

# Радиофотонный интегральный полосно-пропускающий фильтр на основе брэгговской решетки и кольцевого резонатора

Г.А. Зарецкая, П.Ю. Белявский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в данной работе предложена конструкция оптического интегрального полосно-пропускающего фильтра на основе брэгговской решетки и кольцевого резонатора для радиофотонных применений. Представлены принципы построения структуры и условия формирования требуемых характеристик фильтрации. Методом волновых матриц передачи проведено численное моделирование характеристик фильтрующей структуры, построенной на платформе Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> на частоту фильтрации СВЧ-сигнала 60 ГГц. Показано, что использование амплитудной модуляции и комбинированной фильтрации позволяет реализовать узкую полосу пропускания (менее 1,5%) и при этом обеспечить высокий уровень выходного СВЧ-сигнала.

**Ключевые слова:** радиофотоника, радиофотонный фильтр, полосно-пропускающий фильтр, пространственно-периодическая структура, брэгговская решетка, оптические интегральные волноводы

## 1. Введение

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к созданию интегральных радиофотонных устройств для обработки СВЧ-сигналов. Такие устройства находят применение в телекоммуникационных, радиолокационных и навигационных системах, а также в системах широкополосной передачи информации [1-3]. Одними из ключевых элементов радиофотонных трактов являются фильтрующие устройства, обеспечивающие селекцию сигналов в заданных частотных диапазонах.

Как показывает анализ литературы, наиболее распространёнными решениями являются радиофотонные фильтры на основе интегральных кольцевых резонаторов [4-7]. Такие структуры обладают высокой компактностью, однако характеризуются сравнительно низким уровнем выходного СВЧ-сигнала, что обусловлено использованием фазовой модуляции с малым индексом модуляции [8-10].

Другим перспективным направлением является использование пространственно-периодических структур, в частности брэгговских решеток, позволяющих формировать спектральные характеристики с высокой степенью управляемости [11-16].

В связи с этим актуальной задачей является разработка интегрального радиофотонного фильтра, обеспечивающего одновременно узкую полосу пропускания и высокий уровень выходного СВЧ-сигнала.

## 2. Конструкция и принцип работы радиофотонного фильтра

Для решения поставленной задачи предложена конструкция радиофотонного интегрального фильтра, состоящая из последовательно соединенных монохроматического оптического лазера, амплитудного модулятора, интегральной фильтрующей оптической структуры и фотодетектора.

Интегральная фильтрующая оптическая структура включает в себя две функциональные части: брэгговскую решетку и кольцевой резонатор (см. рисунок 1). Брэгговская решетка, в свою очередь, формируется из чётного числа секций пространственно-периодических структур, образованных периодическим изменением ширины интегрального волновода прямоугольного поперечного сечения. Секции разделены линиями задержки. В результате такой конструкции в полосе заграждения, обусловленной брэгговскими резонансами, формируется полоса пропускания, близкая к прямоугольной.

Период структуры выбирается кратным половине длины волны оптического излучения, а длины отдельных участков определяются выражениями:

$$l_1 = (n / 2 + 1 / 4) \lambda_1, \quad (1)$$

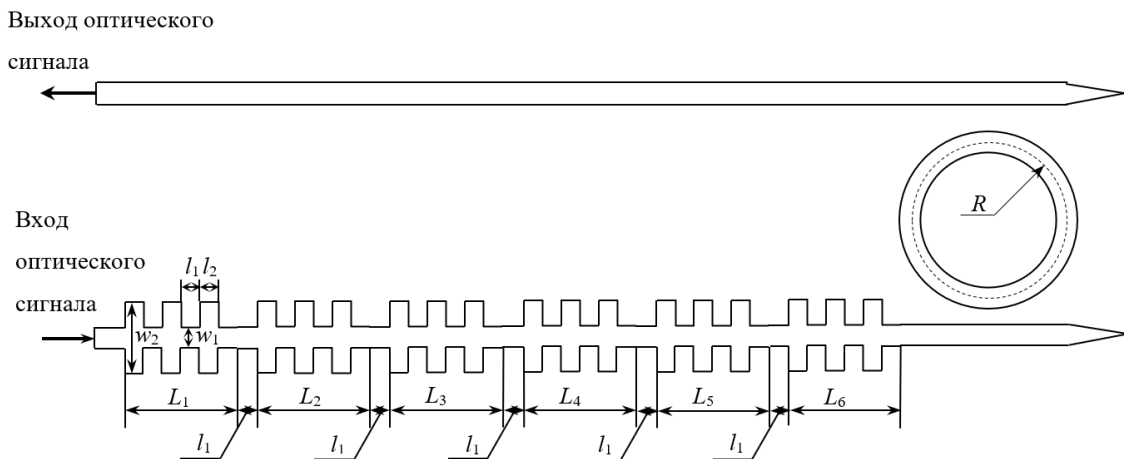
$$l_2 = (m / 2 + 1 / 4) \lambda_2 \quad (2)$$

где  $n$  и  $m$  — целые числа, определяющие параметры фильтрации,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн в соответствующих участках структуры.

Для обеспечения требуемой формы полосы фильтрации выполняется условие согласования длин секций структуры:  $L_1 = L_q$ ,  $L_2 = L_3 = \dots = L_{q-1} = L_1 \cdot 2 = 2 \cdot k (l_1 + l_2)$ , где  $L_i$  — протяжённость участка пространственно-периодической структуры,  $k$  — число периодов в структуре  $L_i$ ,  $q$  — количество пространственно-периодических структур в составе Брэгговской решетки.

Кольцевой резонатор расположен за брэгговской решеткой и спроектирован таким образом, чтобы в пределах полосы пропускания решетки укладывалось три резонансных пика. Центральный резонанс должен совпадать с центральной длиной волны полосы пропускания брэгговской решетки.

Принцип работы фильтра заключается в следующем. Оптическое излучение лазера модулируется СВЧ-сигналом при помощи амплитудного модулятора и поступает на вход фильтрующей структуры. Брэгговская решетка формирует узкую полосу пропускания, подавляя внеполосные составляющие сигнала. Далее сигнал взаимодействует с кольцевым резонатором, обеспечивающим дополнительную селекцию частоты. При совпадении частоты модуляции с областью свободной дисперсии резонатора на выходе фотодетектора формируется СВЧ-сигнал.



**Рисунок 1.** Схематичное представление топологии интегральной фильтрующей оптической структуры

### 3. Топология и результаты моделирования характеристик передачи интегрального оптического полосно-пропускающего фильтра

В ходе моделирования, при помощи математического аппарата волновых матриц передачи, была получена оптимальная топология фильтрующей пространственно-периодической структуры для частоты фильтрации СВЧ-сигнала равной 60 ГГц. Следует отметить, что качестве материала волноводов был выбран нитрид кремния, а в качестве материала окружающего пространства – оксид кремния. При проведении моделирования использовалось значение потерь в нитриде кремния 0,5 дБ/см, а в оксиде кремния 0,2 дБ/км. Основные топологические размеры, пространственно-периодической структуры представлены в таблице 1. Отметим, что итоговое значения радиуса резонатора на частоту фильтрации СВЧ-сигнала 60 ГГц составило 0,388038 мм. Расчетное значение нагруженной добротности –  $1,5 \cdot 10^5$ , что соответствует полосе пропускания СВЧ-сигнала порядка 1,5%.

На рисунке 2 представлен результат численного моделирования АЧХ в оптическом диапазоне сверхвысокочастотного радиофотонного фильтра. Следует отметить, что за частоту 0 ГГц выбрана частота, соответствующая длине волны 1,55 мкм. Результат моделирования характеристик передачи в СВЧ-диапазоне представлен на рисунке 3. При моделировании использовалось сопротивление фотодетектора 50 Ом и чувствительность 0,85 А/Вт.

Из рисунков видно, что использование амплитудной модуляции и комбинированной фильтрации позволяет реализовать узкую полосу пропускания (менее 1,5%) и при этом обеспечить высокий уровень выходного СВЧ-сигнала.

Таблица 1. Основные топологические размеры структур

Параметр	Размер		
	20 ГГц	40 ГГц	60 ГГц
$w_1$	1500 нм	1500 нм	1500 нм
$w_2$	2500 нм	2500 нм	2500 нм
$l_1$	1,06118 мкм	1,06118 мкм	1,06118 мкм
$l_2$	1,079 мкм	1,079 мкм	1,079 мкм
$T$	2,1402 мкм	2,1402 мкм	2,1402 мкм
$k$	81	61	50
$q$	6	6	6

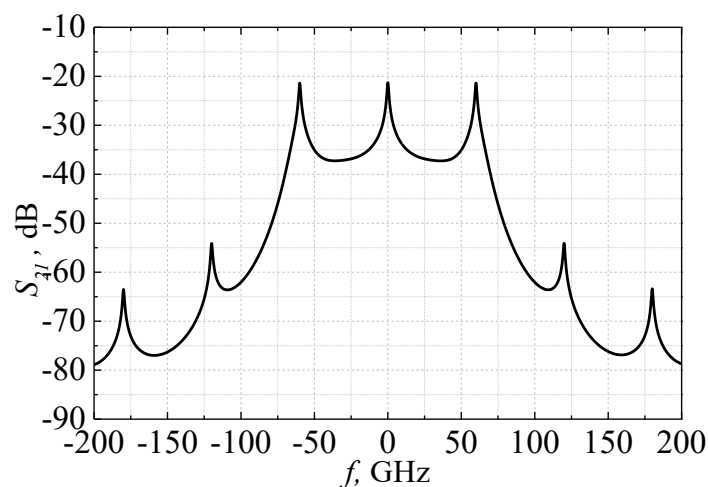
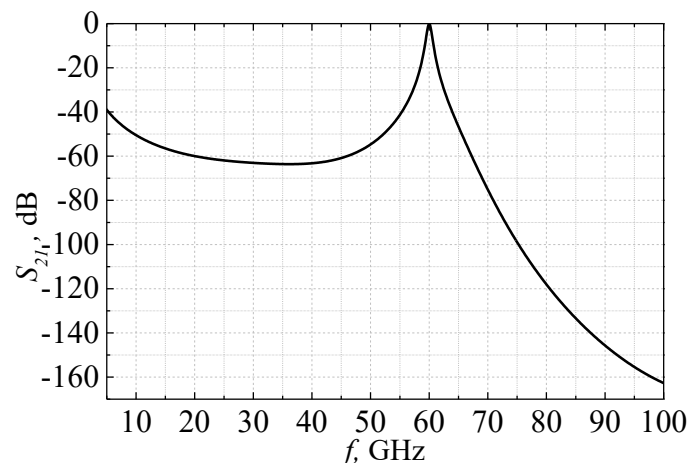


Рисунок 2. АЧХ оптической фильтрующей структуры на частоту фильтрации СВЧ-сигнала 60 ГГц



**Рисунок 3.** Нормализованная характеристика передачи радиофотонного фильтра на частоту фильтрации 60 ГГц в СВЧ-диапазоне

### 3. Заключение

Таким образом работе предложена конструкция радиофотонного интегрального полосно-пропускающего фильтра на основе брэгговской решетки и кольцевого резонатора. Представлены результаты численного моделирования характеристики передачи фильтра с полосой пропускания 60 ГГц.

Предложенная архитектура обеспечивает формирование узкой полосы пропускания, определяемой параметрами кольцевого резонатора, а также эффективное подавление паразитных полос за счет применения брэгговской решетки. В отличие от известных решений, в предложенной конструкции используется амплитудная модуляция, что позволяет увеличить глубину модуляции без появления дополнительных гармоник в спектре сигнала. Это, в свою очередь, приводит к увеличению уровня выходного СВЧ-сигнала.

Предложенная структура обладает высокой степенью интеграции и может быть использована при создании перспективных радиофотонных устройств обработки сигналов в широком диапазоне частот.

#### Список литературы

1. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Nature photonics*. – 2019. – Т. 13. – №. 2. – С. 80-90.
2. Yi X. et al. Integrated microwave photonics for wideband signal processing // *Photonics*. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 46.
3. Pérez D., Gasulla I., Capmany J. Programmable multifunctional integrated nanophotonics // *Nanophotonics*. – 2018. – Т. 7. – №. 8. – С. 1351-1371.
4. Song S. et al. Tunable single passband microwave photonic filter using a cascaded pair of microring resonators // *2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. – 2017. – P. 1-4.
5. Burla M. et al. Ultra-high Q multimode waveguide ring resonators for microwave photonics signal processing // *2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. – 2015. – P. 1-4.
6. Long Y., Wang Y. Ultra-high peak rejection notch microwave photonic filter using a single silicon microring resonator // *Optics express*. – 2015. – Vol. 23. – №. 14. – P. 17739-17750.
7. Liu G. et al. Linearized phase modulated microwave photonic link based on integrated ring resonators // *Optics express*. – 2020. – Т. 28. – №. 26. – С. 38603-38615.
8. Liu L., He M., Dong J., Compact continuously tunable microwave photonic filters based on cascaded silicon microring resonators // *Optics Communications*, Vol. 363, pp. 128-133, 2016

9. Song S., Chew S. X., Yi X., Nguyen L., Minasian R. A., Tunable single-passband microwave photonic filter based on integrated optical double notch filter // *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 36, No. 19, pp. 4557-4564, 2018
10. Palací J., Villanueva G. E., Galán J. V., Martí J., Vidal B., Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator // *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 17, pp. 1276-1278, 2010
11. Зарецкая Г. А., Дроздовский А. В. Интегральный оптический полосно-пропускающий фильтр на основе пространственно-периодической структуры для обработки СВЧ-сигнала // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. – 2021. – Т. 1. – С. 493-496.
12. Karimelahi S. Silicon ring modulators for high-speed optical interconnects : дис. – 2016.
13. Zhang W., Yao J. Silicon-based integrated microwave photonics // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2015. – Т. 52. – №. 1. – С. 1-12.
14. Wang X. et al. Precise control of the coupling coefficient through destructive interference in silicon waveguide Bragg gratings // *Optics letters*. – 2014. – Т. 39. – №. 19. – С. 5519-5522.
15. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design: from devices to systems. – Cambridge University Press, 2015.
16. Yao J., Zhang W. Fully reconfigurable waveguide Bragg gratings for programmable photonic signal processing // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Т. 38. – №. 2. – С. 202-214.