Витько В.В., Никитин А.А., Мартынов М.И., Устинов А.Б.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

## Теоретическое исследование активного кольцевого резонатора, содержащего спин-волновую и волоконно-оптическую линии задержки

Представлена теоретическая модель, описывающая спектр активного кольцевого резонатора, содержащего спин-волновую и две волоконно-оптические линии задержки. Проведено численное моделирование передаточных характеристик резонатора для случаев, когда он включал спин-волновую линию задержки и две волоконно-оптические линии задержки. Исследовано влияние дополнительных волоконно-оптических линий задержки на передаточные характеристики активных кольцевых резонаторов.

## Ключевые слова: двухкольцевой оптоэлектронный резонатор, спин-волновая линия задержки

Оптоэлектронный резонатор является наиболее перспективных одним из функциональных устройств СВЧ радиофотоники [1]. Значительный интерес к таким устройствам обусловлен возможностью их использования в составе кольцевых оптоэлектронных генераторов со сверхнизкими значениями фазового шума [2, 3]. В общем случае кольцевой оптоэлектронный СВЧ резонатор состоит из лазерного модуля, электрооптического модулятора излучения, волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ), фотодетектора, оптического или СВЧ усилителя и узкополосного фильтра, частотозадающего который выполняет функцию элемента И обеспечивает монохроматическую генерацию. Известно, что увеличение длины ВОЛЗ приводит к снижению фазового шума [4]. В отличие от активного кольцевого резонатора, включающего одну ВОЛЗ, использование двухкольцевых и многокольцевых резонаторов, содержащих несколько ВОЛЗ, приводит к следующему преимуществу: длинная ВОЛЗ обеспечивает необходимый уровень фазового шума, а короткая линия выполняет функцию частотной селекции и «разряжает» спектр резонансных частот [5]. Для реализации электронной перестройки частоты генерации необходимо использование перестраиваемого по частоте фильтра, например, на сферах или пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) [6, 7].

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию передаточных характеристик активных кольцевых резонаторов на основе спин-волновых и волоконнооптических линий задержки с двумя оптическими кольцами. Для этого была разработана теоретическая модель, описывающая режим формирования спектра перестраиваемого оптоэлектронного СВЧ активного кольцевого резонатора, схема которого представлена на рис.1. Исследуемый резонатор представляет собой кольцевую схему, состоявшую из оптического и радиочастотного трактов. Оптический тракт включает в себя лазерный диод (LED), электрооптический модулятор (EOM), оптический разветвитель ( $T_2$ ), две ВОЛЗ разной длины  $l_{opt1}$  и  $l_{opt2}$ , выполненные из одномодового оптического волокна, волоконно-оптический сумматор ( $T_3$ ) и фотодетектор (PD). Основными элементами радиочастотного тракта являются СВЧ усилитель (G), частично компенсирующий потери в кольце, и СВЧ фильтр (SW), выполненный на основе спин-волновой линии задержки.



Рис. 1. Схема активного кольцевого резонатора, содержащего спин-волновую и волоконно-оптическую линии задержки.

Опишем предлагаемую теорию гибридного активного кольцевого 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)

Выходной сигнал  $A_{out}(\omega)$  будем считать результатом суперпозиции бесконечного числа циркулирующих в кольце затухающих волн. СВЧ сигнал, распространяющийся через различные элементы кольцевого резонатора, описывается волновым множителем  $e^{-i(k(\omega)-i\alpha(\omega))l}$ , где  $k(\omega)$  – волновое число,  $\alpha(\omega)$  – декремент пространственного затухания, а 1 – длина соответствующего элемента кольца. В точках соединения элементов кольца происходит полное или частичное отражение СВЧ сигнала. На практике все СВЧ элементы кольца могут быть согласованы, а длина соединительных СВЧ кабелей минимальна. Поэтому мы пренебрегаем отражениями в радиочастотном тракте и набегом фазы в соединительных СВЧ кабелях. Однако отметим, что эффекты отражения в волоконно-оптическом кабеле, описываемые коэффициентами отражения  $R_1$  и  $R_4$ , играют особую роль и их необходимо учитывать. В приведенной на рис.1 схеме часть сигнала, пропорциональная коэффициенту передачи T2, распространяется по ВОЛЗ длиной lopt1, а оставшаяся часть (1 - T<sub>2</sub>) распространяется по ВОЛЗ длиной *lopt2*. Перед фотодетектором оба сигнала складываются и частично отражаются, пропорционально коэффициенту отражения  $R_3$ . Отраженный сигнал делится пропорционально коэффициенту передачи  $T_3$  и отражается от лазерного модуля пропорционально коэффициенту отражения R<sub>1</sub>. Выше под коэффициентами отражения и передачи мы понимаем коэффициенты отражения и передачи по амплитуде.

Результирующий СВЧ сигнал на выходе с учетом эффектов отражения может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} A_{out}(\omega) &= A_0 \Biggl[ \sum_{n=1}^{\infty} (1 - R_4)^n (T_2 e^{-iK_{opt1}(\omega)l_{opt1}} + (1 - T_2)e^{-iK_{opt2}(\omega)l_{opt2}})^n e^{-iK_{sw}(\omega)nl_{sw}} \times \\ e^{ng(\omega)} \Biggl( 1 + \sum_{m=1}^{\infty} R_1^m R_4^m (T_2 e^{-iK_{opt1}(\omega)l_{opt1}} + (1 - T_2)e^{-iK_{opt2}(\omega)l_{opt2}})^m \times \\ (T_3 e^{-iK_{opt1}(\omega)l_{opt1}} + (1 - T_3)e^{-iK_{opt2}(\omega)l_{opt2}})^m \Biggr)^n \Biggr] e^{i\omega t}, \end{aligned}$$
(3)

где  $K_{opt1}(\omega) = k_{opt1}(\omega) - i\alpha_{opt1}$ ,  $K_{opt2}(\omega) = k_{opt2}(\omega) - i\alpha_{opt2}$ ,  $K_{sw}(\omega) = k_{sw}(\omega) - i\alpha_{sw}(\omega)$ . Тут и ниже индексы *opt* и *sw* отвечают соответственно оптической и спиновой волнам.

Для конкретных расчетов волновые числа и декременты пространственного затухания электромагнитной волны в волоконно-оптическом кабеле и спиновой волны в ферромагнитной пленке могут быть найдены из соответствующих законов дисперсии. Например, для электромагнитной волны, распространяющейся в волоконно-оптическом кабеле, в приближении слабонаправляющего волновода закон дисперсии находится из [8], а для поверхностной спиновой волны закон дисперсии в магнитостатическом приближении из [9]. Декремент пространственного затухания волны в волоконно-оптическом кабеле считался постоянным и равным 0.2 dB/км, а в случае поверхностной спиновой волны рассчитывался следующим образом [9]:

$$\alpha_{sw}(\omega) = 2\pi |\gamma| \omega \Delta H \cdot L^{-1} \left( \left( \omega_H + \omega_M / 2 \right)^2 - \omega^2 \right)^{-1}, \tag{4}$$

где  $\Delta H$  – полуширина кривой ферромагнитного резонанса.

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

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\omega}) = \left| \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\omega}) \right| \exp(i\varphi(\boldsymbol{\omega})), \tag{5}$$

где  $|H(\omega)|$  – передаточная функция по амплитуде, а  $\phi(\omega)$  – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

На первом этапе было проведено численное моделирование передаточной характеристики активного кольцевого резонатора, построенного только на спин-волновой линии задержки. Соотношение (3) в этом случае значительно упрощается и переходит в соотношение, ранее полученное в работе [10]. На рис. 2 представлен результат численного моделирования коэффициента передачи при следующих значениях параметров:  $\Delta H = 0.5$  Э,  $H_0 = 1500$  Э,  $M_0 = 1750$  Г, G = 6 dB, L = 5 мкм,  $l_{sw} = 5$  мм.



Рис. 2. Передаточная характеристика активного кольцевого резонатора, построенного только на спин-волновой линии задержки.

Как видно из рисунка, спектр частот не является эквидистантным. Расстояние между первым и вторым резонансными пиками составляет 5.818 МГц, а между третьим и четвертым пиками 5.676 МГц, что объясняется особенностью дисперсии поверхностных спиновых волн в спин-волновой линии задержки.

Для исследования влияния ВОЛЗ на спектр резонансных частот активного кольцевого резонатора было проведено численное моделирование передаточных характеристик. Результаты представлены на рис. 3 для двух групп случаев, когда в кольцевую схему включены:

1. ВОЛЗ длиной  $l_{opt1} = 1000$  м (а), либо ВОЛЗ длиной  $l_{opt2} = 100$  м (б), либо две ВОЛЗ ( $l_{opt1}$  и  $l_{opt2}$ ) с коэффициентами передачи  $T_2 = T_3 = 0.5$  (в);

2. Спин-волновая линия задержки длинной  $l_{sw} = 5$  мм и ВОЛЗ длиной  $l_{opt1} = 1000$  м (в), либо ВОЛЗ длиной  $l_{opt2} = 100$  м (г), либо две ВОЛЗ ( $l_{opt1}$  и  $l_{opt2}$ ) с коэффициентами передачи  $T_2 = T_3 = 0.5$  (д). Расчет проводился при параметрах спин-волновой линии задержки, представленных выше, и параметрах ВОЛЗ без учета отражения в оптическом тракте:  $\alpha_{opt1} = \alpha_{opt2} = 0.2$  dB/км,  $\sqrt{\varepsilon} = 1.4677$ ,  $R_1 = 0$ ,  $R_4 = 0$ .





Из результатов моделирования следует, что в случае активного кольцевого резонатора, выполненного на основе только ВОЛЗ, спектр частот является эквидистантным с расстоянием между резонансными пиками 200 кГц для длины  $l_{opt1} = 1000$  м и 200 МГц для  $l_{opt2} = 100$  м. Когда к длинной ВОЛЗ подключается через делитель короткая волоконно-оптическая линия, то происходит частотная селекция резонансных частот (рис. 3 (в)).

Включение в радиочастотный тракт спин-волновой линии задержки приводит к уменьшению расстояния между резонансными пиками и увеличению вносимых потерь. Как видно из рис. 3 (д), резонансные пики уширяются, что вызвано дисперсией, вносимой спинволновой линией задержки. Однако, реализация схемы с двумя ВОЛЗ уменьшает это влияние. В этом случае магнитная перестройка резонансной частоты составляет 0,91 МГц при изменении внешнего магнитного поля на 5 Э.

Из проведенного исследования следует, что одновременное использование двух ВОЛЗ и спин-волновой линии задержки позволяет реализовать частотную селекцию и магнитную перестройку резонансной частоты за счет управления дисперсией спинволновой линии задержки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-01296).

## Библиографический список

1. Yao J. Microwave photonics //Lightwave Technology, Journal of. – 2009. – T. 27. – №. 3. – C. 314-335.

2. Saleh K. et al. Phase noise performance comparison between optoelectronic oscillators based on optical delay lines and whispering gallery mode resonators //Optics express. – 2014. – T. 22. – №. 26. – C. 32158-32173.

3. Ji Y., Yao X. S., Maleki L. Compact optoelectronic oscillator with ultra-low phase noise performance //Electronics Letters. – 1999. – T. 35. – №. 18. – C. 1554-1555.

4. Davidson T. et al. High spectral purity CW oscillation and pulse generation in optoelectronic microwave oscillator //Electronics Letters. – 1999. – T. 35. – №. 15. – C. 1260-1261.

5. Eliyahu D., Maleki L. 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. Proceedings of the 2003 IEEE International. – IEEE, 2003. – C. 405-410.

6. Eliyahu D., Maleki L. Tunable, ultra-low phase noise YIG based opto-electronic oscillator //Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International. – IEEE, 2003. – T. 3. – C. 2185-2187.

7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Electronically tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator //Technical Physics. – 2015. – T. 60. – №. 9. – C. 1392-1396.

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

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

10. Никитин А. А. и др. Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик //Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – №. 7. С. 98-101.