

Интегральный оптический полосно-пропускающий фильтр на основе пространственно-периодической структуры для обработки СВЧ-сигнала

Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе предложены топологии интегрального оптического полосно-пропускающего фильтра на основе пространственно-периодической структуры с полосой 20 ГГц, 40 ГГц и 60 ГГц для обработки СВЧ-сигнала. Показано, что увеличение числа периодов в структуре приводит к уменьшению полосы пропускания и увеличению глубины полосы заграждения.

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

1. Введение

Непрерывно растущие требования, предъявляемые к информационно-телекоммуникационным радиоэлектронным системам для космической, спутниковой и сотовой связи, для передачи сигнала по радиовещательным и телевизионным каналам, для технологий беспроводного доступа, а также других высокочастотных технологий обуславливают необходимость поиска новых способов генерации, хранения, и обработки сигналов гигагерцового и терагерцового диапазонов. Новые устройства должны обеспечивать улучшение таких параметров как пропускная способность, скорость передачи данных, помехоустойчивость и др. Сравнительно недавно было показано, что одним из наиболее перспективных способов достижения таких целей является создание новых СВЧ-устройств на основе принципов радиофотоники [1-3].

Как показывает анализ литературы, наиболее перспективными базовыми элементами радиофотоники являются интегральные волноводные структуры. Платформой для создания таких структур являются полупроводники группы A_3B_5 и соединения кремния, в частности, нитрид кремния [4-5]. Структуры легко интегрируются в радиофотонные тракты и обладают высокой стабильностью. Одними из ключевых элементов радиофотонного и оптического трактов являются системы фильтрации. Зачастую, в качестве основных элементов таких систем используются кольцевые резонаторы на основе оптических волноводов [6-9]. Также огромным потенциалом обладают пространственно-периодические интегральные структуры. Так на базе пространственно-периодических интегральных структур уже реализованы различные модуляторы [10-11] и оптические фильтры [12-14].

В рамках данной работы предлагается топология интегрального оптического полосно-пропускающего фильтра на основе брэгговской решетки для создания перспективных СВЧ-приборов и устройств. Предлагаемый фильтр позволит заменить стандартные элементы фильтрации, такие как оптоволоконные брэгговские решетки. Кроме того, он позволит существенно уменьшить массогабаритные характеристики и в дальнейшем реализовать такие интегральные устройства как генераторы, фазовращатели, мультиплексоры и другие.

2. 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, схематичное изображение топологии, состоящей из шести секций пространственно-периодических структур, представлено на рисунке 1.

Брэгговские решетки в составе интегральной фильтрующей оптической структуры выполнены из четного числа секций, образованных периодическим изменением ширины интегрального волновода прямоугольного поперечного сечения, разделенных между собой линиями задержки. В результате такой конструкции в полосе заграждения, обусловленной брэгговскими резонансами, образуется полоса пропускания близкая к прямоугольной. При этом период изменения ширины интегрального волновода должен быть кратен половине длины волны оптического излучения в структуре, а длины, образованные периодическим изменением ширины интегрального волновода, должны быть кратны четвертьволновой нагрузке и подчиняться выражениям:

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

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

где n и m – произвольные целые числа, определяемые требуемыми характеристиками фильтрации (шириной полосы заграждения и пропускания, подавления в полосе заграждения и другими), λ_1 и λ_2 – длина волны в первом и втором участке периодической структуры на центральной частоте полосы пропускания фильтра. Длина линий задержки между Брэгговскими решетками соответствует l_1 .

Важным является условие $L_1 = L_q$, $L_2 = L_3 = \dots = L_{q-1} = L_1 \cdot 2 = 2 \cdot k (l_1 + l_2)$, обеспечивающее форму полосы фильтрации близкой к прямоугольной, где L_i – протяжённость участка пространственно-периодической структуры, k – число периодов в структуре L_1 , q – количество пространственно-периодических структур в составе Брэгговской решетки.

На рисунке 2 представлены результаты расчета элементов фильтрации на частоты 20 ГГц, 40 ГГц и 60 ГГц, соответственно. В качестве материала волноводов был выбран нитрид кремния, а в качестве материала окружающего пространства – оксид

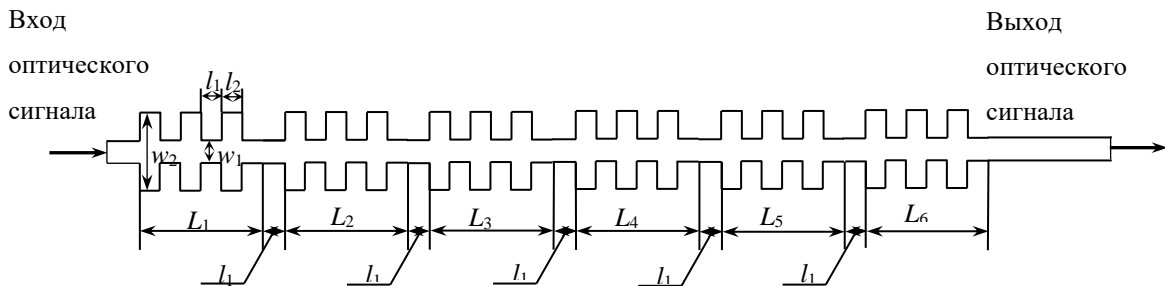


Рисунок 1. Схематичное представление топологии пространственно-периодической структуры

кремния. При проведении моделирования использовалось значение потерь в нитриде кремния 0,5 дБ/см, а в оксиде кремния 0,2 дБ/км. За частоту 0 ГГц выбрана частота, соответствующая длине волны 1,55 мкм. Основные топологические размеры, используемые при моделировании представлены в таблице 1. Из рисунка 2 и таблицы 1 видно, что увеличение числа периодов в структуре приводит к уменьшению

полосы пропускания и увеличению глубины полосы заграждения.

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

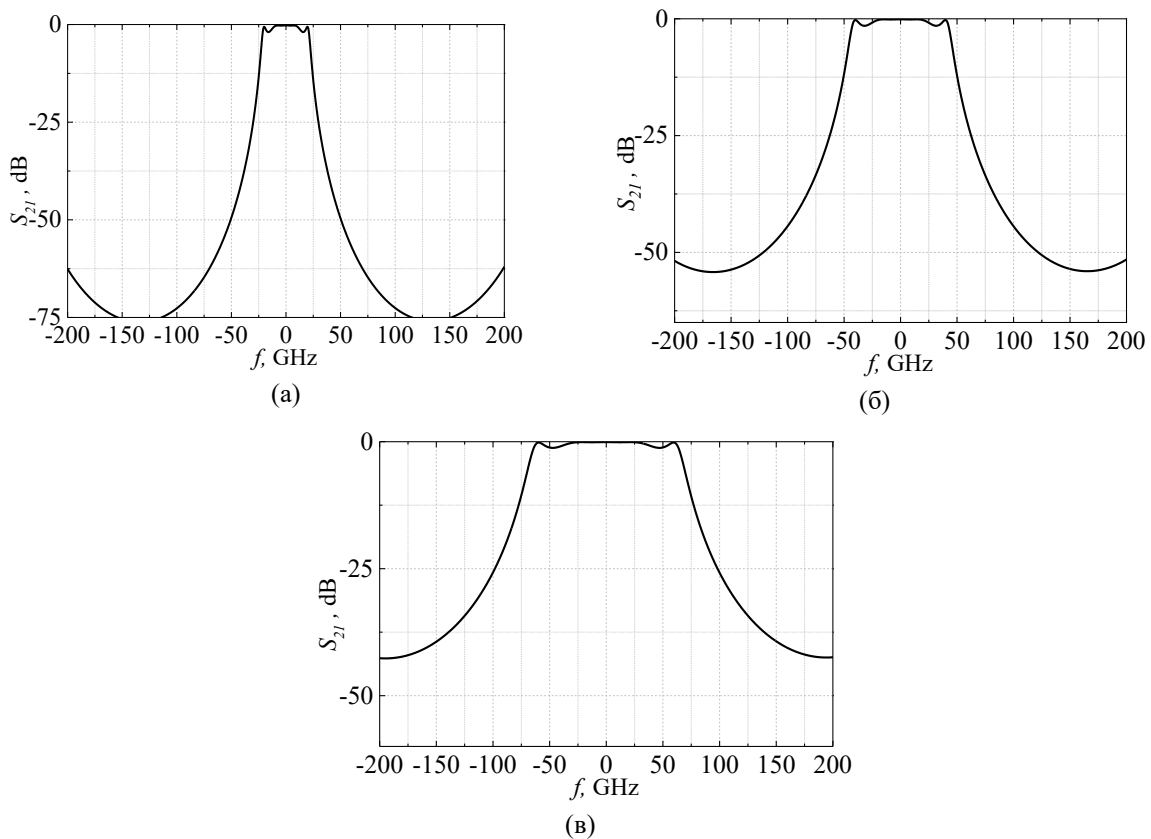


Рисунок 2. АЧХ оптического полосно-пропускающего фильтра: (а) полоса пропускания 20 ГГц, (б) 40 ГГц, (в) 60 ГГц

3. Заключение

Таким образом в работе предложена топология интегрального оптического полосно-пропускающего фильтра на основе пространственно-периодической структуры для обработки СВЧ-сигнала. Представлены результаты расчета характеристик передачи фильтров с полосой пропускания 20 ГГц, 40 ГГц и 60 ГГц. Показано, что увеличение числа периодов в структуре приводит к уменьшению полосы пропускания и увеличению глубины полосы заграждения. При этом узкополосность, вариативность и компактность, по сравнению с оптоволоконными фильтрами, делает привлекательными такие интегральные структуры для различных радиофотонных применений, в частности обработки и генерации СВЧ-сигнала.

Работа частично поддержана **Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).**

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. Roeloffzen C. G. H. et al. Low-loss Si₃N₄ TriPleX optical waveguides: Technology and applications overview //IEEE journal of selected topics in quantum electronics. – 2018. – Т. 24. – №. 4. – С. 1-21.
5. Roeloffzen C. G. H. et al. Silicon nitride microwave photonic circuits //Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 19. – С. 22937-22961.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Liu G. et al. Linearized phase modulated microwave photonic link based on integrated ring resonators //Optics express. – 2020. – Т. 28. – №. 26. – С. 38603-38615.
10. Karimelahi S. Silicon ring modulators for high-speed optical interconnects : дис. – 2016.
11. Zhang W., Yao J. Silicon-based integrated microwave photonics //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2015. – Т. 52. – №. 1. – С. 1-12.
12. 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.
13. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design: from devices to systems. – Cambridge University Press, 2015.
14. 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.