

**В.В. Витко<sup>1,2</sup>, А.В. Кондрашов<sup>1,2</sup>, А.А. Никитин<sup>1,2</sup>,  
А.Б. Устинов<sup>1</sup>, Б.А. Калинин<sup>1</sup>, Дж.Э. Батлер<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)

## **Перспективные применения монокристаллических подложек алмаза в оптоэлектронике СВЧ**

*Представлены результаты экспериментального исследования перестраиваемого узкополосного фильтра на основе пленки железо-иттриевого граната для применения в оптоэлектронике. Принцип работы фильтра основан на возбуждении в подложке мод Лэмба. Показано, что использование в качестве подложки монокристаллического алмаза позволят значительно уменьшить уровень фазовых шумов проектируемого оптоэлектронного СВЧ генератора.*

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий фильтр, феррит, алмаз

Одним из наиболее перспективных устройств радио-оптоэлектроники (Microwave Photonics [1]) является генератор СВЧ колебаний. Относится к новому классу высокостабильных генераторов, работающих в частотном диапазоне от сотен мегагерц до сотен гигагерц [2].

Основным преимуществом таких генераторов по сравнению с традиционными генераторами СВЧ колебаний является преодоление компромисса между полосой перестройки частоты генерации и уровнем фазовых шумов [3]. Так, в настоящее время разработаны конструкции оптоэлектронных СВЧ генераторов с очень низким уровнем фазовых шумов порядка, а именно, около -100 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц от несущей частоты [4-8]. Кроме того, верхний предел частоты генерации оптоэлектронного генератора ограничен полосой пропускания оптоэлектронных компонентов, которая в настоящее время уже составляет сотни гигагерц [4]. Такие рабочие характеристики вследствие фундаментальных ограничений труднодостижимо для современных интегральных СВЧ генераторов.

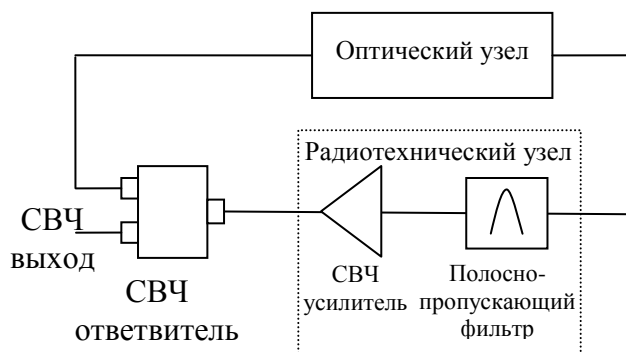


Рисунок 1 – Блок-схема оптоэлектронного генератора

Рассмотрим подробнее принцип работы оптоэлектронного СВЧ генератора, блок-схема которого приведена на рисунке 1. Генератор представляет собой кольцевую схему, состоящую из радиотехнического и оптического узлов [8]. В общем случае оптический узел состоит из лазерного светодиода, электрооптического модулятора излучения, оптоволоконного кабеля и фотодетектора. Отметим, что электрооптический модулятор может быть исключен. В этом случае СВЧ сигнал подается непосредственно в цепь питания лазерного светодиода (рисунок 2), который в результате излучает амплитудно-модулированный СВЧ частотой оптический сигнал в оптоволокно в направлении фотодиода [9]. Через время, необходимое для прохождения света по оптоволокну ( $\tau_o$ ), фотодиод принимает оптическое излучение и демодулирует его, в результате чего на выходе фотодиода имеем СВЧ сигнал.

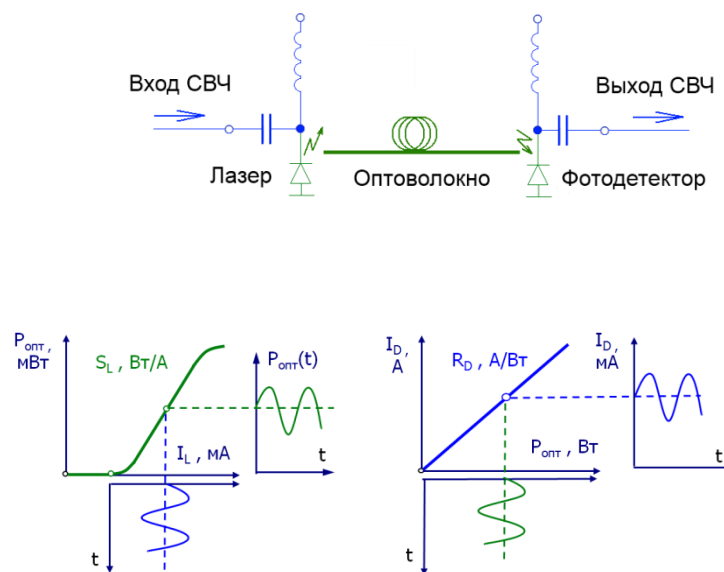


Рисунок 2 – Блок-схема и принцип работы оптического узла оптоэлектронного генератора

После демодуляции СВЧ сигнал поступает на вход радиотехнического узла, основными элементами которого являются СВЧ усилитель и СВЧ фильтр (рисунок 1). Ниже будет показано, что СВЧ фильтр играет ключевую роль в обеспечении требуемых рабочих параметров оптоэлектронного генератора.

СВЧ усилитель обеспечивает выполнение условия баланса амплитуд, то есть компенсирует потери при электрооптическом преобразовании. СВЧ сигнал проходит радиотехнический узел за время  $\tau_p$ . Так как в оптоэлектронных генераторах длина оптоволоконного кабеля значительно превышает длину электрических цепей радиотехнического узла, то есть  $\tau_o \gg \tau_p$ , следовательно длиной электронных цепей можно пренебречь. В этом случае условие баланса фаз будет определяться длиной оптоволоконного кабеля или временем задержки  $\tau_o$ , при котором набег фазы в цепи обратной связи кратен  $2\pi$ ,

$$\tau_o = \frac{nL}{c}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления оптоволокна,  $L$  – длина оптоволокна, а  $c$  – скорость света.

Из обзора литературы известно, что уровень фазовых шумов может быть значительно снижен путем увеличения длины оптоволоконного кабеля  $L$ . Так, в работе [9] показано, что увеличение  $L$  от 100 м до 1000 м приводит к снижению уровня фазовых шумов от -95 дБн/Гц до -107.57 дБн/Гц при отстройке от центральной частоты генерации на 10 кГц (рисунок 3).

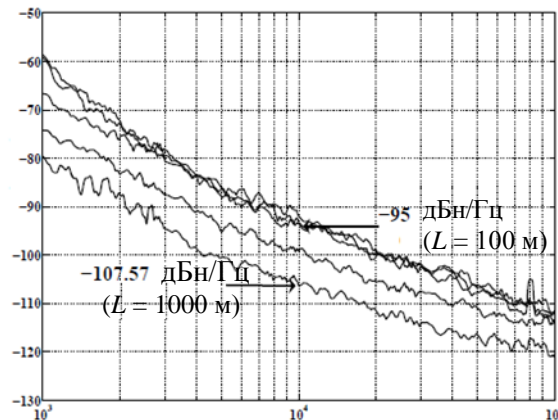


Рисунок 3 – Зависимость уровня фазовых шумов при различной длине оптоволоконного кабеля [9]

Из (1) и вышеприведенного условия баланса фаз ясно, что собственный спектр генерации разрабатываемого генератора в идеальном случае будет определяться в виде эквидистантного ряда частот одинаковой амплитуды:

$$f = \frac{m}{\tau_o} = \frac{cm}{nL}, \quad (2)$$

где  $m$  – порядковый номер моды генерации. В этом случае для выбора конкретной частоты генерации необходимо использование узкополосного полосно-пропускающего СВЧ фильтра (рисунок 1).

Из формулы 2 следует, что расстояние между соседними модами  $\Delta f$  равно

$$\Delta f = \frac{c}{nL}. \quad (3)$$

Таким образом, с увеличением времени задержки в оптическом узле (то есть с увеличением длины оптического кабеля) частоты, для которых выполняется условия баланса фаз, будут сближаться. Следовательно, требование к узкополосности СВЧ фильтра значительно возрастает.

На рисунке 4 показан эквидистантный ряд частот, для которых выполняется условие баланса фаз. Подчеркнем, что узкополосный СВЧ фильтр обеспечивает частотную селективность и определяет частоту генерации. Отметим также, что уровень

подавления оставшихся гармоник во многом определяет минимально возможный уровень фазовых шумов разрабатываемого СВЧ генератора.

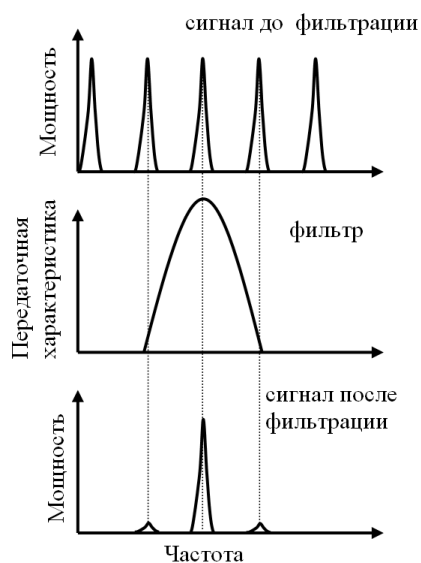


Рисунок 4 – Эквидистантный ряд частот оптоэлектронного генератора; передаточная характеристика СВЧ фильтра и СВЧ сигнал после фильтрации

Особо отметим, что в случае использования перестраиваемого СВЧ фильтра частота генерируемого сигнала может перестраивается в соответствии с передаточной характеристикой полосно-пропускающего фильтра. Так, в работе [10] была продемонстрирована перестройка генерируемого сигнала в пределах от 6 до 12 ГГц при уровне фазового шума -128 дБн/Гц (при отстройке 10 кГц от несущей). Такая перестройка была реализована при помощи полосно-пропускающего фильтра, построенного на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Названный ЖИГ-фильтр использовал явление ферромагнитного резонанса.

Таким образом, актуальной задачей является разработка высокодобротных перестраиваемых полосно-пропускающих СВЧ фильтров. Одним из вариантов реализации требуемых высокодобротных (узкополосных) СВЧ фильтров является использование не ферромагнитного резонанса, а магнитоакустических колебаний. Примером таких колебаний являются связанные высокодобротные акустические колебания (моды Лэмба) и спин-волновые колебания в монокристаллических пленках железо-иттриевого граната [11 – 14].

Рассмотрим подробнее конструкцию и принцип работы узкополосного перестраиваемого магнитоакустического фильтра, предназначенного для применения в качестве частото задающего элемента в оптоэлектронных генераторах. На рисунке 5 представлен экспериментальный макет, использованный нами для исследования магнитоакустических колебаний. Макет состоял из монокристаллической пластины гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм, покрытой с двух сторон эпитаксиально выращенными пленками ЖИГ толщиной 5.7 мкм, а также трех микрополосковых СВЧ антенн длиной 2 мм и шириной 50 мкм. Ширина пленки ЖИГ

составляла 2 мм, длина – 30 мм, а намагниченность насыщения 1750 Гс. Пленка имела ширину кривой ферромагнитного резонанса 0,5 Э на частоте 5 ГГц. Антенны были сформированы на подложке из поликора толщиной 0,5 мм, металлизированной с обратной стороны. Вся конструкция помещалась в магнитное поле напряженностью 1880 Э, направленное по нормали к поверхности пленки ЖИГ, то есть выполнялось условие для возбуждения прямых объемных спиновых волн (ПОСВ).

Антенна, обозначенная на рисунке 5 как "Port 1", выполняла роль СВЧ входа и возбуждала ПОСВ в пленке ЖИГ. Антенна "Port 2" принимала ПОСВ и выполняла роль СВЧ выхода. Расстояние между антеннами "Port 1" и "Port 2" составляло 4 мм. Антенна "Port 3" использовалась для приема спиновых волн, возбуждаемых с обратной стороны подложки ГГГ и была удалена на 3 мм от антенны "Port 1".

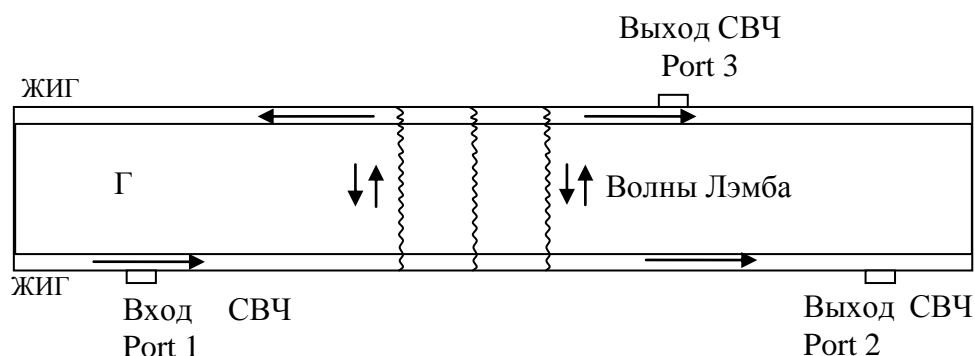


Рисунок 5 – Макет для исследования магнитоакустических колебаний в структуре ЖИГ/ГГГ/ЖИГ

На рисунке 6 представлены измеренные передаточные характеристики  $S_{21}$  и  $S_{31}$ . Как видно из рисунка, на характеристике  $S_{21}$  присутствуют провалы, которым соответствует области возбуждения волн Лэмба спиновыми волнами, бегущими по "нижней" пленке ЖИГ [15]. Эти волны Лэмба, распространяясь поперек подложки ГГГ, в свою очередь возбуждают ПОСВ в "верхней" пленке ЖИГ.

Таким образом, характеристика  $S_{31}$  соответствует передаточной характеристике проектируемого узкополосного фильтра. Добротности полос имеют величины около 5000. Заметим, что полученная величина добротности превышает добротность традиционных полосно-пропускающих ЖИГ-фильтров, работающих на явлении ферромагнитного резонанса, в 5-10 раз. Одним из путей дальнейшего увеличения добротности является использование вместо ГГГ материала с лучшими акустическими свойствами. В таблице 1 приведены акустические свойства алмаза и ГГГ.

Таблица 1

	Алмаз [16]	ГГГ ориентации (111) [17-18]
Модуль Юнга	1050 ГПа	222 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.1	0.28
Скорость звука	17500 м/с	3521 м/с

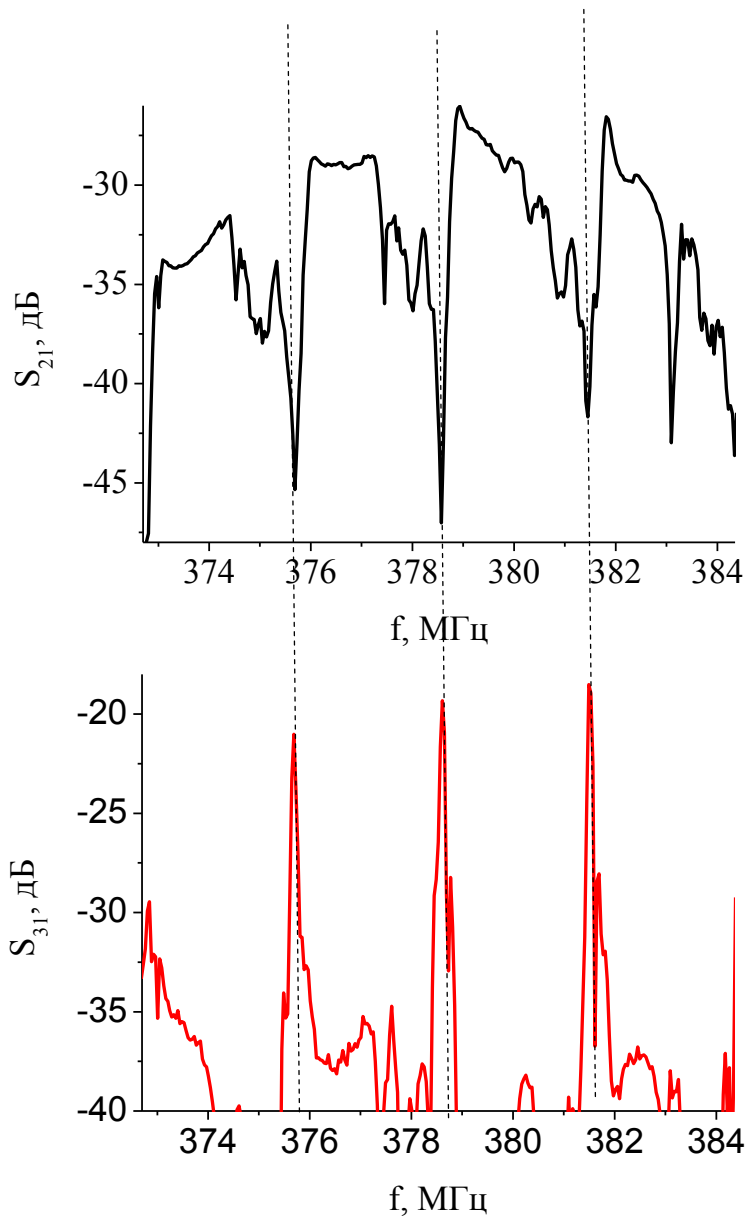


Рисунок 6 – Экспериментальные передаточные характеристики  $S_{21}$  и  $S_{31}$

Как видно из таблицы 1 использование монокристаллических подложек алмаза вместо ГГГ позволит на порядок увеличить добротность, а, следовательно, уменьшить уровень фазовых шумов создаваемого оптоэлектронного генератора.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 (Договор № 14.В25.31.0021 от 26 июня 2013 г).

#### Библиографический список

1. Capmany, J. Microwave photonics combines two worlds / J. Capmany, D. Novak// Nature photonics. – 2007. – Vol. 1. – p. 319-330.
2. Белкин, М. Е. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника / М. Е. Белкин, А. С. Сигов// Радиотехника и электроника. – 2009. – т. 54. – № 8. – с. 901–914.

3. Белкин, М. Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона. ИНТЕРМАТИК-2008 «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»/ М. Е. Белкин// Материалы международной НТК, октябрь 2008. – М.: Энергоатомиздат. – 2008. – с. 289-297.
4. Yao, X.S. High frequency optical subcarrier generator / X.S. Yao, L. Maleki. // Electronics Letters. – 1994. – vol. 30. – p. 1525.
5. Larger, L. Optoelectronic phase chaos generator for secure communication / L. Larger, V. S. Udaltsov, and S. Poinsot. // Journal of Optical Technology. – 2005. – Vol. 72. – Issue 5. – p. 378-382.
6. Yao, X. S. Opto-electronic Oscillators /In. book: RF Photonic Technology in Optical Fiber Links // Ed. by W. S. C. Chang. – Cambridge University Press, 2002. – p. 255-292.
7. Product Brief. Advanced Opto-Electronic Oscillator (OEO). Ultra-Low Phase Noise Microwave Signal Source Module. // Oewaves, Inc. 2. – URL: <http://www.oewaves.com/advanced-oeo-sp-1171610647>
8. М.Белкин, А.Лопарев. Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники. // Журнал "Электроника:НТБ". – 2010. – Вып. 6. – с. 62-70.
9. Hayata, A. 2.49 GHz Low Phase-Noise Optoelectronic Oscillator using 1.55 mm VCSEL for Avionics and Aerospace Applications/ A. Hayata, A. Bacoua, A. Rissonsa, J.-C. Molliera // Proceedings of International Topics Meeting on Microwave Photonics MPW/APMP. – 2008. – p. 98-101.
10. Eliyahu, D. Tunable, Ultra-Low Phase Noise YIG Based Opto-Electronic Oscillator. / D. Eliyahu, L. Maleki // Microwave Symposium Digest. – IEEE MTT-S International. – 2003. – Vol.3. – p. 2185- 2187.
11. Зильберман, П. Е. Наблюдение быстрых электромагнитно-спиново-упругих волн в пленках железоиттриевого граната. / П.Е. Зильберман, Б.Т. Семен, В.В. Тихонов, А.В. Толкачев // Письма в ЖТФ. - 1989, Т. 15. - №10. С. 69-63.
12. Луговской, А.В. Одновременное существование магнитоупругих и обменных осцилляций прохождения волны Дэймона-Эшбаха в слоистой структуре ЖИГ-ГТГ / А.В. Луговской, Ю.А. Филимонов // РЭ. – 1984. – Т.29. – №12. – С. 2412-2418.
13. Ле-Кроу, Р., Комсток, Р. Магнитоупругие взаимодействия в ферромагнитных диэлектриках, в кн. Физическая акустика под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1968, Т.3, ч. Б, с.156-243.
14. Филимонов, Ю.А. *Магнитоупругие волны в касательно намагниченной ферромагнитной пластине* / Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – №1. – с.40-50.
15. Луговской, А.В. Одновременное существование магнитоупругих и обменных осцилляций прохождения волны Деймона-Эшбаха в слоистой структуре ЖИГ-ГТГ / А.В. Луговской, Ю.А. Филимонов // РЭ. – 1984. – Т.29. – №12. –С.2412-2418
16. The CVD diamond booklet // Diamond materials. – 2008. – URL: [http://www.diamond-materials.com/downloads/cvd\\_diamond\\_booklet.pdf](http://www.diamond-materials.com/downloads/cvd_diamond_booklet.pdf)
17. Pardavi-horvath, M. Microhardness and brittle fracture of garnet single crystals // Journal of materials science. – 1984. – Vol. 19. – p. 1159-1170.
18. Kleszczewski, Z. Phonon-phonon interaction in gadolinium-gallium garnet crystals / Z. Kleszczewski, J. Bodzenta// Phys. stat. sol. (b). – 1988. – Vol. 146. – p. 467-474.