

Влияние уровня подавления левой гармоники фазомодулированного оптического сигнала на значение коэффициента передачи радиофотонного фильтра на основе кольцевого резонатора

Г.А. Зарецкая

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе представлены результаты численного исследования влияния уровня подавления левой гармоники фазомодулированного оптического сигнала на значение коэффициента передачи СВЧ-сигнала радиофотонного фильтра, построенного на оптическом интегральном кольцевом резонаторе. Показано, что в зависимости от уровня подавления гармоники модулированного оптического сигнала возможна реализация его работы как в качестве полосно-заграждающего, так и в качестве полосно-пропускающего СВЧ-фильтра.

Ключевые слова: радиофотоника, радиофотонный фильтр, кольцевой резонатор, оптические интегральные волноводы, фазовая модуляция

1. Введение

Интегральные кольцевые резонаторы, построенные на оптических волноводах, являются ключевыми компонентами современной радиофотоники. Такие резонаторы демонстрируют богатую физику как линейных [1, 2], так и нелинейных [3, 4] волновых явлений. На интегральных оптических резонаторах реализованы различные системы фильтрации радиосигнала. При этом при их реализации используют несколько основных видов модуляции оптического сигнала: амплитудную модуляцию [5, 6], фазовую модуляцию [7, 8] и фазовую модуляцию с частичным подавлением одной из боковых гармоник [9-12].

В то же время влияние подавления одной из боковых гармоник при фазовой модуляции оптического сигнала на характеристики передачи таких систем недостаточно изучено. Поэтому целью данной работы является исследование влияния уровня подавления одной из боковых гармоник радиосигнала на характеристики его передачи в фильтрующей структуре, построенной на оптическом кольцевом резонаторе.

2. Конструкция и принцип работы радиофотонного фильтра

Для решения поставленной задачи рассмотрена конструкция радиофотонного фильтра, состоящая из последовательно соединенных лазера, фазового модулятора, на который поступает монохроматический СВЧ-сигнал, полосно-пропускающего перестраиваемого оптического фильтра, служащего для подавления одной из гармоник оптического излучения, интегральной оптической структуры и фотодетектора. Интегральная оптическая структура состоит из оптического волновода, нагруженного на кольцевой волноводный резонатор (см. рисунок 1). Фазовый модулятор настроен таким образом, чтобы индекс модуляции был много меньше единицы. Несущая частота лазера отстроена от полосы заграждения кольцевого резонатора на требуемую частоту фильтрации СВЧ-сигнала. При совпадении одной из боковых гармоник модулирующего сигнала с полосой

заграждения кольцевого резонатора, в зависимости от величины подавления гармоники модулированного сигнала, будет наблюдаться либо полоса пропускания, либо полоса заграждения на требуемой частоте в СВЧ-диапазоне.

Для конкретности последующих вычислений будем считать, что волноводы в структуре изготовлены из кремния с поперечным сечением $3 \times 0,22$ мкм и окружены однородной средой из оксида кремния. Основные геометрические размеры интегральной оптической структуры представлены в таблице 1, где n_{core} и n_{clad} суть значения показателя преломления микроволновода и окружающего его пространства, α – значение декремента затухания в волноводах. На рисунке 2 показан результат численного расчета частотной зависимости коэффициента передачи структуры. Расчет производился по разработанной оригинальной аналитической теории связи интегральных оптических волноводов прямоугольного сечения. Частоте 0 ГГц соответствует длина волны 1550,975 нм. Следует отметить, что данная структура работает в пересвязанном режиме, следовательно, на частоте резонанса будет происходить скачек фазы равный 2π .

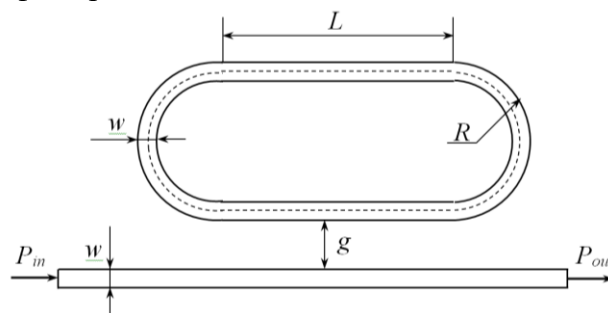


Рисунок 1. Топология резонаторной структуры

Таблица 1. Параметры оптической структуры

n_{core}	3,4756
n_{clad}	1,4438
w, мкм	3
h, нм (высота волноводов)	220
g, нм	140
L, мкм	584,23
R, мкм	450
α, дБ/см	0,22

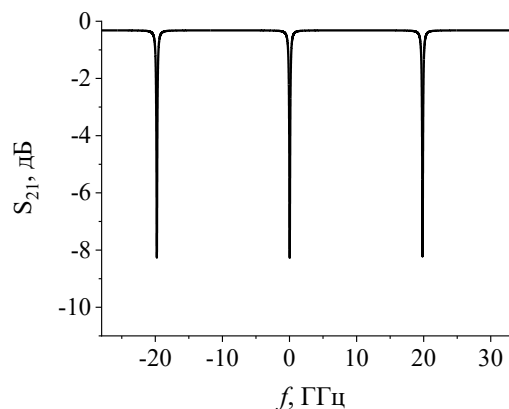


Рисунок 2. Передаточная характеристика оптического кольцевого резонатора

3. Исследование характеристик передачи в СВЧ-диапазоне

Рассмотрим теперь характеристики передачи радиофотонного фильтра, построенного на выбранной интегральной оптической структуре. Оптический сигнал модулированный по фазе с частичным подавлением левой гармоники при условии слабой модуляции монохроматическим СВЧ-сигналом можно представить в виде:

$$a(t) = A_0 \left(J_0(m) \cos(\omega_{opt} t) + J_1(m) \cos\left(\left(\omega_{opt} + \omega_{RF}\right)t\right) - \left(J_1(m) - H_{loss}\right) \cdot \cos\left(\left(\omega_{opt} - \omega_{RF}\right)t\right) \right), \quad (1)$$

где m – индекс модуляции, ω_{opt} – частота оптической несущей, ω_{RF} – частота модулирующего СВЧ-сигнала, A_0 – амплитуда возбуждения, а H_{loss} – значение величины подавления левой гармоники модулированного сигнала.

После прохождения волновода, нагруженного на кольцевой резонатор, сигнал приобретает следующий вид:

$$a(t) = A_0 \left(J_0(m) \cos(\omega_{opt} t) + J_1(m) \cos\left(\left(\omega_{opt} + \omega_{RF}\right)t\right) - \left(J_1(m) - H_{loss}\right) \cdot \cos\left(\left(\omega_{opt} - \omega_{RF}\right)t\right) \right) \cdot |H_{DUT}|, \quad (2)$$

где $|H_{DUT}|$ – модуль коэффициента передачи структуры по амплитуде.

Выходную оптическую мощность можно найти при помощи следующего выражения:

$$P_0 = |a(t)|^2. \quad (3)$$

Приближенное выражение для выходного фототока СВЧ-сигнала получено путем сбора соответствующих слагаемых, содержащихся в (3), и исключения слагаемых, дающих умножение несущей частоты:

$$I_{RF} = 4 \cdot \pi^2 \cdot \mathfrak{R} \left(-2 |H_{DUT}(\omega_{opt} + \omega_{RF})| \cdot (J_1(m) - H_{res}) |H_{DUT}(\omega_{opt} - \omega_{RF})| \cdot J_1(m)^2 + J_0(m) J_1(m) \cdot \left(|H_{DUT}(\omega_{opt} + \omega_{RF})| - (J_1(m) - H_{loss}) |H_{DUT}(\omega_{opt} - \omega_{RF})| \right) \right), \quad (4)$$

где \mathfrak{R} – чувствительность фотодетектора. Тогда значение мощности СВЧ-сигнала на фотодетекторе находится с помощью выражения:

$$P_{RF} = I_{RF}^2 \cdot R_{PD}, \quad (5)$$

где R_{PD} – сопротивление фотодетектора.

Характеристика передачи радиофотонного фильтра в СВЧ-диапазоне при различном значении подавления левой гармоники модулированного оптического сигнала представлена на рисунке 3. Из рисунка видно, что значение глубины полосы заграждения максимально при значении подавления левой гармоники модулированного сигнала равном глубине резонанса, т.е. $H_{loss} = H_{res}$ (см. рисунок 3 (а)). При уменьшении H_{loss} происходит уменьшение глубины резонанса и снижение общего уровня передачи в полосе пропускания фильтра (см. рисунок 3 (б)-(в)). При значении $H_{loss} = 0$ характеристика передачи трансформируется в характеристику передачи полосно-пропускающего фильтра (см. рисунок 4 (г)).

Таким образом мы приходим к выводу, что путем контроля уровня подавления левой гармоники фазомодулированного оптического сигнала возможна реализация

двух режимов работы волновода, нагруженного кольцевым резонатором. Названная интегральная конструкция может работать как в качестве полосно-заграждающего, так и в качестве полосно-пропускающего радиофотонных фильтров.

Заметим, что формула (4) не учитывает изменение фазового набег резонатора в полосе заграждения, учет которого в пересвязанном и недосвязанном режимах будет приводить к уширению полосы фильтрации. В критическом режиме работы для случая $H_{loss} = 0$ резонатор предположительно будет работать в качестве фильтра верхних частот.

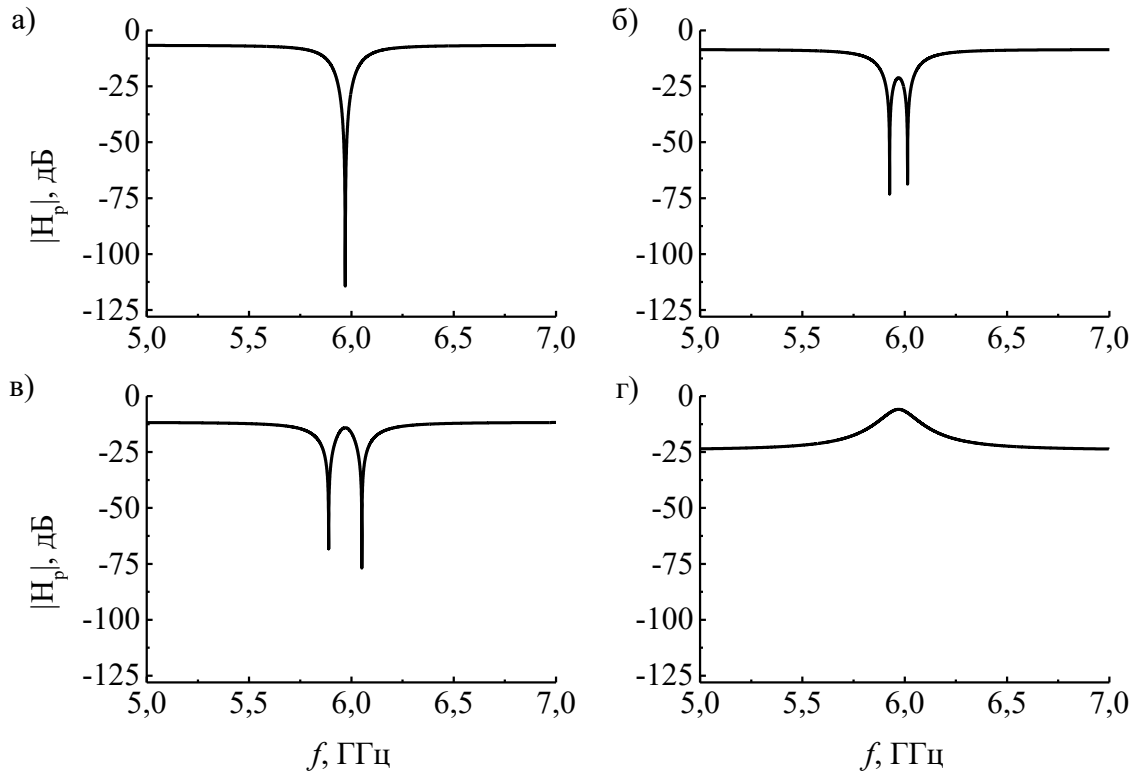


Рисунок 3. Характеристика передачи радиофотонного фильтра: (а) $H_{loss} = H_{res}$, (б) $H_{loss} = 0,75 \cdot H_{res}$, (в) $H_{loss} = 0,5 \cdot H_{res}$, (г) $H_{loss} = 0$

3. Заключение

Таким образом в работе представлены результаты расчета характеристик передачи радиофотонного фильтра, построенного, на интегральной структуре, состоящей из оптического волновода, нагруженного кольцевым резонатором. Произведено численное исследование влияния уровня подавления левой гармоники оптического сигнала, модулированного по фазе монохроматическим СВЧ-сигналом. Показано, что путем контроля уровня подавления левой гармоники фазомодулированного оптического сигнала возможна реализация двух режимов работы волновода, нагруженного кольцевым резонатором. Названная интегральная конструкция может работать как в качестве полосно-заграждающего, так и в качестве полосно-пропускающего радиофотонного фильтра.

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

Список литературы

1. 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.

2. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design: from devices to systems. – Cambridge University Press, 2015.
3. Nikitin, A. A., Vitko, V. V., Cherkasskii, M. A., Ustinov, A. B., & Kalinikos, B. A. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities //Results in Physics. – 2020. – T. 18. – C. 103279.
4. Nikitin, A. A., Kondrashov, A. V., Vitko, V. V., Ryabcev, I. A., Zaretskaya, G. A., Cheplagin, N. A., ... & Kalinikos, B. A. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. – 2021. – T. 480. – C. 126456.
5. Rasras M. S. et al. Demonstration of a tunable microwave-photonic notch filter using low-loss silicon ring resonators //Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Vol. 27. – №. 12. – P. 2105-2110.
6. Perentos A. et al. Variable carrier reduction in radio-over-fiber systems for increased modulation efficiency using a Si₃N₄ tunable extinction ratio ring resonator //Optics Express. – 2012. – Vol. 20. – №. 23. – P. 25478-25488.
7. 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.
8. Palací J. et al. Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator // IEEE Photonics Technology Letters. – 2010. – Vol. 22. – №. 17. – P. 1276-1278.
9. 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.
10. Marpaung D. et al. Si₃N₄ ring resonator-based microwave photonic notch filter with an ultrahigh peak rejection //Optics express. – 2013. – Vol. 21. – №. 20. – P. 23286-23294.
11. Marpaung D. et al. Ultrahigh suppression and reconfigurable RF photonic notch filter using a silicon nitride ring resonator //2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications. – 2014. – P. SF2O.
12. 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.