университет «ЛЭТИ»

Перестраиваемые оптоэлектронные активные многокольцевые резонаторы

Представлена теоретическая модель, описывающая резонансные частоты перестраиваемого оптоэлектронного генератора на оптической и спин-волновой линиях задержки. В теоретической модели оптическая линия задержки имеет две конфигурации. Первая конфигурация была образована параллельно соединенными оптическими волноводами различной длины. Вторая – последовательным соединеннем оптических волноводов, замкнутых в кольца. Получены передаточные характеристики для генераторов обеих конфигураций. В работе представлены результаты численных расчетов передаточных характеристик для схем, содержащих одну, две и три оптических линий задержки. Проведено сравнение расчетов для случаев параллельного и последовательного соединения.

Ключевые слова: многокольцевой оптоэлектронный резонатор, спин-волновая линия задержки

Развитие радиоэлектроники привело к созданию стабильных, малошумящих оптоэлектронных генераторов СВЧ-сигнала. Принцип действия СВЧ оптоэлектронных или радиофотонных генераторов состоит в циркуляции сигнала в кольцевой схеме, включающей сверхвысокочастотный и оптический тракты. Одно из преимуществ оптоэлектронных генераторов (ОЭГ) в сравнении с обычными СВЧ-генераторами обусловлено увеличением полосы перестройки и уменьшением уровня фазовых шумов [1, 2], хотя, на первый взгляд, одновременная реализация таких рабочих характеристик является невозможной. Наиболее простым способом реализации ОЭГ является создание высокодобротного кольцевого резонатора с большим частотным расстоянием между резонансными гармониками и обратной связью, обеспечивающей выполнение баланса амплитуд. Заметим, что с физической точки зрения любой ОЭГ вблизи порога самовозбуждения представляет собой резонатор.

Резонансные частоты в классической конфигурации оптоэлектронного кольцевого резонатора (ОКР), построенного на оптической линии задержки, определяются фазовым сдвигом и регенерацией мощности в цепи обратной связи, содержащей СВЧ-усилитель и полосно-пропускающий фильтр. В такой конфигурации частота генерации определяется резонансными частотами кольца, для которых выполняется условие баланса амплитуд, то есть коэффициент усиления в разомкнутом контуре больше единицы [3, 4]. Увеличение длины оптической линии задержки обеспечивает увеличение времени задержки и повышение добротности резонатора, а, следовательно, и снижение уровня фазового шума генератора. Однако одновременно с этим уменьшается область свободной дисперсии (ОСД), что приводит к появлению паразитных мод в спектре генерации и увеличению требования к ширине полосы пропускания СВЧ-фильтра.

Для устранения названного противоречия была предложена многокольцевая конфигурация, состоящая из нескольких волоконно-оптических линий задержки различной длины [5, 6]. Так, в работе [5] проведено исследование генератора, содержащего несколько волоконно-оптических линий задержки (ВОЛЗ), включенных параллельно. В работе [6] исследован фильтр, образованный путем последовательного соединения оптических микроволноводов, замкнутых в кольцо.

электронно-управляемых ОЭГ Для реализации необходимо использовать перестраиваемые СВЧ-фильтры. В частности, в качестве перестраиваемого СВЧ-фильтра может выступать спин-волновая линия задержки, которая обеспечивает как частотную селективность, так и перестройку резонансных частот под воздействием магнитного поля [7, 8]. Внесение спин-волновой линии задержки в многокольцевые схемы ОЭГ требует разработки теоретических моделей. учитывающих особенности спектров электромагнитных волн в оптических волноводах и спиновых волн в ферритовых волноводах, на которых построены спин-волновые линии задержки.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию передаточных характеристик спин-волновых оптоэлектронных многокольцевых резонаторов двух конфигураций. Первая конфигурация основана на параллельном соединении оптических волноводов, вторая — на последовательном соединении оптических волноводов, замкнутых в кольца. Схемы исследуемых резонаторов показаны соответственно на Рис. 1.а и 1.б.



Рис. 1.

Исследуемые резонаторы представляют собой кольцевые схемы, состоящие из оптического и радиочастотного трактов. Оптический тракт включает в себя лазерный диод $(\Pi \square)$, электрооптический модулятор (\mathcal{OOM}), связанные оптические волноводы длиной l_j и фотодетектор ($\mathcal{O}\square$). В параллельной конфигурации оптический сигнал делится на оптическом разветвителе с коэффициентом деления η_j (см. Рис.1.а). В последовательной конфигурации кольцевые резонаторы связаны направленными ответвителями с коэффициентом связи κ_j (см. Рис. 1.б). Основными элементами радиочастотного тракта в обоих случаях являются СВЧ усилитель (G), а также СВЧ-фильтр, выполненный на спинволновой линии задержки ($CB \Pi 3$).

Опишем предлагаемую теоретическую модель многокольцевого резонатора. Комплексный коэффициент передачи рассчитывается как отношение комплексный амплитуд выходного $A_{out}(\omega)$ и входного сигналов $A_{in}(\omega)$:

$$\mathbf{H}(\omega) = A_{out}(\omega) / A_{in}(\omega). \tag{1}$$

Будем считать входной сигнал $A_{in}(\omega)$ монохроматическим. Пусть для определенности фаза входного сигнала в начальный момент времени равна нулю:

$$A_{in}(\omega) = A_0 e^{i\omega t}.$$
 (2)

Рассмотрим особенности распространения оптического сигнала в ОКР обеих конфигураций. В схеме, приведенной на Рис.1.а, часть сигнала, определяемая коэффициентом деления η_j , распространяется в волноводе длиной l_j , при этом $\sum_{j} \eta_j = 1$.

После прохождения оптического волновода сигнал приобретает набег фазы, определяемый длиной волновода и его дисперсионной характеристикой. Перед фотодетектором сигналы складываются и суммарный сигнал распространяется по остальным элементам ОКР. Тогда коэффициент передачи параллельного соединения M оптических волноводов $T_p(\omega)$ описывается следующим выражением:

$$\mathbf{T}_{p}(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{j=1}^{M} \eta_{j} e^{-i\left(k_{opt_{j}}(\boldsymbol{\omega}) - i\alpha_{opt_{j}}(\boldsymbol{\omega})\right)l_{j}},$$
(3)

где $k_{opt j}(\omega)$ – волновое число в оптическом волноводе с номером j, $\alpha_{opt j}(\omega)$ – декремент пространственного затухания в соответствующем волноводе, а l_j – его длина.

В схеме, приведенной на рис. 1.б, оптический сигнал последовательно проходит через волноводы длиной l_j , замкнутые в кольца. При этом коэффициент связи κ_j определяет долю сигнала, переизлучаемую в следующий кольцевой резонатор. В этом случае коэффициент передачи $\mathbf{T}_s(\omega)$ *М* волноводов, замкнутых в кольца, описывается следующим выражением:

$$\mathbf{T}_{s}(\boldsymbol{\omega}) = \prod_{j=1}^{M} \kappa_{j} \sum_{q=1}^{\infty} \left(1 - \kappa_{j}\right)^{q-1} e^{-iq\left(k_{opt_{j}}(\boldsymbol{\omega}) - i\alpha_{opt_{j}}(\boldsymbol{\omega})\right) l_{opt_{j}}}.$$
(4)

Оптический сигнал поступает на фотодетектор, который выделяет СВЧ-огибающую. Далее СВЧ-сигнал распространяется через элементы СВЧ-тракта. Прохождение сигнала через СВ ЛЗ описывается волновым множителем $e^{-i(k_{SW}(\omega)-i\alpha_{SW}(\omega))l_{SW}}$, где $k_{SW}(\omega)$ – волновое число несущих спиновых волн, $\alpha_{SW}(\omega)$ – декремент пространственного затухания, а l_{SW} – длина СВ ЛЗ. После спин-волновой линии задержки СВЧ-сигнал подается на СВЧ-усилитель, используемый для компенсации потерь на распространение в элементах ОКР. Прохождение сигнала через СВЧ-усилитель описывается волновым множителем, который в предположении, что усилитель не вносит дополнительного фазового сдвига, имеет вид $e^{g(\omega)}$.

Выходной сигнал $A_{out}(\omega)$ будем считать результатом суперпозиции бесконечного числа циркулирующих в кольце затухающих волн:

$$A_{out}(\omega) = A_0 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left(\mathbf{T}(\omega) \right)^n e^{-i \left(k_{sw}(\omega) - i \alpha_{sw}(\omega) \right) l_{sw}} e^{ng(\omega)} \right],$$
(5)

где **Т**(ω) коэффициент передачи последовательной или параллельной конфигурации.

Используя вышеописанный математический аппарат, комплексный коэффициент передачи (1) можно представить в виде:

$$\mathbf{H}(\omega) = \sqrt{|H_p(\omega)|} \exp(i\varphi(\omega)), \tag{6}$$

где $H_p(\omega)$ – передаточная характеристика по мощности, а $\phi(\omega)$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

Попутно заметим, что разработанная теоретическая модель применима для моделирования передаточных характеристик резонаторов, содержащих не только оптоволоконные, но другие оптические задержки линии, например, микроволноводные, а также и другие СВЧ линии задержки, например, выполненные на основе поверхностных акустических волн.

Рассмотрим теперь частный случай. Для определенности в качестве оптического волновода выберем одномодовое оптическое волокно, а в качестве ферритового волновода – пленку железо-иттриевого граната (ЖИГ), намагниченную в плоскости перпендикулярно направлению распространения спиновых волн. Последнее соответствует случаю поверхностных спиновых волн. В качестве законов дисперсии для оптического сигнала в волоконно-оптическом кабеле выбран закон дисперсии в приближении слабонаправленного волновода [9], а для поверхностной спиновой волны – закон дисперсии [10]. Декремент пространственного затухания волны в волоконно-оптическом кабеле считался постоянным и равным 0.2 dB/км, а в случае поверхностной спиновой волны волны волны рассчитывался стандартным образом [10].

Рассмотрим передаточные характеристики параллельной и последовательной конфигураций многокольцевого резонатора, представленные на Рис. 1.а и б, соответственно, для случая одно-, двух- и трехкольцевой схемы. Моделирование проводилось для типичных параметров одномодового оптического волокна с диаметром d = 8 мкм и эффективным показателем преломления n_{eff} =1.4677. При расчетах использовались следующие параметры СВ ЛЗ: намагниченность насыщения $M_0 = 835$ Гс, полуширина линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.5$ Э, толщина ферритовой пленки L = 16.6 мкм, расстояние между спин-волновыми антеннами $l_{sw} = 3$ мм и напряженность внешнего магнитного поля $H_0 = 1045$ Э. Расчеты проведены для коэффициента усиления, для которого выполняется условие $g - A = -\delta$, где $A - суммарные потери СВЧ-сигнала за один оборот от входа к выходу, а <math>\delta$ – положительная величина. Физический смысл $\delta = 0$ – это порог автогенерации. В расчетах величина δ была выбрана малой постоянной величиной, обеспечивающей одинаковую величину коэффициента усиления разомкнутого контура.

Результаты численного расчета передаточных характеристик $H_n(\omega)$ для одно-, двух- и трехкольцевых резонаторов с параллельным включением оптических линий задержки показаны на Рис. 2. Передаточные характеристики однокольцевого оптоэлектронного резонатора на ВОЛЗ длиной 1 км, 500 м и 100 м показаны на Рис. 2.а, 2.6 и 2.в, соответственно. Передаточная характеристика двухкольцевого оптоэлектронного резонатора с равномерным делением мощности (т.е. $\eta = 1/2$), содержащего две ВОЛЗ длиной 500 м и 1 км, а также 100 м и 1 км, показана на Рис. 2.г и 2.д, соответственно. Характеристика трехкольцевого оптоэлектронного резонатора с равномерным делением мощности (т.е. $\eta = 1/3$), включающего все три ВОЛЗ длиной 1 км, 500 м и 100 м, показана на Рис. 2.е. Видно, что передаточная характеристика однокольцевого резонатора состоит из набора резонансных частот. Как известно, увеличение длины ВОЛЗ в таком случае приводит к возрастанию добротности и уменьшению ОСД. Объединение двух однокольцевых резонаторов на длинной и короткой ВОЛЗ приводит к частотной селекции. Наибольшей добротностью обладают те резонансные гармоники для которых выполняется условие синфазной интерференции оптических сигналов. В случае, если это условие не выполняется, происходит подавление оптического сигнала. Максимальное подавление выполняется в случае противофазной интерференции (Рис. 2.г и д). Использование трехкольцевой схемы обеспечивает возможность дополнительного подавления паразитных гармоник в спектре резонансных частот (см. Рис. 2.е). Из приведенных рисунков видно, что ВОЛЗ с наибольшей длиной обеспечивает высокую добротность ОКР, в то время как остальные ВОЛЗ обеспечивают подавление паразитных гармоник.



Результаты численного расчета передаточных характеристик $H_{n}(\omega)$ для одно-, двух- и трехкольцевых резонаторов с последовательным включением кольцевых резонаторов при коэффициенте связи к = 0.2 показаны на Рис. 3. По аналогии с предыдущим случаем на Рис. З.а, З.б и З.в показаны передаточные характеристики однокольцевых резонаторов на ВОЛЗ длиной 100 м, 500 м и 1 км, соответственно. Передаточные характеристики двухкольцевых резонаторов на ВОЛЗ длиной 500 м / 1 км и 100 м / 1 км показана на Рис. 3. г и 3.д, соответственно. Передаточная характеристика последовательно включенного трехкольцевого резонатора на ВОЛЗ длиной 100 м, 500 м и 1 км показана на Рис. З.е. Однокольцевые резонаторы в данной конфигурации вследствие слабой связи имеют более высокую добротность по сравнению с предыдущим случаем. Из Рис. 3 видно, что последовательное включение дополнительных кольцевых резонаторов приводит к частотной избирательности резонансных гармоник, а, следовательно, к увеличению ОСД. В случае двухкольцевой схемы происходит ослабление таких гармоник, которые не удовлетворяют условию резонанса в одном из колец (Рис. 3.г и д). В случае трехкольцевой схемы происходит дополнительное подавление паразитных гармоник в спектре резонансных частот. На Рис. 4 представлены результаты численного моделирования добротностей одно-, двух- и трехкольцевых резонаторов с параллельной конфигурацией ВОЛЗ (красные квадраты на Рис. 4) и с последовательным соединение ВОЛЗ, замкнутых в кольца (черные треугольники на Рис. 4). Как видно из данного рисунка, добротность резонатора с параллельным соединением ВОЛЗ уменьшается при линий Отличительной добавлении более коротких задержки. особенностью последовательной конфигурации является увеличение добротности при объединении кольцевых резонаторов. Таким образом, использование многокольцевых схем в последовательной конфигурации обеспечивает не только подавление побочных гармоник, но и повышение добротности. Отметим, что в обеих конфигурациях изменение магнитного поля от 760 Э до 2100 Э обеспечивает перестройку резонансного спектра в диапазоне 3-7 ГГц.



Рис. 4.

Разработана теоретическая модель, описывающая передаточные характеристики спин-волновых многокольцевых параллельной и оптоэлектронных резонаторов с последовательной конфигурацией. Проведено моделирование математическое передаточных характеристик оптоэлектронных спин-волновых многокольцевых резонаторов на примере одной, двух и трех оптических линий задержки, выполненных из одномодового оптического волокна различной длины и спин-волновой линии задержки на пленке ЖИГ. Исследована возможность подавления побочных гармоник в спектре резонансных частот исследуемых резонаторов. В результате работы показано, что последовательное соединение оптических линий задержки, замкнутых в кольцо, позволяет увеличить добротность многокольцевого резонатора в сравнении с конфигурацией параллельного включения. Полученные результаты могут быть использованы для создания малошумящих перестраиваемых оптоэлектронных СВЧ-генераторов.

Теоретическая модель была разработана при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 16-12-10440), а математическое моделирование выполнялось при поддержке Министерства Образования и Науки (проект «Госзадание»).

Библиографический список

1. X. S. Yao and L. Maleki, "Optoelectronic microwave oscillator," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 13, № 8, 1996, pp. 1725-1735.

2. M. E. Belkin, A. V. Loparev, Y. Semenova, G. Farrell, and A. S. Sigov, "Tunable RF-band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer-added design model for its simulation," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 53, № 11, 2011, pp. 2474-2477.

3. J. Hong, S. Zhanga, S. Yaoa, Z. Lia, and Q. Luo, "Comparison of both type injection locked and parallel dual-loop OEO," Opt.-Int. J. for Light and Elect. Opt., vol. 126, № 23, 2015, pp. 4410-4413.

4. D. Eliyahu and L. Maleki, "Low phase noise and spurious level in multi-loop opto-electronic oscillators," Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proc. of the 2003 IEEE Int., IEEE, 2003, pp. 405-410.

5. X. S. Yao and L. Maleki, "Multiloop optoelectronic oscillator," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 36, № 1, 2000, pp. 79-84.

6. J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, B. E. Little, R. A. Wilson, and P. T. Ho, "Higher order filter response in coupled microring resonators" // IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, № 3, 2000, pp. 320-322.

7. A. B. Ustinov, A. A. Nikitin, and B. A. Kalinikos, "Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator," IEEE Magnetics Letters, vol. 6, 2015, pp. 1-4.

8. A. B. Ustinov, A. A. Nikitin, and B. A. Kalinikos, "Electronically tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator," Technical Physics, vol. 60, № 9, 2015, pp. 1392-1396.

9. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. под ред Агравал Г.//П. В Мамышева.-М.-1996.-324 с.

10. D. D. Stancil, A. Prabhakar, "Spin Waves: Theory and Applications", Springer, 2009, 330 p.