

УДК 535-7

Разработка частотного фильтра с использованием явления полного внутреннего отражения

А.С. Сырнева, В.С. Айрапетян*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

Приведены результаты экспериментального исследования характеристик разработанного частотного фильтра с использованием явления полного внутреннего отражения. Ширина спектра излучения волн видимого диапазона, измеренная с помощью частотного фильтра, сужается в 2 раза ($c\ 18\ \text{см}^{-1}$ до $10\ \text{см}^{-1}$ после прохождения через частотный фильтр).

Ключевые слова: частотный фильтр, явление полного внутреннего отражения, ширина полосы пропускания, интерференционная картина, спектр излучения; frequency filter, total internal reflection phenomenon, bandwidth, interference pattern, radiation spectrum.

Введение

В настоящее время активно разрабатываются интерференционные спектральные приборы с частотными фильтрами с использованием явления полного внутреннего отражения (ПВО) [1–13].

В [1–8] рассмотрены спектральные устройства бегущей волны. Показана возможность реализации в коротковолновой части миллиметрового диапазона лазера на свободных электронах с двухзеркальным резонатором, составленным из модифицированного и традиционного брэгговских зеркал. Разработаны сферические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи, которые могут стать следующим поколением в микрооптике после резонаторов Фабри–Перо.

В [9] предлагается возможность юстировки углового положения граней частотного фильтра за счет его выполнения с поперечной регулируемой узкой щелью, заполненной иммерсионной жидкостью. Также юстировка устройства возможна благодаря наличию мельчайших частиц в воздушном зазоре между четырехгранным кубиком и призмами ввода-вывода излучения.

Цель нашей работы – разработка узкополосных многолучевых интерференционных оптических фильтров различных диапазонов спектра, поверхности которых обладают малыми потерями благодаря полному внутреннему отражению света на границе прозрачных сред с различными показателями преломления.

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования характеристик разработанного частотного фильтра с использованием явления ПВО.

* Александра Сергеевна Сырнева (aleksandra-syrneva@yandex.ru); Валерик Сергеевич Айрапетян (V.S.Ayrapetyan@ssga.ru).

Частотный фильтр с поверхностями ПВО

Разработанное устройство представляет собой частотный фильтр бегущей волны типа «шепчущая галерея» [14, 15] с замкнутой траекторией волны. Его схема приведена на рис. 1, внешний вид показан на рис. 2.

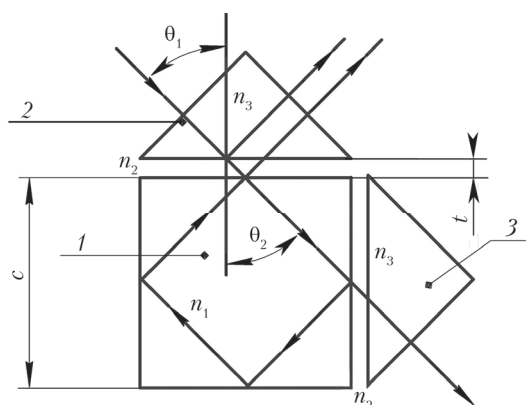


Рис. 1. Схема частотного фильтра с использованием явления ПВО [10, 11]: 1 – кубическая призма с 4 рабочими поверхностями; 2, 3 – призмы ввода-вывода излучения; n_1 и n_3 – показатели преломления призмы 1 и призматических элементов 2, 3 соответственно; n_2 – показатель преломления зазора; t – ширина зазора, позволяющего волне туннелировать в призму 1; c – размер грани призмы 1

Призма (кубик) 1 выполнена из стекла К8; плоскостность ее граней – порядка 0,1 интерференционной полосы. Излучение вводится в кубик 1 через призматический элемент связи 2; они разделены воздушным зазором, позволяющим волне туннелировать в кубик. На гранях кубика волна испытывает полное (внутреннее) отражение. При угле

преломления $\theta = \pi/4$ траектория волны замкнутая. Излучение выводится из кубика через призму 2 либо через вторую призму 3, которая расположена также с возможностью туннелирования волны в нее.

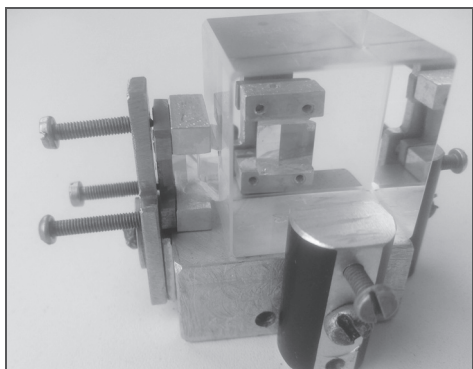


Рис. 2. Частотный фильтр с использованием явления ПВО

При изготовлении плоскопараллельность противоположащих граней кубической призмы может нарушаться. Это приводит к накоплению с каждым проходом по замкнутой траектории отклонения направления световой волны от необходимого, и траектория перестает быть замкнутой. Регулировка воздушного зазора между кубиком и призмами ввода-вывода излучения (юстировка фильтра) осуществляется с помощью регулировочных винтов (см. рис. 2).

Исследование характеристик частотного фильтра с использованием явления ПВО

Характеристики разработанного частотного фильтра с использованием явления ПВО исследовались с помощью стенда, изображенного на рис. 3. Излучение полупроводникового лазера (ЛГН-207А) с длиной волны 654 нм падало на частотный фильтр, установленный с возможностью его наклона и поворота. Лазерное излучение должно падать на катетную грань призмы ввода под прямым углом. Далее оно, выйдя из частотного резонатора, с помощью объектива попадало на матрицу телевизионной камеры. Полученная интерференционная картина обрабатывалась в интерактивной системе Matlab.

На рис. 4 приведены интерференционные картины, формируемые фильтром до и после юстировки. Воздушный зазор между призмой 1 и призмами ввода-вывода 2 и 3 на рис. 4, а меньше, чем на рис. 4, б. Спектры распределения интенсивности излучения по строке данных интерференционных картин представлены на рис. 5 (X — выбираемая строка на интерференционной картине).

Рисунки 4 и 5 позволяют сделать следующий вывод: после юстировки частотного фильтра интерференционная картина становится более резкой, что позволяет с высокой точностью определить спектральные параметры излучения.

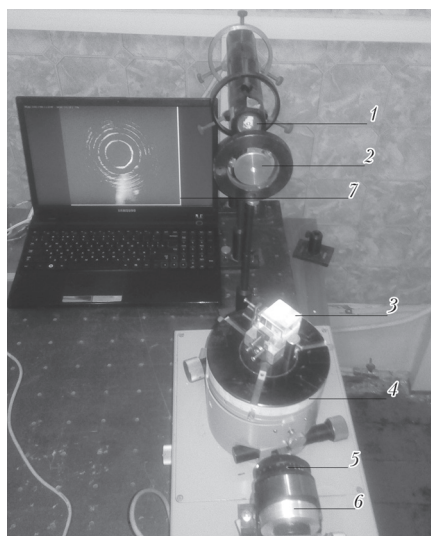


Рис. 3. Стенд для исследования оптических характеристик частотного фильтра: 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3 — частотный фильтр; 4 — столик гониометра; 5 — объектив с фокусным расстоянием 50 мм; 6 — фотоматрица; 7 — ноутбук

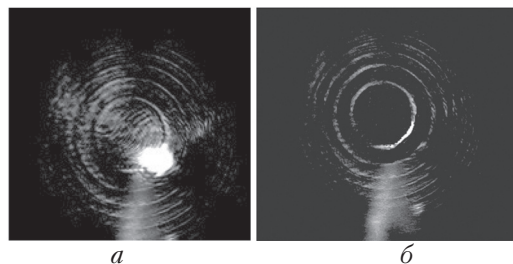


Рис. 4. Интерференционные картины до (а) и после юстировки частотного фильтра (б)

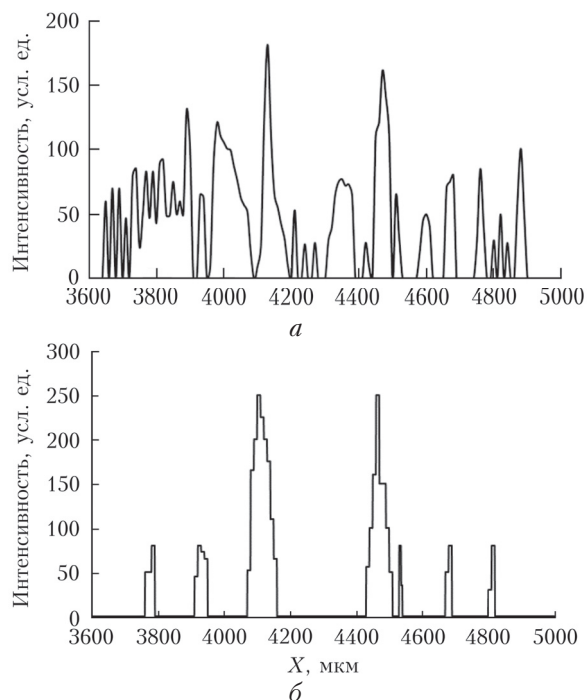


Рис. 5. Спектр распределения интенсивности излучения по строке данных интерференционной картины до (а) и после юстировки частотного фильтра (б)

Характеристики частотного фильтра (длина замкнутой траектории луча $L_0 = 127,28$ мм; фокусное расстояние объектива $f = 0,05$ м)

Параметр	Расчетные значения	Экспериментальные значения
Резкость интерференционной картины	300	324
Разрешающая способность, м	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$9,4 \cdot 10^{-12}$
Ширина полосы пропускания, м	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$2,9 \cdot 10^{-14}$
Диаметр 1-го кольца, мм	0,37	0,42
Диаметр 2-го кольца, мм	0,60	0,66
Диаметр 3-го кольца, мм	0,77	0,79

Была измерена зависимость изменения интенсивности излучения после его прохождения через частотный фильтр от угла поворота последнего (рис. 6). Частотный фильтр, установленный на столике гониометра, поворачивался относительно падающего излучения на 1° . Видно, что при небольшом отклонении от нормального угла падения излучения частотного фильтра на катетную грань призмы ввода излучения интенсивность излучения резко падает.

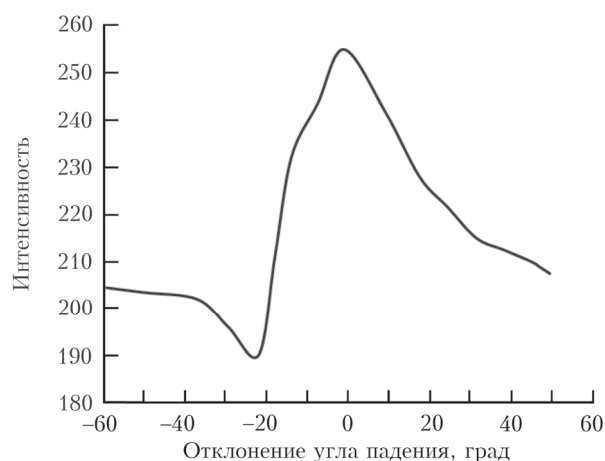
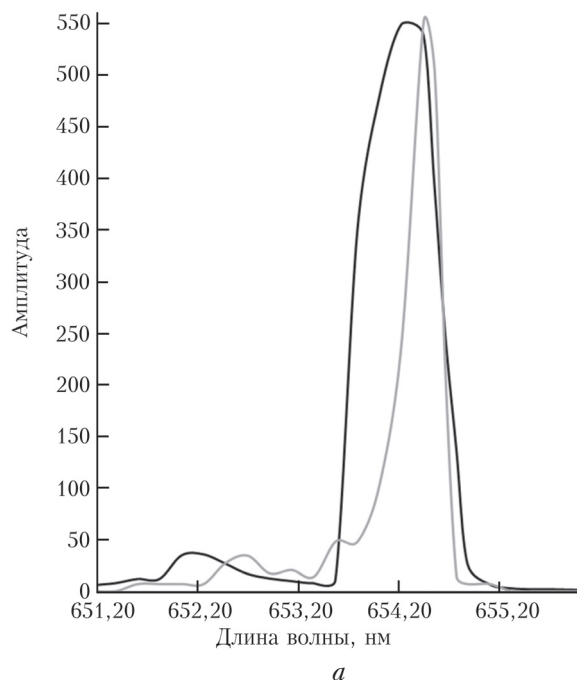


Рис. 6. График зависимости интенсивности от угла поворота частотного фильтра

Из амплитудно-спектральных измерений были определены характеристики частотного фильтра с поверхностями ПВО (табл. 1).



Спектр излучения лазера регистрировался до и после прохождения через частотный фильтр

(рис. 7, а). По формуле $\Delta\nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$ [12, 13] и записанным спектрам была вычислена ширина спектра излучения до и после частотного фильтра. Расчеты подтвердили сужение спектра излучения в 2 раза.

Анализ спектров показывает, что частотный фильтр не искажает форму и не смещает центр спектральной линии излучения полупроводникового лазера.

Также были записаны спектры излучения лазера до и после прохождения через интерферометр Фабри–Перо (рис. 7, б).

В табл. 2 приведены данные экспериментов по сужению спектра полупроводникового лазера

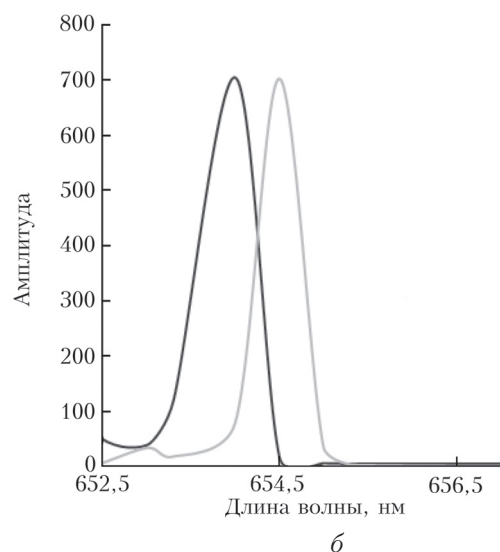


Рис. 7. Спектр излучения полупроводникового лазера до (черная кривая) и после (серая кривая) прохождения через исследуемый частотный фильтр (а) и через интерферометр Фабри–Перо (б)

Таблица 2

Сужение полосы пропускания полупроводникового лазера с помощью интерферометра Фабри–Перо и частотного фильтра

Условия экспериментов	$\Delta\nu$, см ⁻¹
Без ввода диспергирующего элемента в резонатор лазера	18
После ввода интерферометра Фабри–Перо в резонатор лазера	10
После ввода частотного фильтра в резонатор лазера	10

с помощью интерферометра Фабри–Перо и разработанного частотного фильтра. Видно, что результаты совпадают с высокой точностью.

Заключение

Разработан компактный частотный фильтр для лазерного излучения видимого диапазона длин волн, основанный на эффекте полного внутреннего отражения. Исходя из расчетов спектральных параметров, этот частотный фильтр не уступает лучшим образцам диспергирующих устройств.

Высокой эффективности селекции частоты лазерного излучения удалось достичь благодаря использованию разработанной нами кубической призмы с 4 рабочими поверхностями в сочетании со стеклянными призмами ввода и вывода излучения.

Проведенные исследования показали, что созданный частотный фильтр не меняет спектральные и поляризационные характеристики излучения полупроводникового лазера. Форма линии излучения при прохождении через частотный фильтр изменяется незначительно, спектральная ширина излучения в видимом диапазоне сужается в 2 раза.

В целом нам представляется, что разработанный компактный частотный фильтр может быть использован более широко, например, для создания высокоинтенсивного и частотно-перестраиваемого лазерного источника с узкой шириной спектра излучения.

1. *Ginzburg N.S., Zaslavsky V.Yu.* Short-wave sectioned free-electron masers with Bragg resonators based on the

A.S. Syrmeva, V.S. Ayrapetyan. **Design of a frequency filter on the basis of the total internal reflection phenomenon.**

The results of experimental study of characteristics of a frequency filter designed on the basis of total internal reflection phenomenon are presented. The spectral width of semiconductor laser radiation in the visible region measured with this frequency filter two-fold narrows (from 18 to 10 cm⁻¹ after passing through the frequency filter).

- traveling and quasi-critical wave coupling // *Radio-phys. Quantum. Electron.* 2009. V. 52, iss. 8. P. 557–563.
2. *Wilson K.A.* Whispering Gallery Mode Resonator Biosensors // *Encyclopedia of Nanotechnology.* 2016. P. 4387–4401.
3. *Noto M., Vollmer F., Keng D., Teraoka I.* Nanolayer characterization through wavelength multiplexing of a microsphere resonator // *Opt. Lett.* V. 30, iss. 5. P. 510–512.
4. *Ashkenazi S., Chao C.-Y., Guo L.J.* Ultrasound detection using polymer microring optical resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. P. 5418–5420.
5. *Birks T.A., Knight J.C., Dimmick T.E.* High-resolution measurement of the fiber diameter variations using whispering gallery modes and no optical alignment // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2000. V. 12, iss. 2. P. 182–184.
6. *White I.M., Oveys H., Fan X., Smith T.L., Zhang J.* Integrated multiplexed biosensors based on liquid core optical ring resonators and antiresonant reflecting optical waveguides // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 191106–191106-3.
7. *Vahala K.J.* Optical microcavities // *Nature.* 2003. V. 424. P. 839–846.
8. *Armani D.K., Kippenberd T.J., Spillane S.M., Vahala K.J.* Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip // *Nature.* 2003. V. 421. P. 925–928.
9. *Оптический резонатор:* Пат. 2 455 669. Россия, МПК6, G02F 1/01, H01S 3/08, G02B 5/00. Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Сырнева А.С.; СИГА. 2010143257/28; Заявл. 21.01.2010; Опубл. 10.07.12. Бюл. № 19.
10. *Сырнева А.С.* Краевой эффект в фильтрах терагерцового диапазона, использующих нарушенное полное внутреннее отражение / А.С. Сырнева (ред.) // *Сб. материалов III Междунар. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010».* Новосибирск, 2010. Т. 4., ч. 1. С. 214–220.
11. *Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В.* Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной // *Сб. материалов междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП».* Новосибирск, 2010. Т. 7. С. 95–97.
12. *Коломийцов Ю.В.* Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю.В. Коломийцов (ред.). Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
13. *Лебедева В.В.* Экспериментальная оптика / В.В. Лебедева (ред.). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 352 с.
14. *Чуриков В.А.* Кольцевой резонатор для рентгеновского лазера на зеркалах скользящего падения // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15, № 3. С. 271–274.
15. *Макогон М.М., Поплавский Ю.А., Сердюков В.И.* Селективный лазерный резонатор с составными дифракционными решетками // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12, № 2. С. 166–169.