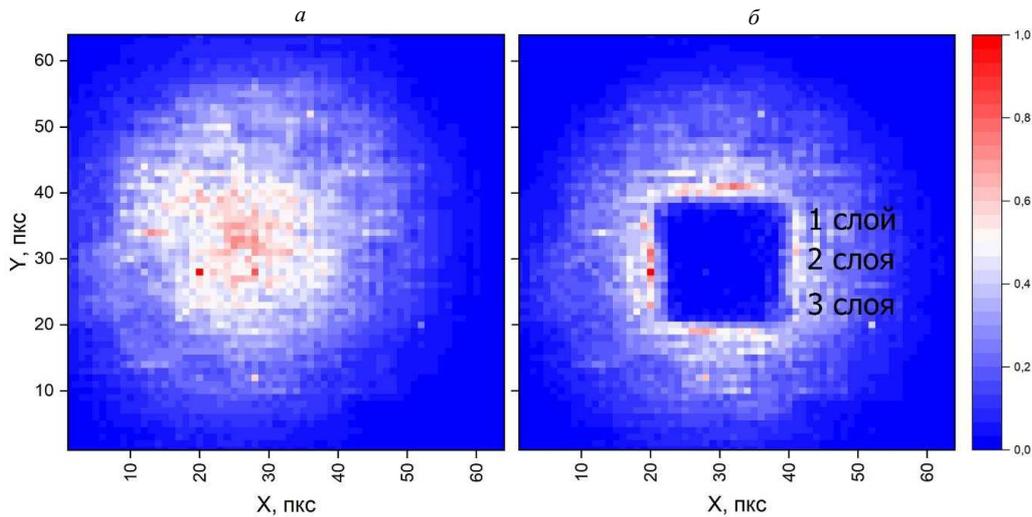


Рис. 4. Пространственное распределение ТГц пучка в объективе ТГц-камеры, *a* — без исследуемого образца, *б* — с образцом

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Пленки полиэстера и лавсана

Были проведены эксперименты по схеме, изображенной на рис. 2. Использовались пленки толщиной 50 мкм из полиэстера и лавсана. При прямом падении ТГц-излучения на кассету с образцом, происходило полное поглощение излучения 1, 2 и 3 слоев пленки, на рис. 4 представлены снимки с ТГц камеры.

При повороте кассеты на угол 45° относительно поверхности камеры, наблюдалась интерференция ТГц-излучения в однослойной пленке (рис. 5).

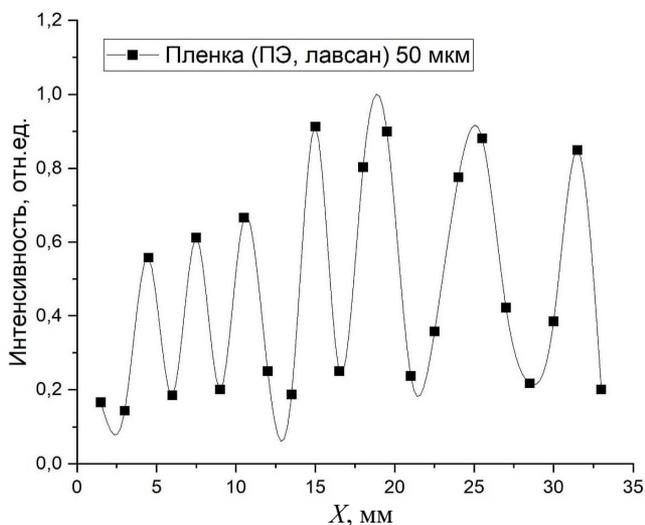


Рис. 5. Интерференция ТГц-излучения на пленке толщиной 50 мкм (полиэстер, лавсан)

3.2. Пленки уретан акрилата

Для следующей серии экспериментов использовались пленки уретан акрилата толщиной 150 мкм для создания многослойных структур. С увеличением количества слоев интенсивность прошедшего пучка уменьшалась (рис. 6, *a*).

Исследовано влияние угла падения на прошедшее ТГц-излучение. При повороте кассеты до 50° пространственное распределение пучка практически не изменялось. При повороте на 60° наблюдалась интерференция от трех пленок (рис. 6, *б*).

3.3. Пленки полиуретан акрилата

Аналогичная ситуация наблюдалась с пленками полиуретан акрилата толщиной 180 мкм. При повороте кассеты с образцами на 45° была видна интерференция от 2-х слоев пленки, с увеличением угла до 60° — интерференция от 2 и 3 слоев пленки (рис. 7, *б*).

Однако, в отличие от уретана, с увеличением количества слоев, происходило увеличение интенсивности прошедшего ТГц пучка.

Следующая серия экспериментов с пленками полиуретан акрилата толщиной 110 мкм продемонстрировала, что с увеличением количества слоев интенсивность прошедшего пучка падала стабильно при углах поворота от 0° до 60° . Однако при угле 60° происходила интерференция ТГц-пучка от всех слоев с равной амплитудой (рис. 9).

3.4. Пленки олигоуретанметакрилата

На рис. 9 представлены результаты взаимодействия ТГц-излучения с многослойной структурой из пленок

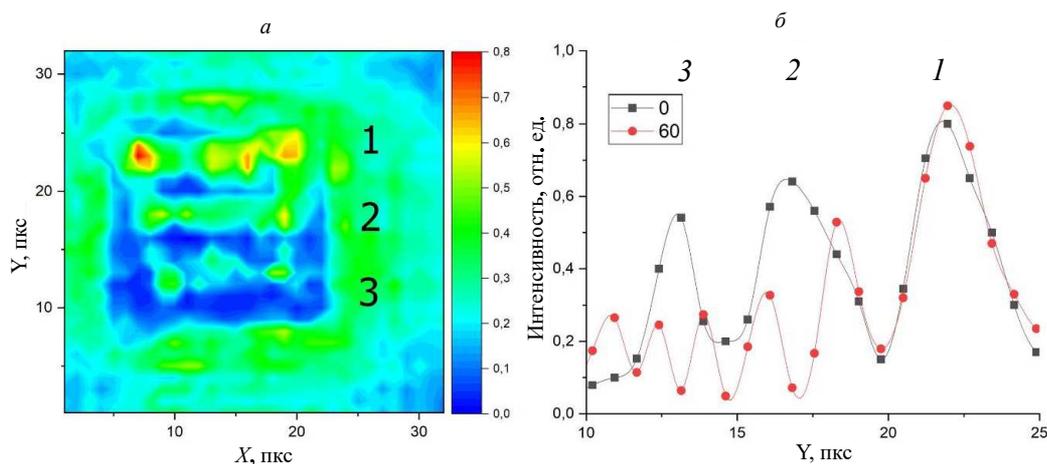


Рис. 6. *a* — пространственное распределение ТГц-пучка, прошедшего через многослойную структуру, состоящую из пленок уретан акрилата толщиной 150 мкм при прямом падении, *б* — распределение интенсивности прошедшего ТГц-пучка при падении под углами 0° и 60° (цифрами обозначено количество слоев)

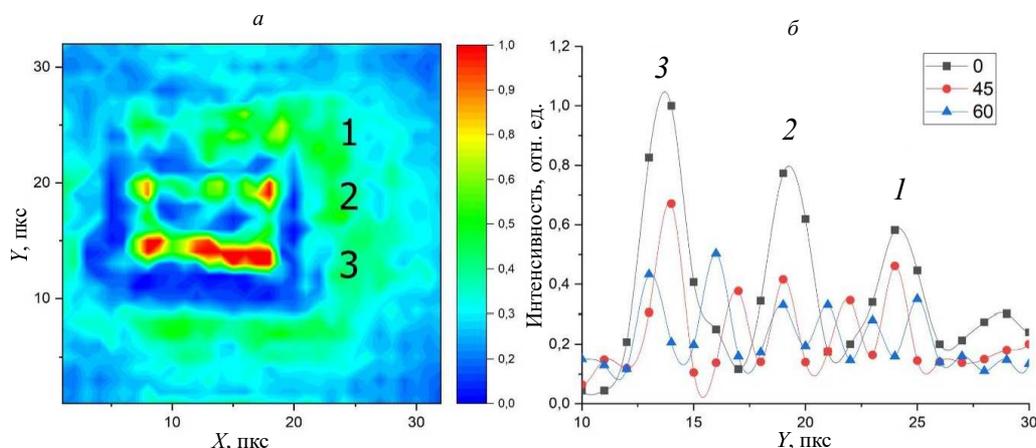


Рис. 7. *a* — пространственное распределение ТГц пучка, прошедшего через многослойную структуру, состоящую из пленок полиуретан акрилата толщиной 180 мкм при прямом падении, *б* — распределение интенсивности прошедшего ТГц пучка при падении под углами 0°, 45° и 60°

олигоуретанметакрилата толщиной 150 мкм. С увеличением угла падения ТГц-излучения на поверхность пленок наблюдалось размытие фронта интенсивности.

3.5. Пленки полиэтилена

Полиэтилен (ПЭ), как термопластичный полимер, широко применяется во многих сферах, для ТГц спектральных фильтров ПЭ проявляет следующие свойства: имеет низкий коэффициент поглощения в ТГц-диапазоне частот, низкая дисперсия материала обеспечивает стабильность спектральных характеристик ТГц-фильтра, высокая доступность и относительно низкая стоимость.

Эксперименты показали, что при наклонном падении ТГц-пучка (от 30° до 90°) на поверхность пленок из HDPE толщиной 100 мкм происходило размытие

фронта интенсивности с увеличением количества слоев пленок (приведены результаты для угла наклона 30°, рис. 10). Обратная ситуация с более тонкими пленками — с увеличением количества ПЭ-пленок толщиной 5 мкм наблюдалось восстановление фронта интенсивности (приведены результаты для угла наклона 30°, рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены спектральные фильтры на основе многослойных структур из диэлектрических материалов. Проведены серии экспериментов с различными материалами, в результате которых исследовано пропускание непрерывного ТГц-излучения в зависимости от количества тонких пленок и от угла падения на поверхность. Наблюдалась интерференция от пленок толщиной 50 мкм из ПЭ и лавсана, пленок уретан

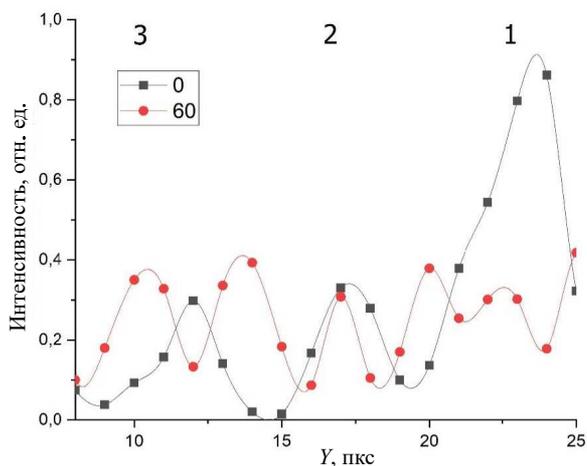


Рис. 8. Распределение интенсивности прошедшего ТГц-пучка через многослойную структуру из пленок полиуретан акрилата толщиной 110 мкм при падении под углами 0° и 60°

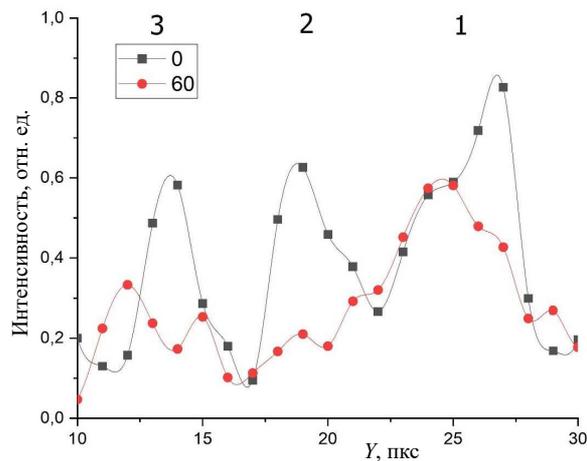


Рис. 9. Распределение интенсивности прошедшего ТГц пучка через многослойную структуру из пленок олигоуретанметакрилата толщиной 150 мкм при падении под углами 0° и 60°

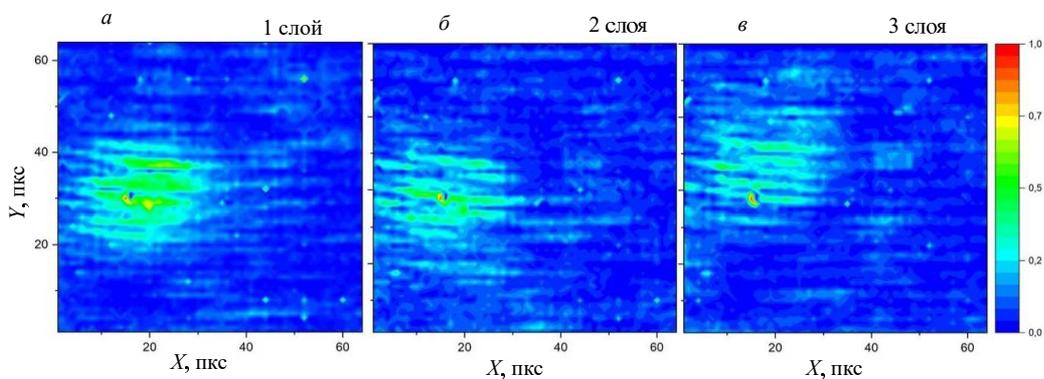


Рис. 10. Влияние количества слоев на пространственные характеристики прошедшего ТГц-пучка под углом падения 30° на пленки HDPE толщиной 100 мкм, а — 1 слой пленки, б — 2 слоя, в — 3 слоя

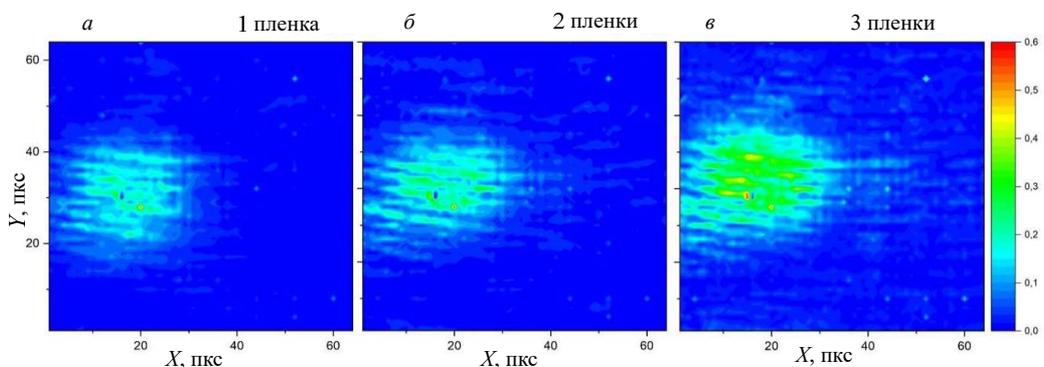


Рис. 11. Влияние количества слоев на пространственные характеристики прошедшего ТГц-пучка под углом падения 30° на ПЭ-пленки толщиной 5 мкм

акрилата (150 мкм) и полиуретан акрилата толщиной 180 и 110 мкм. Наблюдалось восстановление фронта интенсивности при косом падении ТГц-пучка с использованием набора тонких ПЭ-пленок толщиной 5 мкм

в отличие от более плотных и толстых образцов HDPE. Получены базовые исходные данные для исследования спектральных характеристик пучков, прошедших через многослойные диэлектрические структуры.

-
- [1] Rogozhnikov G.S. et al. // *Appl. Optics*. (2018). **57**. N 10. C98
- [2] Mahmood A. et al. // *IEEE Access*. **12**. 27530. (2024).
- [3] Xu Y., Jiang X. // *Infrared Physics & Technology*. **127**. 104467. (2022).
- [4] Ruan X., Huang H. A // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, **2425**. N 1. 012045. (2023).
- [5] Поздняков Г.А. Изучение способов фильтрации оптического излучения. 2012.
- [6] Yi M.W. et al. // *Journal of the Optical Society of Korea*. **13**, N 3. 398. (2009).
- [7] Withayachumnankul W., Fischer B. M., Abbott D. // *Optics Communications*. **281**. N 9. 2374. (2008).
- [8] Shao J., Dobrowolski J.A. // *Appl. Optics*. **32**. N 13. 2361. (1993).
- [9] Turchinovich D. et al. *Appl. Phys. A*. **74**. 291 (2002).
- [10] <https://www.tydexoptics.com>
- [11] Jin Y.S., Kim G.J., Leon S.G. // *Journal of the Korean Physical Society*. **49**. N 2. 513. (2006).

Controlling the spectral characteristics of terahertz radiation by means of multilayer dielectric structures

I.N. Nikolaeva^{1,2,3,a}, G.S. Rogozhnikov³

¹*Moscow State University branch in Sarov. Sarov 607328, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

³*RFNC-VNIIEF, Sarov 607188, Russia*

E-mail: ^aoefimova@otd13.vniief.ru

Experimental research on interaction of mm-wavelength terahertz radiation with multilayer dielectric structures have been carried out. Possibilities of spatial and spectral characteristics control for practical use in secure communication, opaque vision and distant sounding have been shown.

PACS: 07.57.-c

Keywords: terahertz radiation, spectral terahertz filter, multilayer dielectric structures.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Николаева Инесса Николаевна — аспирант; мл. науч. сотрудник; e-mail: oefimova@otd13.vniief.ru.
2. Рогожников Георгий Сергеевич — ст. науч. сотрудник; e-mail: g.s.rogozhnikov@mail.ru.