

Перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный сверхвысокочастотный генератор

В работе исследованы характеристики спин-волнового оптоэлектронного генератора сверхвысокочастотных сигналов. Генератор представлял собой кольцевую схему, в СВЧ тракте которой содержалась спин-волновая линия задержки, изготовленная на пленке железо-иттриевого граната. Оптический тракт содержал линию задержки из оптоволокна длиной 100 м. Показано, что использование спин-волновой линии задержки позволяет перестраивать частоту генерации в широких пределах при сохранении низкого уровня фазового шума.

Ключевые слова: спин-волновая линия задержки, оптоэлектронный генератор

В настоящее время СВЧ радиофотоника является одним из наиболее динамически развивающихся направлений радиоэлектроники [1, 2]. Одними из перспективных устройств СВЧ радиофотоники являются перестраиваемые оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) СВЧ колебаний, которые относятся к классу высокостабильных генераторов, работающих в частотном диапазоне от сотен мегагерц до сотен гигагерц [3].

Основным преимуществом ОЭГ по сравнению с традиционными генераторами СВЧ колебаний является преодоление противоречивых требований, состоящих в увеличении полосы перестройки частоты генерации и снижении уровня фазовых шумов [2, 3]. Обычно это достигается за счет увеличения времени задержки циркулирующего сигнала, например, увеличением длины оптоволоконного кабеля.

Типичный оптоэлектронный СВЧ генератор имеет кольцевую схему (см. рис. 1), состоящую из радиотехнического и оптического трактов. Оптический тракт состоит из лазера, электрооптического модулятора излучения, оптоволоконного кабеля и фотодетектора. Демодулированный фотодетектором СВЧ сигнал поступает на вход радиотехнического тракта, основными элементами которого являются СВЧ усилитель и СВЧ-фильтр.

Из условия баланса фаз ясно, что собственный спектр генерации ОЭГ в идеальном случае будет включать эквидистантный ряд частот, расстояние между которыми будет уменьшаться с увеличением длины оптоэлектронного кабеля. В таком случае для выбора конкретной частоты генерации необходимо использование узкополосного полосно-пропускающего СВЧ фильтра. При этом для управления частотой генерируемого сигнала такой фильтр должен быть электронно перестраиваемым. Таким образом, полосно-пропускающий СВЧ фильтр играет ключевую роль в обеспечении требуемых рабочих характеристик оптоэлектронного генератора.

Одним из известных способов создания электронно перестраиваемых СВЧ фильтров является использование ферромагнитных материалов. Так, в работах [4, 5] для управления частотой генерации были использованы полосно-пропускающие фильтры на сферах железо-иттриевого граната (ЖИГ). При этом работе [4] была продемонстрирована перестройка генерируемого сигнала в пределах от 6 до 12 ГГц при уровне фазового шума -128 дБн/Гц.

(Здесь и ниже значения уровня фазового шума определены при отстройке на 10 кГц от частоты генерации.)

Другим перспективным способом реализации электронно-перестраиваемого генератора является введение в его схему «дополнительной» спин-волновой линии задержки (ЛЗ) СВЧ сигнала, построенной на ферромагнитной пленке [6]. Важно отметить, что спин-волновая ЛЗ является управляемым частотно-селективным элементом.

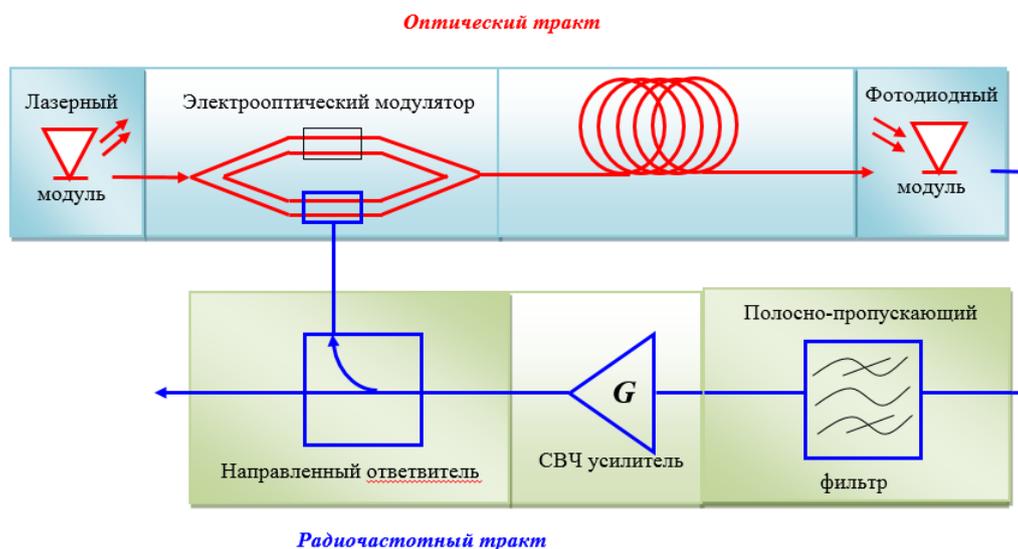


Рисунок 1. Блок-схема радиофотонного СВЧ генератора.

Целью данной работы являлось исследование характеристик перестраиваемого спин-волнового оптоэлектронного СВЧ генератора, содержащего в качестве частото задающего элемента пленочную спин-волновую линию задержки сверхвысокочастотного сигнала.

Оптический тракт генератора был выполнен из коммерческих изделий: полупроводникового лазера с длиной волны оптического излучения 1.55 мкм, электрооптического модулятора, оптоволоконного кабеля длиной $l_{opt} = 100$ м и полупроводникового фотодетектора. Верхняя рабочая частота фотодетектора составляла 1500 МГц. Основными элементами радиочастотного тракта являлись два одинаковых СВЧ усилителя и оригинальный спин-волновой СВЧ фильтр. Суммарный коэффициент усиления в СВЧ тракте регулировался переменным аттенюатором. Частотный диапазон СВЧ усилителей составлял 650-1400 МГц. Отсюда частотный диапазон генерации СВЧ сигнала лежал в этих же пределах.

Для осуществления электронной перестройки частоты генерируемого сигнала был изготовлен электронно-перестраиваемый СВЧ фильтр на эпитаксиальной пленке ЖИГ. Фильтр имел копланарную конструкцию [7]. Для обеспечения работы фильтра при уровнях СВЧ мощности, достигающих десятков милливатт на частотах 650-1400 МГц, была выбрана монокристаллическая пленка из замещенного ЖИГ. Пленка имела намагниченность насыщения $4\pi MS = 280$ Гс и толщину 83 мкм. Для возбуждения и приема спиновых волн использовались копланарные антенны длиной 3 мм, имеющие ширину центрального полоска 500 мкм и щели шириной 250 мкм, нанесенные на подложку из поликора толщиной 1 мм.

Расстояние между антеннами составляло 3 мм. Антенны питались от подводящих копланарных линий передачи, имевших волновое сопротивление 50 Ом.

Рассмотрим принцип действия спин-волнового оптоэлектронного генератора. Лазерный диод излучает непрерывное оптическое излучение, выполняющее функцию несущего сигнала. Электрооптический модулятор модулирует амплитуду оптического излучения СВЧ сигналом, поступающим из радиочастотного тракта. Модулированное оптическое излучение распространяется по оптоволоконному кабелю и детектируется фотодиодом. Детектированный оптический сигнал на выходе фотодиода представляет собой сверхвысокочастотный сигнал. Этот сигнал усиливается с помощью СВЧ усилителя и поступает на частотодающий фильтрующий элемент - спин-волновую линию задержки. Подчеркнем, что она выполняет две функции: фильтрации и задержки СВЧ сигнала. Далее СВЧ сигнал еще раз усиливается и подается на электрооптический модулятор, замыкая кольцевую схему. Заметим, что пара СВЧ усилителей компенсирует суммарные потери на распространение СВЧ сигнала в кольце. Небольшая часть СВЧ сигнала выводится из кольца направленным ответвителем с коэффициентом связи -10 дБ.

Суммарное усиление СВЧ сигнала в радиочастотном тракте компенсировало потери в спин-волновом фильтре и оптическом тракте на величину, достаточную для обеспечения глубины модуляции оптического излучения на 50-100 %. При этом все элементы СВЧ тракта работали в линейном режиме. Ограничение СВЧ мощности в режиме генерации обеспечивалось лазером и интегрально-оптическим модулятором. Поскольку последний является интерферометром Маха-Цендера, изменение интенсивности оптического излучения лежит в пределах от 0 до I_{\max} (где I_{\max} - интенсивность оптического излучения лазера) вне зависимости от уровня мощности модулирующего СВЧ излучения.

Рассмотрим экспериментальные результаты в режиме генерации. По мере уменьшения потерь в радиочастотном тракте переменным аттенуатором в кольце возникала автогенерация монохроматического СВЧ сигнала. При подмагничивании пленки ЖИГ полем в 180 Э частота генерируемого сигнала составляла 842 МГц, что соответствовало частоте минимального затухания спин-волнового СВЧ фильтра. Типичная гармоника генерации и спектр фазового шума показаны на рис. 2а и 2б, соответственно. Видно, что фазовый шум генератора составлял -110 дБн/Гц. При увеличении магнитного поля от 135 Э до 375 Э частота генерации изменялась от 700 до 1400 МГц. Значение фазового шума, измеренное при отстройке от центральной несущей частоты на 10 кГц, практически не изменялось. Отметим, что аналогичные измерения для случая оптоволоконного кабеля длиной 200 м показали уменьшение фазового шума до -114 дБн/Гц. На рис. 2б кроме экспериментальной зависимости (сплошная линия) показана теоретическая зависимость (пунктирная линия) спектра фазового шума. Последняя была рассчитана при помощи разработанной нами теоретической модели спин-волнового радиофотонного генератора.

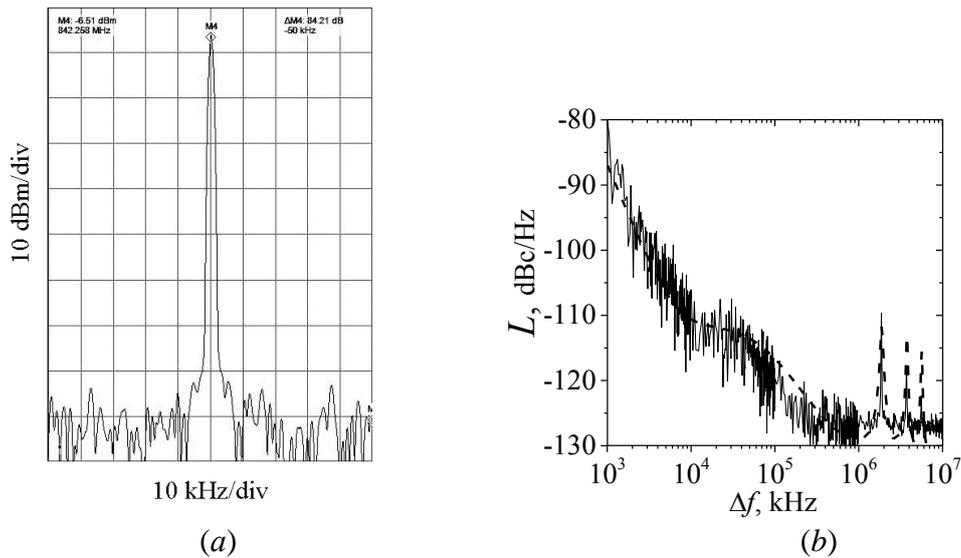


Рисунок 2. Спектр генерируемого СВЧ сигнала (а) и спектр фазового шума (b).

С изменением напряженности внешнего магнитного поля H_0 происходит перестройка спектра спиновых волн, а, следовательно, и перестройка частоты генерации. На рис. 3 показаны результаты расчета диапазона магнитной перестройки частоты генерации гибридного ОЭГ при изменении внешнего поля в диапазоне от $H_0 = 1500$ Oe до $H_0 = 1510$ Oe для трех случаев: $l_{opt} = 1000$ м, $l_{opt} = 500$ м и $l_{opt} = 0$. Как видно из рисунка, перестройка частоты носит ступенчатый характер, что объясняется переключениями между соседними резонансными частотами гибридного ОЭГ при изменении H_0 . Отметим, что перестройка частоты генерации в диапазоне магнитных полей, в котором переключения не происходит, осуществляется плавно за счет дополнительного фазового набега, вносимого спин-волновой ЛЗ.

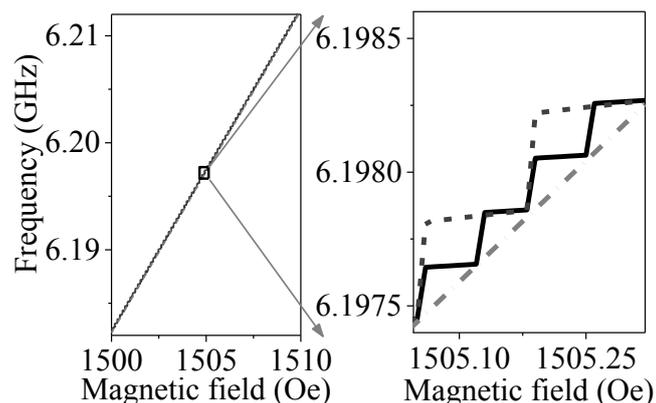


Рисунок 3. Магнитная перестройка частоты генерации в ОЭГ на оптоволоконном кабеле $l_{opt} = 1000$ м (сплошная линия), на оптоволоконном кабеле $l_{opt} = 500$ м (пунктирная линия) и на спин-волновой ЛЗ (штрих-пунктирная линия).

С уменьшением длины оптоволоконного кабеля и, соответственно, с уменьшением величины фазового набега в нем расстояние между соседними резонансными частотами

увеличивается. При этом возрастает диапазон магнитных полей, в котором частота генерации плавно перестраивается практически без переключения. В качестве иллюстрации такого режима на рис. 3 пунктирной линией показана перестройка частоты генерации в ОЭГ на оптоволоконном кабеле, длина которого была уменьшена до $l_{opt} = 500$ м. При дальнейшем уменьшении l_{opt} интервалы плавной перестройки частоты генерации увеличиваются. В предельном случае, т.е. при $l_{opt} = 0$, ход магнитной перестройки определяется только спин-волновой ЛЗ.

Из проведенного исследования следует, что разработанный перестраиваемый спин-волновой 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.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 13-02-12414 офи_м2, 14-02-00496_А, грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ № НШ-4109.2014.2, а также госзаданиями Минобрнауки РФ.

Библиографический список

1. Capmany J., Novak D. // Nature photonics. 2007. V. 1. P. 319-330.
2. Yao J. // Journal of Lightwave Technology. 2009. V. 27. N. 3. – С. 314-335.
3. Белкин М. Е., Сигов А. С. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901–914.
4. Eliyahu D., Maleki L. // Microwave Symposium Digest. IEEE MTT-S International. 2003. V. 3. P. 2185-2187.
5. Zhu D., Pan S., Ben D. // Photonics Technology Letters, IEEE. 2012. V. 24. Is. 3. P. 194-196.
6. Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры / Под ред. В.Н. Ушакова. Монография. М.: Радиотехника, 2013.
7. А. с. 801747 СССР, МКЛЗ Н03 Н 9/125. Устройство для возбуждения и передачи спиновых волн / Калиникос Б.А., Ковалева М.К., Ковшиков Н.Г. - № 2830675; заявл. 17.10.1979.