

Устинов А.Б., Никитин А.А., Витько В.В., Калиникос Б.А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

Перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный СВЧ генератор монохроматического сигнала

Экспериментально исследован перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный СВЧ генератор монохроматического сигнала. Разработана теоретическая модель, описывающая коэффициент передачи и фазо-частотную характеристику с учетом отражения сигнала от оптических элементов активного кольца. Рассчитана зависимость уровня фазовых шумов от отстройки от частоты несущей. Определена экспериментальная зависимость фазового шума от коэффициента усиления в кольце. Показана возможность магнитной перестройки несущей частоты сигнала для данного типа генераторов.

Ключевые слова: оптоэлектронный СВЧ генератор, фазовый шум.

Оптоэлектронный генератор, в общем случае, представляет собой кольцевую схему содержащую оптический и СВЧ тракты. Собственные частоты такой колебательной системы образуют многомодовый спектр. Для выделения отдельной моды используются высокодобротные резонаторы с низкими фазовыми шумами. Частотная перестройка может осуществляться за счет управляемого СВЧ фильтра, ранее в качестве таких фильтров использовались сферы ЖИГ [1-3], работающие на явлении ферромагнитного резонанса.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование спин-волнового оптоэлектронного СВЧ генератора монохроматического сигнала. В отличие от предыдущих работ в данном направлении, узкополосный фильтр реализован с применением СВЧ линии задержки на эпитаксиальной пленке ЖИГ. В основе работы такого частотно-избирательного элемента лежит механизм распространения спиновых волн, который определяет распространение сигнала в оптическом и СВЧ трактах.

Исследуемый спин-волновой оптоэлектронный генератор имеет кольцевую схему (рис. 1), состоящую из двух трактов: радиочастотного и оптического. Оптический тракт генератора состоит из лазерного модуля с длиной волны оптического излучения 1.55 мкм; электрооптического модулятора, волоконно-оптического кабеля; полупроводникового фотодетектора. Основными элементами радиочастотного тракта являются СВЧ усилитель (на практике использующийся совместно с переменным аттенуатором для контроля коэффициента усиления) и спин-волновая линия задержки на основе эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Для возбуждения и приема спиновых волн используются микрополосковые антенны, нанесенные на подложку из поликора.

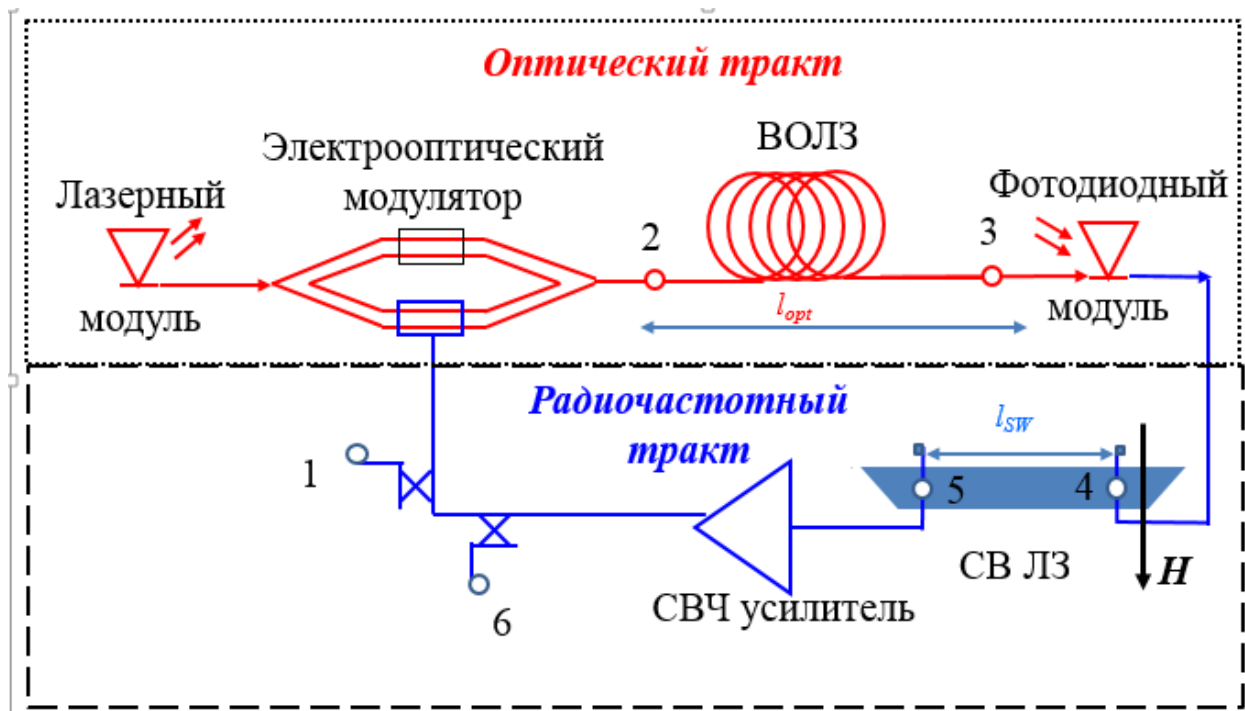


Рис. 1. Блок-схема оптоэлектронного СВЧ-генератора на спин-волновой и волоконно-оптической линиях задержки.

Комплексный коэффициент передачи рассчитывается как отношение комплексных амплитуд выходного $A_{out}(\omega)$ и входного сигналов $A_{in}(\omega)$:

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

Входной сигнал $A_{in}(\omega)$ будем считать монохроматическим с начальной фазой равной нулю (в точке 1 на рис. 1). Тогда выходной сигнал $A_{out}(\omega)$ (в точке 6 на рис. 1 будет результатом суперпозиции бесконечного числа циркулирующих в кольце затухающих волн.

С учетом классического представления комплексного коэффициента передачи

$$\mathbf{H}(\omega) = |H(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)), \quad (2)$$

где $|H(\omega)|$ – передаточная функция по амплитуде, а $\varphi(\omega)$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами, коэффициент передачи по мощности принимает следующий вид:

$$H_p(\omega) = \frac{1}{2} \frac{(1-\Gamma_3)^2 e^\xi}{\cosh(\xi) - (1-\Gamma_3) \cos(\Phi) + \Gamma_3 e^\xi \left(\frac{\Gamma_3}{2} - 1 \right) + \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\xi_{opt}} S}, \quad (3)$$

где $\xi(\omega) = g(\omega) - \alpha_{sw}(\omega)l_{sw} - \alpha_{opt}l_{opt}$ – суммарные потери на распространение,

$\Phi(\omega) = k_{sw}(\omega)l_{sw} + k_{opt}(\omega)l_{opt}$ – суммарный фазовый набег

$S = \left(\frac{\Gamma_2 \Gamma_3}{2} e^{-2\xi_{opt}} - \cos(2\phi_{opt}) \right) e^{-\xi} + (1-\Gamma_3) \cos(\Phi - 2\phi_{opt})$, $\phi_{opt} = k_{opt}l_{opt}$, $\xi_{opt} = \alpha_{opt}l_{opt}$.

Фазу коэффициента передачи активного кольца в общем виде можно представить как

$$\varphi(\omega) = \arctan \left[\frac{\sin(\Phi) - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\xi_{opt}} \sin(\Phi - 2\phi_{opt})}{(1-\Gamma_3) e^\xi - \cos(\Phi) + \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-2\xi_{opt}} \cos(\Phi - 2\phi_{opt})} \right] \pm n\pi. \quad (4)$$

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.

В соответствии с формулой (4), спектр оптического резонатора представляет собой практически эквидистантный ряд частот, в котором спин-волновая ЛЗ выполняет функцию частотной селекции. При этом положение максимума АЧХ гибридного оптоэлектронного резонатора определяется АЧХ спин-волнового элемента. Из выражений (4) и (5) следует, что такие параметры спин-волновой ЛЗ, как толщина пленки и расстояние между антеннами, определяют полосы пропускания спин-волнового элемента. Следует также учитывать увеличение потерь на распространение спиновых волн при возрастании времени задержки. Отметим, что это возможно только в случае ненулевого коэффициента отражения от фотодиода $\Gamma_3 \neq 0$, что всегда выполняется на практике.

Основным преимуществом автогенератора, построенного на гибридном оптоэлектронном резонаторе, является перестройка частоты генерации за счет изменения внешнего магнитного поля H_0 . Такая перестройка носит ступенчатый характер, что объясняется переключениями между соседними резонансными частотами гибридного ОЭГ при изменении H_0 .

Частотную зависимость фазового шума генератора рассчитывали при помощи известной формулы:

$$L(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2} H_p(f) S_\psi(f) \right), \quad (5)$$

где $S_\psi(f)$ – спектральная плотность источников шума, а $H_p(f)$ – модуль коэффициента передачи по мощности (4).

Для экспериментального исследования спин-волнового оптоэлектронного генератора был изготовлен прототип, оптическая часть которого состояла из следующих элементов: полупроводникового лазера с длиной волны 1,55 мкм, электрооптического модулятора Маха-Цендера, оптического волокна длиной 1013 м и полупроводникового фотодетектора. Верхний предел по частоте для модулятора и фотодетектора был равен 20 ГГц. Основными элементами СВЧ тракта являлись: два идентичных СВЧ усилителя с диапазоном 4-8 ГГц и спин-волновой СВЧ фильтр. Общий коэффициент усиления регулировался с помощью переменного аттенюатора.

В качестве спин-волнового фильтра использовалась монокристаллическая пленка ЖИГ толщиной 13,6 мкм, выращенная при помощи жидкофазной эпитаксии на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Намагниченность насыщения пленки феррита составляла 1750 Гс. Спиновые волны в такой пленке возбуждались микрополосковыми антеннами, расстояние между которыми было равно 4,5 мм. Внешнее магнитное поле прикладывалось нормально по отношению направления распространения спиновых волн. Несущая частота такого фильтра регулировалась посредством изменения величины магнитного поля.

На рис. 2(а) представлен результат эксперимента при постоянной величине внешнего магнитного поля равной 1146 Э. Коэффициент усиления G_{th} был равен 45,2 дБ. Расстояние между соседними резонансными пиками, выделенными спин-волновым фильтром, составило 199,4 кГц, что соответствует полному времени задержки сигнала в 5,004 мкс (4,959 мкс в оптическом тракте и 45 нс в СВЧ тракте соответственно). В данном случае видно, что происходит монохроматическая генерация, когда выполняется условие баланса фаз и амплитуд, при этом боковые частоты, для которых такие условия не были выполнены, подавляются более чем на 40 дБ.

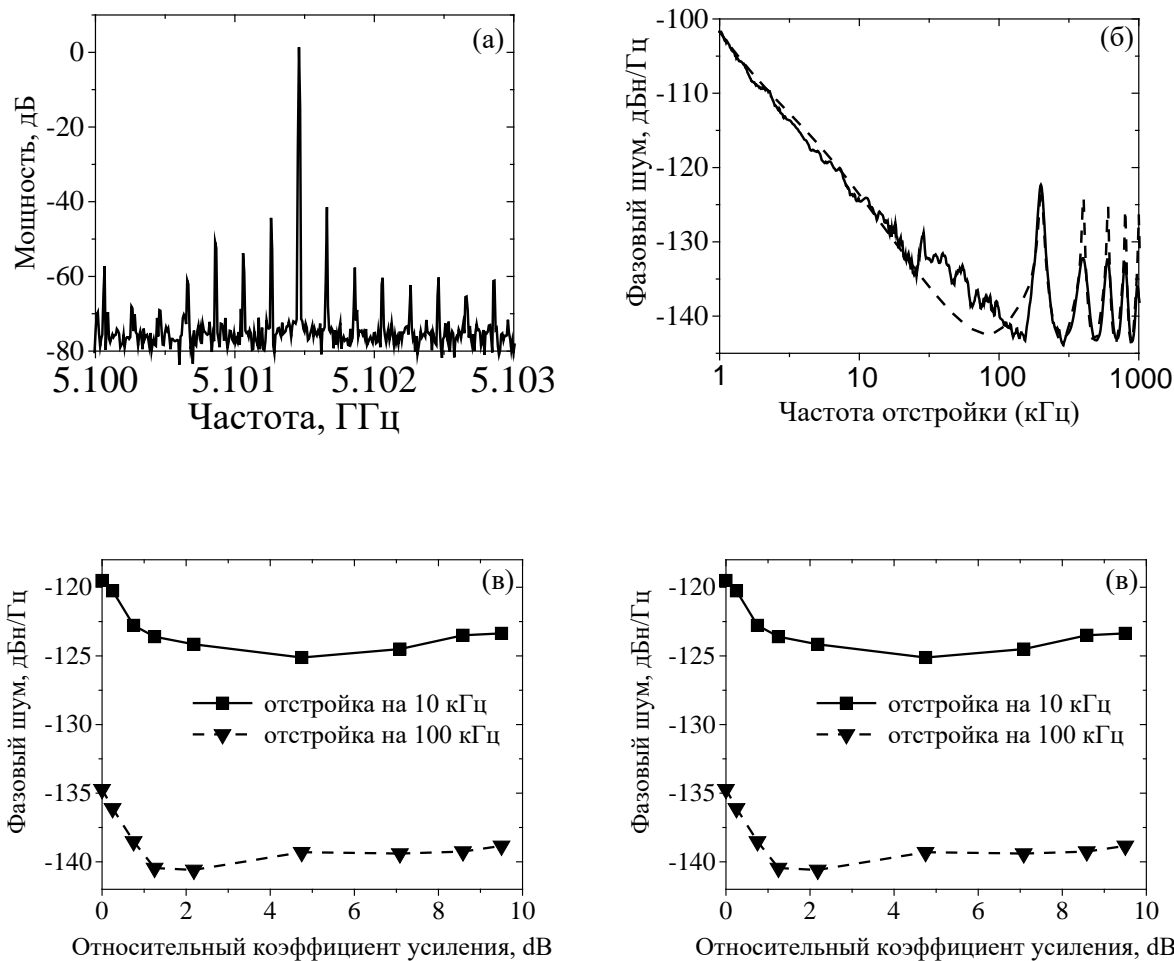


Рис. 2. Спектр генерации (а), спектр фазового шума (б), зависимость фазового шума на отстройках 10 и 100 кГц от несущей (в) и зависимость частоты и фазового шума от частоты генерации (г).

На рис. 2(б) изображено сравнение экспериментальной характеристики уровня фазовых шумов с результатами численного моделирования. В результате экспериментального исследования уровня фазовых шумов были получены величины в -124 дБ и -140 дБ при отстройке на 10 и 100 кГц соответственно. На характеристике видны спектральные составляющие на больших отстройках, которые соответствуют соседним шумовым гармоникам в спектре генерации.

Результаты измерения и расчета функции фазового шума от величины коэффициента усиления представлены на рис. 2(в). Для удобства, реперной точкой равной нулю был выбран коэффициент усиления, при котором происходит переход в режим автогенерации. Сначала увеличение уровня усиления в кольце приводит к уменьшению фазовых шумов, вследствие возрастания стабильности при небольшом превышении порога автогенерации. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к возрастанию уровня фазовых шумов, что находится в соответствии с теорией [4].

Изменение величины магнитного поля от 804 до 2129 Э обеспечивало перестройку частоты генерируемого монохроматического сигнала в диапазоне от 4 до 8 ГГц (см. рис. 2(г)), который был ограничен лишь полосой усилителя.

Из проведенного исследования следует, что разработанный перестраиваемый спиволновой оптоволоконный СВЧ генератор имеет конкурентно способные характеристики по сравнению с существующими аналогами. Реализованный в экспериментах метод

магнитной перестройки может быть распространен на другие типы оптоэлектронных генераторов. При этом для понижения уровня фазовых шумов можно предложить увеличение времени задержки сигналов не только в оптическом, но и в спин-волновом радиочастотном тракте.

Библиографический список

1. 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. – С. 405-410.
2. Белкин М. Е., Лопарев А. В. Оптоэлектронный генератор—первое практическое устройство сверхвысокочастотной оптоэлектроники //Электроника НТБ. – 2010. – №. 6. С. 62-70.
3. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator //Photonics Technology Letters, IEEE. – 2012. – Т. 24. – №. 3. – С. 194-196.
4. Rubiola E., Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators, Cambridge University Press, 2008