

УДК 535.3

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-775-782

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Д.А. Гомон, В.Ю. Соболева, П.С. Демченко, Е.А. Литвинов, Е.Б. Шекланова, М.К. Ходзицкий

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: dagomon@corp.ifmo.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 04.06.19, принята к печати 22.07.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Гомон Д.А., Соболева В.Ю., Демченко П.С., Литвинов Е.А., Шекланова Е.Б., Ходзицкий М.К. Перестраиваемые терагерцовые фильтры на основе углеродных нанотрубок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 775–782. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-775-782

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследован оптически перестраиваемый терагерцовый фильтр на основе крестообразных резонаторов с нанесенным слоем углеродных нанотрубок. Экспериментально показана возможность управления оптическими спектральными характеристиками терагерцовых устройств с нанесенным на них в один слой углеродных нанотрубок. **Метод.** Для расчета геометрических параметров крестообразных резонаторов для заданных резонансной частоты и добротности фильтра использованы эмпирические формулы. Образцы режекторного фильтра изготавливались методом лазерной гравировки. На экспериментальный образец фильтра наносился слой углеродных нанотрубок, которые синтезированы путем аэрозольного химического осаждения. Экспериментальные спектры пропускания «пустого» фильтра, фильтра со слоем углеродных нанотрубок без накачки и фильтра со слоем углеродных нанотрубок с лазерной накачкой на длине волны 980 нм измерялись методом импульсной терагерцовой спектроскопии. **Основные результаты.** Экспериментально показано, что оптическая накачка фильтра со слоем углеродных нанотрубок приводит к уменьшению пропускания основного резонансного пика и сдвигу в сторону больших частот побочного резонансного пика. **Практическая значимость.** Фильтры с нанесенным слоем углеродных нанотрубок могут использоваться в качестве недорогих и компактных перестраиваемых компонентов для устройств терагерцовой фотоники.

### Ключевые слова

терагерцовое излучение, терагерцовые фильтры, углеродные нанотрубки, крестообразные резонаторы, терагерцовая импульсная спектроскопия

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-775-782

## TUNABLE TERAHERTZ FILTERS BASED ON CARBON NANOTUBES

D.A. Gomon, V.Yu. Soboleva, P.S. Demchenko, E.A. Litvinov, E.B. Sheklanova, M.K. Khodzitsky

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: dagomon@corp.ifmo.ru

### Article info

Received 04.06.19, accepted 22.07.19  
 Article in Russian

**For citation:** Gomon D.A., Soboleva V.Yu., Demchenko P.S., Litvinov E.A., Sheklanova E.B., Khodzitsky M.K. Tunable terahertz filters based on carbon nanotubes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 775–782 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-775-782

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents the study of optically tunable terahertz filter based on cross resonators coated with a layer of carbon nanotubes (CNT). We show experimentally control capability of the optical spectral characteristics of terahertz devices coated with a layer of single-wall carbon nanotubes. **Method.** The empirical formulas were used for calculation of the geometrical parameters of a cross-shaped resonator for a given resonant frequency and filter Q-factor. Experimental samples of the notch filter were made by laser engraving. A layer of carbon nanotubes, which were synthesized by aerosol chemical deposition, was deposited on an experimental filter sample. Experimental transmission spectra of an “empty” filter, a filter with a carbon nanotubes layer without pumping, and an optically pumped carbon nanotubes layer filter at a wavelength of 980 nm were measured by terahertz time-domain spectroscopy. **Main Results.** We have shown by experiments that optical pumping of a filter with carbon nanotubes layer leads to a decrease in the transmittance of the main resonance peak and a shift towards

higher frequencies of the side resonance peak. **Practical Relevance.** Filters coated with carbon nanotubes layer can be used as inexpensive and compact tunable components for terahertz photonics devices.

#### Keywords

terahertz radiation, terahertz filters, metamaterials, carbon nanotubes, cross-shaped resonators, terahertz pulse spectroscopy

## Введение

Волны терагерцового (ТГц) диапазона частот (0,1–10 ТГц), расположенного между микроволновым и инфракрасным спектральными диапазонами, обладают следующими свойствами: низкая энергия фотонов, длина волны больше, чем у видимого и инфракрасного спектральных диапазонов, сильное поглощение молекулами, экстремально высокое поглощение водой. Благодаря этим свойствам ТГц волны имеют множество применений в областях биомедицинской диагностики, ТГц системы безопасности, контроля качества на производстве беспроводных телекоммуникационных систем и т. д. [1–4].

Поэтому за последние несколько десятилетий ТГц технологии стали предметом пристального внимания. Хотя проблемы генерации и детектирования ТГц волн были решены, но по сравнению с хорошо изученными смежными микроволновым и инфракрасным спектральными диапазонами все еще существует огромная проблема в управлении ТГц волнами. Кроме того, функциональные устройства для прямого управления и обработки ТГц волн (фильтры [5], модуляторы, поглотители [6], переключатели [7] и датчики) все еще не обладают нужными характеристиками. Проблема разработки оптически управляемых модуляторов становится все более важной и востребованной. ТГц модуляторы крайне необходимы в качестве важных функциональных устройств для осуществления беспроводной ТГц связи на коротких расстояниях и визуализации. С помощью таких модуляторов могут быть выполнены амплитудная и фазовая модуляция, сдвиг резонансной частоты и переключение состояния поляризации. Для современных модуляторов все еще существует много проблем: малая глубина модуляции, потребность в криогенной температуре и медленная скорость модуляции.

Для ТГц модуляции могут быть использованы кремний [8], арсенид галлия [9], графен [10] и диоксид ванадия [11]. В данном исследовании предлагается оптическое управление спектральными характеристиками ТГц устройств с нанесенным на них слоем однослойных углеродных нанотрубок.

## Структура фильтра

В данной статье исследуется возможность создания управляемых фильтров на основе метаповерхности из крестообразных резонаторов и углеродных нанотрубок. Геометрия такой метаповерхности описывается следующим набором параметров:  $P$  — период структуры крестовых резонаторов,  $L$  — длина линий крестов,  $W$  — ширина линий крестов,  $h$  — толщина диэлектрической подложки.

Существует два вида фильтров на основе крестообразных резонаторов: полосовой фильтр (металлическая поверхность с вырезанными в ней крестообразными резонаторами — работает на пропускание) и режекторные фильтры (подложка из полиэтилентерефталата (ПЭТ) с нанесенным на него массивом металлических крестообразных резонаторов — работает на отражение). В данной работе рассматриваются режекторные фильтры. На рис. 1, *a*, *b* представлены конструкции полосового и режекторного фильтров, а на рис. 1, *в*, *г* — их спектры пропускания. На рис. 2 изображена фотография изготовленного образца режекторного фильтра.

Спектры пропускания фильтров описываются резонансной частотой  $f_r$ , полосой пропускания  $\Delta f$  и добротностью  $Q = f/\Delta f$ , которые зависят от геометрических параметров  $P$ ,  $L$  и  $W$  и свойств подложки: ее показателя преломления  $n_s$  и толщины  $h$ .

## Расчет геометрических параметров фильтра

При пропорциональном изменении всех параметров резонатора ( $P = kP_0$ ,  $L = kL_0$ ,  $W = kW_0$ ) резонансная частота изменяется в  $1/k$  раз (т. е.  $f_r^0 = kf_r$ , где  $f_r$  — резонансная частота фильтра с параметрами  $P$ ,  $L$  и  $W$ , а  $f_r^0$  — резонансная частота фильтра с параметрами  $P_0$ ,  $L_0$  и  $W_0$ ) и не изменяется добротность фильтра.

Зависимость добротности от геометрических параметров исследовалась численно методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics. Вычисления производились с постоянными длиной и шириной креста, равными  $L = 400$  мкм и  $W = 100$  мкм, при этом период  $P$  изменялся от 500 до 900 мкм. Спектры пропускания полосовых фильтров с различными соотношениями  $P:L:W$  представлены на рис. 3.

Очевидно, что при увеличении периода резонаторов уменьшается полоса пропускания, а резонансная частота смещается в сторону меньших частот (рис. 4, *б*). Но полоса пропускания изменяется быстрее, чем резонансная частота, поэтому увеличение периода приводит еще и к увеличению добротности фильтра. Конечно, добротность фильтра зависит не столько от значения периода, сколько от соотношения между геометрическими параметрами  $P:L:W$ , но если принять постоянным соотношение между длиной и шириной крестообразного резонатора  $L:W = 4$ , то можно построить зависимость соотношения  $P:L$  от добротности фильтра (рис. 4, *а*).

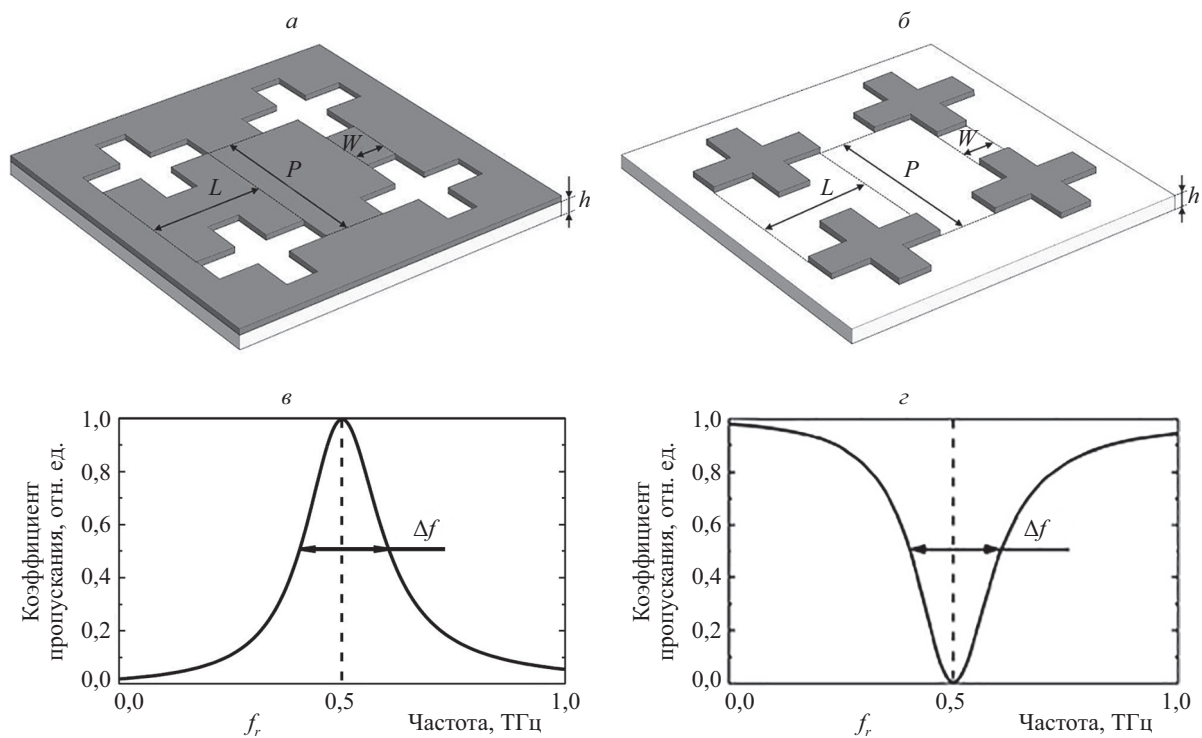


Рис. 1. Конструкции полосового (а) и режекторного (б) фильтров; схематические спектры пропускания полосового (в) и режекторного (г) фильтров

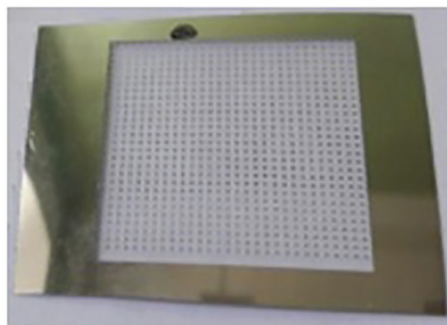


Рис. 2. Фотография изготовленных образцов режекторных фильтров. Размер массива, содержащего 756 резонаторов:  $31,5 \times 32,5 \times 68$  мкм

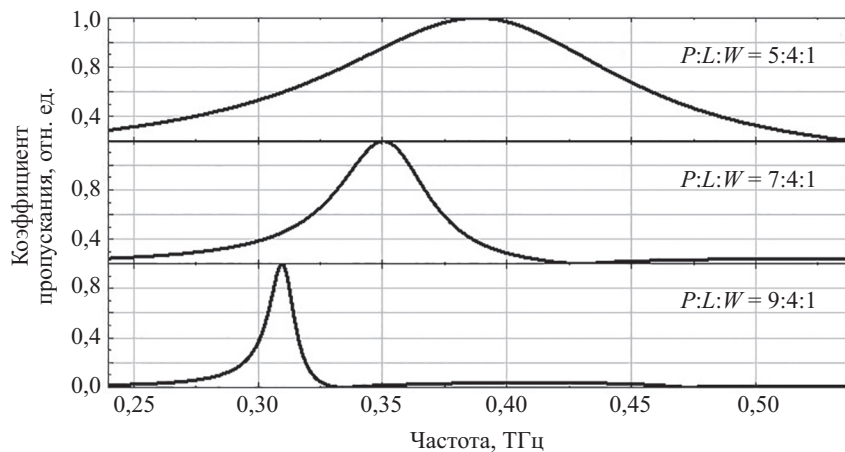


Рис. 3. Спектры пропускания полосовых фильтров на основе крестообразных резонаторов, полученные с помощью численного моделирования, с различными соотношениями геометрических параметров

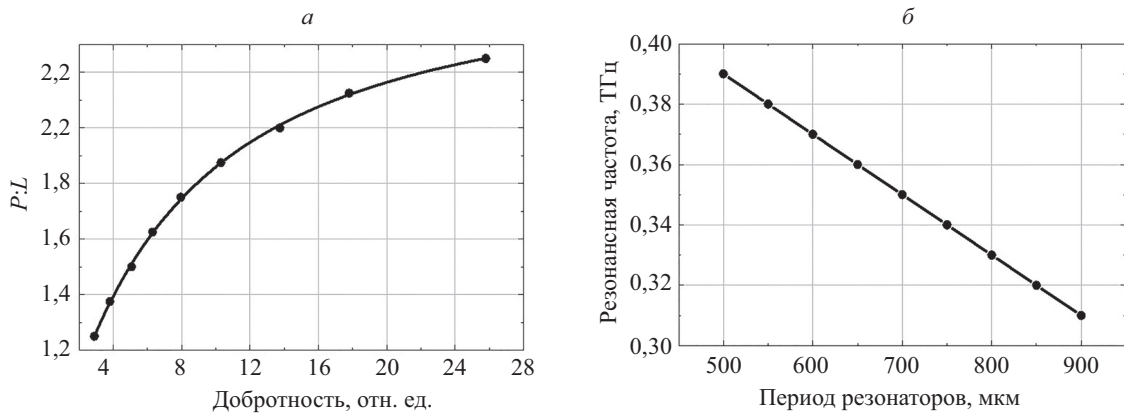


Рис. 4. Зависимость соотношения между периодом резонаторов и длиной креста  $P:L$  от добротности фильтра с аппроксимацией (а); зависимость резонансной частоты полосового фильтра от периода резонаторов при  $L = 400$  мкм и  $W = 100$  мкм (б)

Очевидно, что зависимость, представленная на рис. 4, б, аппроксимируется линейной функцией. Резонансная частота  $f_r$ , на которую произойдет сдвиг при изменении периода резонаторов со значения  $P_0$  до  $P$ :

$$f_r' = f_r^0 \text{ [ГГц]} - 0,2 \text{ [ГГц/мкм]} \cdot (P - P_0) \text{ [мкм]}. \tag{1}$$

Зависимость соотношения между периодом резонаторов и длиной креста от добротности фильтра можно аппроксимировать кривой (рис. 4, а):

$$\frac{P}{L} = 2,6 - \frac{1,85}{1 + \left(\frac{Q}{6,9}\right)^{1,13}}. \tag{2}$$

Используя фильтр с известными характеристиками —  $P_0 = 600$  мкм,  $L_0 = 400$  мкм,  $W_0 = 100$  мкм,  $f_r^0 = 0,37$  ТГц, — можно, во-первых, изменить период  $P'$  до нужной добротности по формуле (2), во-вторых, рассчитать, на сколько изменилась при этом резонансная частота по формуле (1). В результате получим фильтр с известными геометрическими параметрами  $P$ ,  $L_0$ ,  $W_0$  и известными спектральными характеристиками: резонансной частотой  $f_r'$ , рассчитываемой по формуле (1), и добротностью  $Q$ . Причем этот фильтр будет обладать добротностью, которая была задана изначально. Для достижения заданного значения резонансной частоты  $f_r$  нужно просто пропорционально изменить все геометрические параметры в  $f_r'/f_r$  раз [12, 13], т. е.

$$P = \frac{f_r'}{f_r} P', \tag{3}$$

$$L = \frac{f_r'}{f_r} L_0, \tag{4}$$

$$W = \frac{f_r'}{f_r} W_0. \tag{5}$$

В формулы (3)–(5) необходимо подставлять резонансную частоту  $f_r$  в ТГц.

### Учет влияния подложки

Чем больше толщина подложки, тем больше она влияет на положение резонансной частоты фильтра, смещая ее в сторону меньших частот, при этом не влияя на добротность. Однако после достижения некоторой толщины насыщения  $h_n$  подложка практически перестает влиять, резонансная частота перестает смещаться и равна  $f_r/n_{eff}$ . Здесь  $n_{eff}$  — эффективный показатель преломления [14], определяемый через показатель преломления подложки  $n_s$

$$n_{eff} = \sqrt{\frac{n_s^2 + 1}{2}}. \tag{6}$$

Зависимость коэффициента влияния подложки  $k_{shift}$  от толщины подложки представлена на рис. 5.

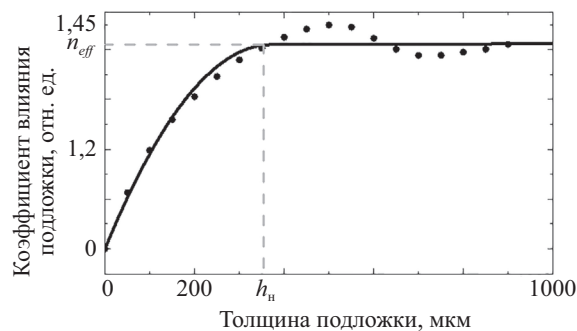


Рис. 5. Зависимость коэффициента влияния подложки от толщины подложки.

Точки — данные, полученные с помощью численного моделирования; линия — аппроксимация

Толщина насыщения вычисляется по формуле (7):

$$h_n = \frac{(n_{eff} + 2) \cdot S \cdot c}{100 \cdot n_{eff} \cdot S_{кр} \cdot f_r^{ws}}, \quad (7)$$

где  $S$  — площадь полной элементарной ячейки,  $S_{кр}$  — площадь части элементарной ячейки, покрытой металлом,  $f_r^{ws}$  — резонансная частота фильтра без подложки: для данных геометрических параметров  $f_r^{ws} = 196$  ГГц.

Если толщина подложки от 0 до  $h_n$ , то зависимость аппроксимируется квадратичной функцией с координатами вершины ( $h_n; n_{eff}$ ). Кроме этого, точно известно, что при отсутствии подложки (т. е.  $h = 0$ ) влияния подложки нет (т. е.  $k_{shift} = 1$ ). Таким образом, коэффициент влияния подложки толщиной меньше толщины насыщения ( $h < h_n$ ) равен:

$$k_{shift} = (1 - n_{eff}) \cdot \left(\frac{h}{h_n}\right)^2 + 2(n_{eff} - 1) \cdot \frac{h}{h_n} + 1. \quad (8)$$

Для рассматриваемого фильтра толщина подложки меньше толщины насыщения, поэтому влияние рассчитывается по формуле (8). В результате, для того чтобы рассчитать геометрические параметры крестообразных резонаторов под заданные резонансную частоту и добротность, надо сначала рассчитать  $P$ ,  $L$  и  $W$  по формулам (3)–(5), затем рассчитать коэффициент влияния подложки  $k_{shift}$  по формуле (8) и еще раз пересчитать параметры по формулам (3)–(5), но уже под резонансную частоту  $f_r/k_{shift}$ .

### Изготовление экспериментальных образцов

Металлическая поверхность изготавливалась на подложке из полиэтилентерефталата (ПЭТ) с алюминиевым покрытием. Толщина ПЭТ равна 68 мкм, толщина алюминиевого покрытия равна 0,5 мкм. Резонаторы вырезались методом лазерной абляции с помощью лазерного гравера LaserGraver LG2500 SP47, использующего тепловую технологию записи изображения с разрешением 15 мкм.

Углеродные нанотрубки (УНТ) синтезированы путем аэрозольного химического осаждения [15] из газа с точным контролем их морфологии: длины, диаметра нанотрубок и толщины слоя их нанесения. Данным методом получают тонкие пленки УНТ на нитроцеллюлозном фильтре. С нитроцеллюлозного фильтра слой УНТ можно легко перенести на практически любую обезжиренную поверхность сильным нажатием. В данной работе были получены одностенные УНТ, которые были перенесены на неметаллизированную сторону ПЭТ.

### Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование проводилось методом терагерцовой импульсной спектроскопии. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

Лазерный пучок фемтосекундного Yb:KYW-лазера (длительность импульса 200 фс, центральная длина волны излучения 1,04 мкм, мощность 1 Вт) с помощью светоделительного (СД) устройства делится на пучок накачки и зондирующий пучок в соотношении 9:1. Пучок накачки проходит линию задержки, модулятор (М) и падает на кристалл арсенида индия (InAs), помещенный в постоянное магнитное поле, который генерирует терагерцовое излучение. Затем он проходит через фильтр (Ф), отсекающий инфракрасный (ИК) диапазон длин волн, и системой параболических зеркал (ПЗ) фокусируется на образце (О). Образец также освещается ИК лазером с длиной волны 980 нм и мощностью от 1 мВт до 2 Вт. После прохождения третьего параболического зеркала пучок падает на детектор ТГц излучения – кристалл теллурида кадмия (CdTe).

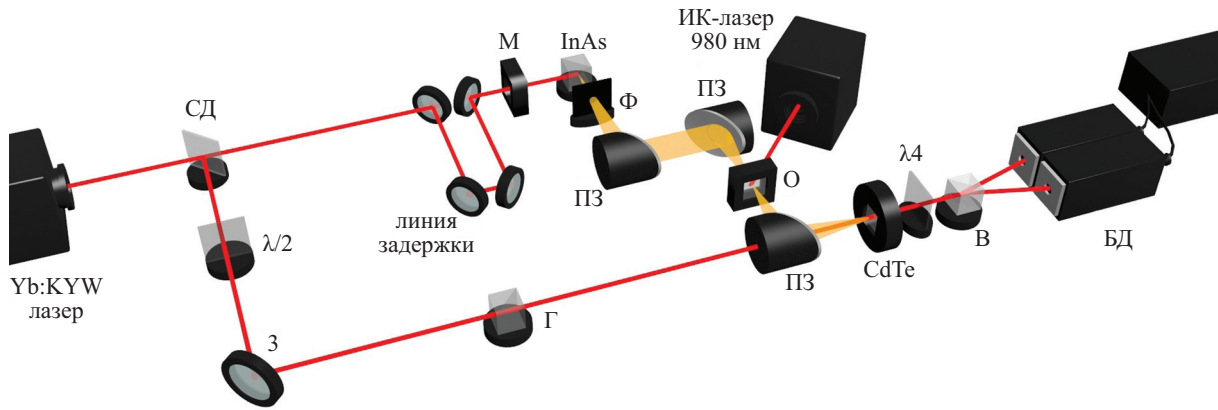


Рис. 6. Схема импульсного терагерцового спектрометра.

СД — светоделитель, З — зеркало, Г — призма Глана, М — модулятор, Ф — фильтр, ПЗ — параболические зеркала, О — образец, В — призма Волластона, БД — балансный детектор

В то же время зондирующий пучок проходит через систему зеркал, полуволновую пластинку ( $\lambda/2$ ) и призму Глана (Г). Последние два элемента требуются для получения строго линейной вертикальной поляризации. После прохождения  $\lambda/2$  и Г зондирующий пучок также падает на кристалл CdTe. При совмещении зондирующего пучка и пучка накачки терагерцовый пучок наводит анизотропию в электрооптическом кристалле CdTe для зондирующего ИК пучка, вследствие чего ИК пучок меняет поляризацию с линейной на эллиптическую. Затем пучок падает на четвертьволновую пластинку ( $\lambda/4$ ), на выходе которой поляризация света становится эллиптической (круговой, при отсутствии терагерцового излучения), далее призмой Волластона (В) разделяется на два ортогонально-линейно-поляризованных луча с разной интенсивностью. Разностный сигнал регистрируется балансным детектором (БД). Величина двулучепреломления прямо пропорциональна напряженности  $E(t)$  терагерцового излучения. Линия задержки нужна для записи временной формы  $E(t)$ . На компьютере записывается временной профиль ТГц импульса.

Для получения спектров пропускания фильтров измеряются временные профили опорного (без фильтра) и объектного (с фильтром) сигналов с последующим применением быстрого фурье-преобразования и расчета отношения модулей комплексных спектральных амплитуд.

## Результаты

Методом, описанным выше, был изготовлен образец режекторного фильтра на основе крестообразных резонаторов (геометрические параметры  $L = 741$  мкм,  $W = 199$  мкм,  $P = 1164$  мкм), с резонансной частотой  $f_r = 0,15$  ТГц и добротностью  $Q = 16$ .

Затем на фильтр со стороны подложки был нанесен слой УНТ толщиной порядка 1 мкм (длина нанотрубок 0,3 мкм, диаметр 1,3 нм). Данный образец с нанесенным слоем УНТ был экспериментально исследован с выключенной оптической накачкой и при оптической накачке на длине волны 980 нм и плотностью мощности  $0,75$  Вт/см<sup>2</sup>. Волновые формы воздуха, пустого фильтра и фильтра с УНТ показаны на рис. 7, а. Для вычисления погрешности измерения волновых форм каждый образец был промерен 5 раз, в каждом измерении каждая точка временной формы измерялась 500 раз. На рис. 7, а представлено среднее значение в каждой точке, относительная погрешность не превышает 3 %. Все три спектра пропускания (без слоя УНТ, со слоем УНТ без накачки и со слоем УНТ с оптической накачкой (ОН)), полученных с помощью фурье-преобразования, представлены на рис. 7, б.

На экспериментально полученном спектре пропускания видны два пика поглощения: основной (на частоте около 0,15 ТГц) и побочный (на частоте порядка 0,275 ТГц). При отсутствии диэлектрической подложки эффект фильтрации (основной пик) связан с откликом ТГц волны, проходящей через массив крестообразных резонаторов из-за резонанса на геометрическом размере крестообразных резонаторов, который имеет максимальную амплитуду на частоте  $f_r$  благодаря согласованию импедансов метаповерхности и окружающей среды на данной частоте [16].

Слой нанотрубок, нанесенный на обратную сторону подложки слабо влияет на резонансную частоту ввиду малой толщины слоя УНТ, однако при помощи оптической накачки мы можем управлять пропусканием на резонансной частоте.

Появление побочного резонанса основано на взаимодействии волн, дифрагированных на периодической структуре метаповерхности, с распространяющимися волновыми модами в подложке, которая ведет себя, как диэлектрический волновод (эффект резонанса волноводной моды).

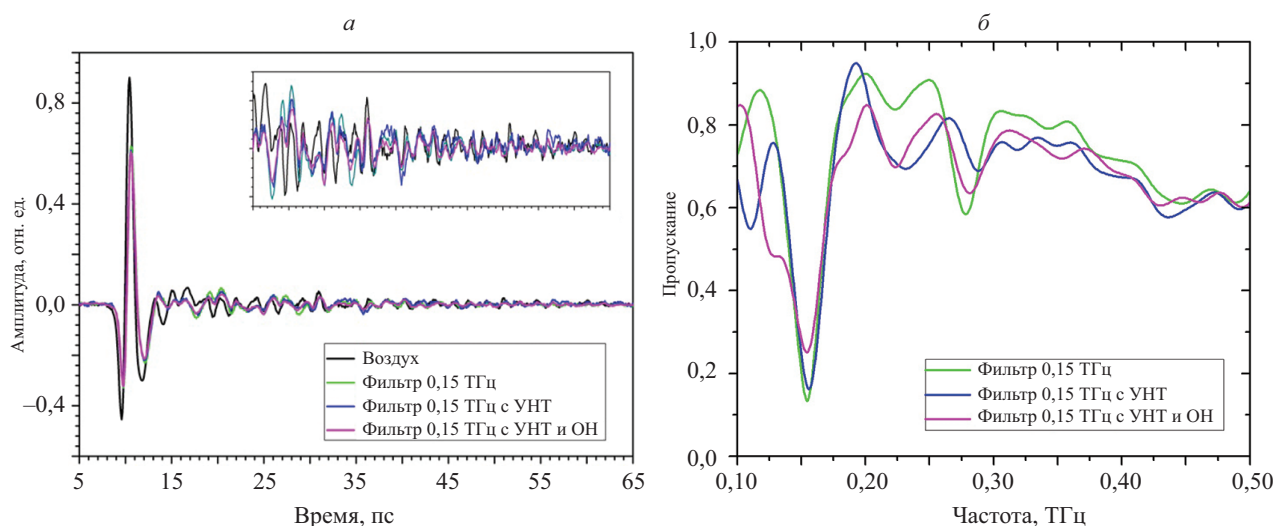


Рис. 7. Волновые формы фильтров (а) и экспериментальные спектры пропускания фильтров (б)

Частота резонансной моды диэлектрического волновода (подложки) будет зависеть от поверхностного импеданса верхней и нижней поверхностей волновода. Соответственно при оптической накачке мы можем изменять импеданс нижней поверхности подложки (на которую нанесен слой УНТ) и, следовательно, менять условие возникновения резонансной моды.

### Заключение

Рассчитаны геометрические параметры крестообразных резонаторов режекторного фильтра с резонансной частотой 0,15 ТГц и добротностью 16. Методом лазерной гравировки изготовлен экспериментальный образец фильтра на подложке из полиэтилентерефталата толщиной 68 мкм с алюминиевым покрытием толщиной 0,5 мкм. На сторону подложки без металла наносился слой углеродных нанотрубок толщиной порядка 1 мкм, и методом импульсной терагерцовой спектроскопии измерялись спектры пропускания пустого фильтра, фильтра со слоем углеродных нанотрубок без накачки и фильтра со слоем углеродных нанотрубок с оптической накачкой на длине волны 980 нм. Экспериментально показано, что нанесенный слой углеродных нанотрубок влияет на пропускание основного максимума и на резонансную частоту побочного максимума (0,275 ТГц), сдвигая его на 9 ГГц в сторону больших частот.

### Литература

1. Borovkova M., Khodzitsky M., Demchenko P., Cherkasova O., Popov A., Meglinski I. Terahertz time-domain spectroscopy for non-invasive assessment of water content in biological samples // *Biomedical optics express*. 2018. V. 9. N 5. P. 2266–2276. doi: 10.1364/BOE.9.002266
2. Kemp M.C., Taday P.F., Cole B.E., Cluff J.A., Fitzgerald A.J., Tribe W.R. Security applications of terahertz technology // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 5070. P. 44–52. doi: 10.1117/12.500491
3. Ahi K., Shahbazmohamadi S., Asadizanjani N. Quality control and authentication of packaged integrated circuits using enhanced-spatial-resolution terahertz time-domain spectroscopy and imaging // *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. V. 104. P. 274–284. doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.07.007
4. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics // *Nature Photonics*. 2016. V. 10. N 6. P. 371–379. doi: 10.1038/nphoton.2016.65
5. Soboleva V.Y., Gomon D.A., Sedykh E.A., Balya V.K., Khodzitskii M.K. Development of narrow bandpass filters based on cross cavities for the terahertz frequency range // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 8. P. 521–524. doi: 10.1364/JOT.84.000521
6. Gomon D., Sedykh E., Rodríguez S., Idelfonso T.M., Zaitsev K., Vozianova A., Khodzitsky M. Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications // *Chinese Optics*. 2018. V. 11. N 1. P. 47–59. doi: 10.3788/CO.20181101.0047

### References

1. Borovkova M., Khodzitsky M., Demchenko P., Cherkasova O., Popov A., Meglinski I. Terahertz time-domain spectroscopy for non-invasive assessment of water content in biological samples. *Biomedical optics express*, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 2266–2276. doi: 10.1364/BOE.9.002266
2. Kemp M.C., Taday P.F., Cole B.E., Cluff J.A., Fitzgerald A.J., Tribe W.R. Security applications of terahertz technology. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5070, pp. 44–52. doi: 10.1117/12.500491
3. Ahi K., Shahbazmohamadi S., Asadizanjani N. Quality control and authentication of packaged integrated circuits using enhanced-spatial-resolution terahertz time-domain spectroscopy and imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 104, pp. 274–284. doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.07.007
4. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nature Photonics*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 371–379. doi: 10.1038/nphoton.2016.65
5. Soboleva V.Y., Gomon D.A., Sedykh E.A., Balya V.K., Khodzitskii M.K. Development of narrow bandpass filters based on cross cavities for the terahertz frequency range. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 8, pp. 521–524. doi: 10.1364/JOT.84.000521
6. Gomon D., Sedykh E., Rodríguez S., Idelfonso T.M., Zaitsev K., Vozianova A., Khodzitsky M. Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications. *Chinese Optics*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 47–59. doi: 10.3788/CO.20181101.0047

7. Grebenchukov A.N., Zaitsev A.D., Khodzitsky M.K. Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene // *Chinese Optics*. 2018. V. 11. N 2. P. 166–173. doi: 10.3788/CO.20181102.0166
8. Chen H.T., O'Hara J.F., Azad A.K., Taylor A.J., Averitt R.D., Shrekenhamer D.B., Padilla W.J. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials // *Nature Photonics*. 2008. V. 2. N 5. P. 295–298. doi: 10.1038/nphoton.2008.52
9. Manceau J.M., Shen N.-H., Kafesaki M., Soukoulis C.M., Tzortzakis S. Dynamic response of metamaterials in the terahertz regime: Blueshift tunability and broadband phase modulation // *Applied Physics Letters*. 2010. V. 96. N 2. P. 021111. doi: 10.1063/1.3292208
10. Liu M., Yin X., Ulin-Avila E., Geng B., Zentgraf T., Ju L., Wang F., Zhang X. A graphene-based broadband optical modulator // *Nature*. 2011. V. 474. N 7349. P. 64–67. doi: 10.1038/nature10067
11. Fan F., Gu W.-H., Chen S., Wang X.-H., Chang S.-J. State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping // *Optics letters*. 2013. V. 38. N 9. P. 1582–1584. doi: 10.1364/OL.38.001582
12. Соболева В.Ю., Гусев С.И., Ходзицкий М.К. Биосенсор на основе метапленки для определения концентрации глюкозы в крови человека // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 3. С. 337–383. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-377-383
13. Соболева В.Ю. Разработка высокочувствительного сенсора на основе метаповерхности для определения концентрации глюкозы в крови человека: дипломная работа. СПб.: Университет ИТМО, 2018.
14. Ferraro A., Zografopoulos D.C., Caputo R., Beccherelli R. Broad and Narrow-Line Terahertz Filtering in Frequency-Selective Surfaces Patterned on Thin Low-Loss Polymer Substrates // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2017. V. 23. N 4. P. 8501308. doi: 10.1109/JSTQE.2017.2665641
15. Moiala A., Nasibulin A.G., Brown D.P., Jiang H., Khriachtchev L., Kauppinen E.I. Single-walled carbon nanotube synthesis using ferrocene and iron pentacarbonyl in a laminar flow reactor // *Chemical Engineering Science*. 2006. V. 61. N 13. P. 4393–4402. doi: 10.1016/j.ces.2006.02.020
16. Medina F., Mesa F., Marques R. Extraordinary transmission through arrays of electrically small holes from a circuit theory perspective // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008. V. 56. N 12. P. 3108–3120. doi: 10.1109/TMTT.2008.2007343
7. Grebenchukov A.N., Zaitsev A.D., Khodzitsky M.K. Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene. *Chinese Optics*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 166–173. doi: 10.3788/CO.20181102.0166
8. Chen H.T., O'Hara J.F., Azad A.K., Taylor A.J., Averitt R.D., Shrekenhamer D.B., Padilla W.J. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2, no. 5, pp. 295–298. doi: 10.1038/nphoton.2008.52
9. Manceau J.M., Shen N.-H., Kafesaki M., Soukoulis C.M., Tzortzakis S. Dynamic response of metamaterials in the terahertz regime: Blueshift tunability and broadband phase modulation. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, no. 2, pp. 021111. doi: 10.1063/1.3292208
10. Liu M., Yin X., Ulin-Avila E., Geng B., Zentgraf T., Ju L., Wang F., Zhang X. A graphene-based broadband optical modulator. *Nature*, 2011, vol. 474, no. 7349, pp. 64–67. doi: 10.1038/nature10067
11. Fan F., Gu W.-H., Chen S., Wang X.-H., Chang S.-J. State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping. *Optics letters*, 2013, vol. 38, no. 9, pp. 1582–1584. doi: 10.1364/OL.38.001582
12. Soboleva V.Yu., Gusev S.I., Khodzitsky M.K. Metafilm-based biosensor for determination of glucose concentration in human blood. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 337–383. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-377-383
13. Soboleva V.Yu. *Designing of a highly sensitive sensor based on the metasurface for determining the concentration of glucose in human blood*: diploma job. St. Petersburg, ITMO University, 2018. (in Russian)
14. Ferraro A., Zografopoulos D.C., Caputo R., Beccherelli R. Broad and Narrow-Line Terahertz Filtering in Frequency-Selective Surfaces Patterned on Thin Low-Loss Polymer Substrates. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 8501308. doi: 10.1109/JSTQE.2017.2665641
15. Moiala A., Nasibulin A.G., Brown D.P., Jiang H., Khriachtchev L., Kauppinen E.I. Single-walled carbon nanotube synthesis using ferrocene and iron pentacarbonyl in a laminar flow reactor. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, no. 13, pp. 4393–4402. doi: 10.1016/j.ces.2006.02.020
16. Medina F., Mesa F., Marques R. Extraordinary transmission through arrays of electrically small holes from a circuit theory perspective. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, vol. 56, no. 12, pp. 3108–3120. doi: 10.1109/TMTT.2008.2007343

#### Авторы

**Гомон Даниэль Александрович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57201268879, ORCID ID: 0000-0002-5799-3379, dagomon@corp.ifmo.ru

**Соболева Виктория Юрьевна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56419656800, ORCID ID: 0000-0003-4994-374X, soboleva.victoriia@mail.ru

**Демченко Петр Сергеевич** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194214776, ORCID ID: 0000-0003-4948-2023, petr.s.demchenko@gmail.com

**Литвинов Егор Александрович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57203339214, ORCID ID: 0000-0003-3667-8545, ealitinov@corp.ifmo.ru

**Шекланова Елизавета Борисовна** — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193545300, ORCID ID: 0000-0001-6502-5370, e.sheklanova@itmo.ru

**Ходзицкий Михаил Константинович** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 16444444600, ORCID ID: 0000-0001-7261-8350, khodzitskiy@yandex.ru

#### Authors

**Daniel A. Gomon** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57201268879, ORCID ID: 0000-0002-5799-3379, dagomon@corp.ifmo.ru

**Victoria Yu. Soboleva** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56419656800, ORCID ID: 0000-0003-4994-374X, soboleva.victoriia@mail.ru

**Petr S. Demchenko** — student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194214776, ORCID ID: 0000-0003-4948-2023, petr.s.demchenko@gmail.com

**Egor A. Litvinov** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57203339214, ORCID ID: 0000-0003-3667-8545, ealitinov@corp.ifmo.ru

**Elizaveta B. Sheklanova** — Scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193545300, ORCID ID: 0000-0001-6502-5370, e.sheklanova@itmo.ru

**Mikhail K. Khodzitskiy** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 16444444600, ORCID ID: 0000-0001-7261-8350, khodzitskiy@yandex.ru