

М. Е. Белкин, д-р техн. наук, зав. науч. лаб.,
А. В. Лопарев, аспирант,
 Московский государственный технический
 университет радиотехники, электроники и
 автоматики,
 e-mail: alexey_loparev@mail.ru

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР СВЧ СИГНАЛОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Поступила в редакцию 23.06.2011

Рассматриваются схема построения и принцип функционирования оптоэлектронного генератора (ОЭГ) СВЧ диапазона, в котором сочетаются относительно низкие фазовые шумы и широкая полоса перестройки частоты генерации. Приводятся результаты разработки объектно-ориентированной модели оптоэлектронного генератора с помощью оптоэлектронной САПР VPI-transmission Maker™ и результаты моделирования его спектральных и шумовых характеристик. Описаны макет ОЭГ, перестраиваемый в полосе 2,5...15 ГГц, и результаты измерения с его помощью указанных параметров, подтверждающие корректность предложенной модели. Проводится сравнение с различными генераторами СВЧ диапазона в интегральном исполнении, построенными по традиционной схеме.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная оптоэлектроника, оптоэлектронный генератор СВЧ сигналов, частотные шумы

Введение

Как известно, транзисторный генератор сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона является принципиальным структурным элементом радиопередающего и радиоприемного устройств как телекоммуникационного, так радиолокационного назначений, и его параметры во многом определяют общие технико-экономические показатели современных радиосредств. В связи с этим исследованиям теоретических и практических аспектов его функционирования, а также схем его построения посвящено огромное количество публикаций в периодической и книжной научной литературе [1, 2]. Тем не менее современное развитие радиоэлектронной аппаратуры поставило перед ее разработчиками новые задачи. В частности, требования по экономичности систем передачи вызвали интенсивное развитие техники СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на арсенид-галлиевых гетероструктурных транзисторах. Этот процесс сопровождается ужесточением требований к техническим параметрам СВЧ генератора: полосе перестройки, частотным шумам, уровню гармоник и т. д. [3].

Альтернативный путь совершенствования принципов построения и основных характеристик твердотельных СВЧ генераторов состоит в так называемом оптоэлектронном подходе, заключающемся во внедрении технологий сверхвысокочастотной оптоэлектроники (СОЭ), предмет исследований которой находится на стыке фотоники и СВЧ радиоэлектроники [4]. Рассматриваемый в данной работе оптоэлектронный генератор (ОЭГ) является одним из наиболее перспективных функциональных элементов СОЭ с точки зрения практической реализации [5]. Главным его преимуществом считается рекордно низкий уровень частотных шумов, составляющий в настоящее время -163 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от несущей, расположенной в любой точке X-диапазона [6]. С этой целью используются волоконный резонатор длиной в несколько километров и многоконтурные схемы [7]. Еще одним важным преимуществом является возможность одновременного обеспечения низких фазовых шумов и широкого диапазона перестройки частоты генерации [8], что недостижимо вследствие фундаментальных ограничений для транзисторных СВЧ генераторов, построенных по традиционной схеме с варакторной перестройкой частоты. Так, для уменьшения уровня частотных шумов в них необходимо повышение добротности используемого СВЧ резонатора, в то время как для увеличения полосы перестройки ее необходимо уменьшать [8]. Напротив, в ОЭГ уровень частотных шумов определяется исключительно временем задержки в петле обратной связи, а частота генерации — центральной частотой радиочастотного полосно-пропускающего фильтра. В свете изложенного выше в данной статье описываются результаты разработки экономичного варианта ОЭГ СВЧ диапазона, в котором при простой схемной структуре и относительно небольшой длине волоконного резонатора (времени задержки в петле обратной связи) сочетаются относительно низкие фазовые шумы и широкая полоса перестройки частоты генерации.

Принцип работы и объектно-ориентированная модель оптоэлектронного генератора

По принципу работы и схеме построения исследуемый ОЭГ ничем не отличается от широко известного в радиотехнике автогенератора с линией задержки в цепи обратной связи (рис. 1, а) [9]. Особенностью его работы является многочастотный (многомодовый) характер генерируемых колебаний, для которых выполняются условия баланса амплитуд (рис. 1, б) и баланса фаз (рис. 1, в).

В случае ОЭГ роль резонансной системы и элемента задержки в цепи обратной связи играет отрезок одномодового кварцевого волокна определенной длины, характеризующийся, как известно, крайне низкими потерями и дисперсией переда-

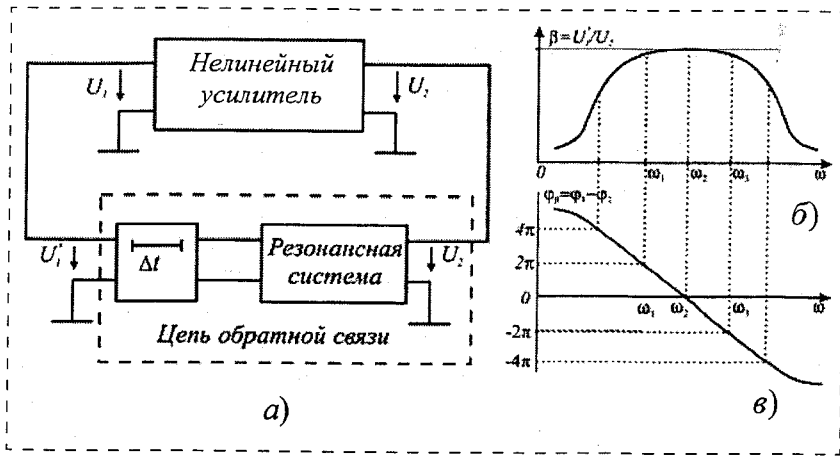


Рис. 1. Структурная схема радиочастотного автогенератора (а) и диаграммы, иллюстрирующие условия выполнения баланса амплитуд (б) и фаз (в) [9]

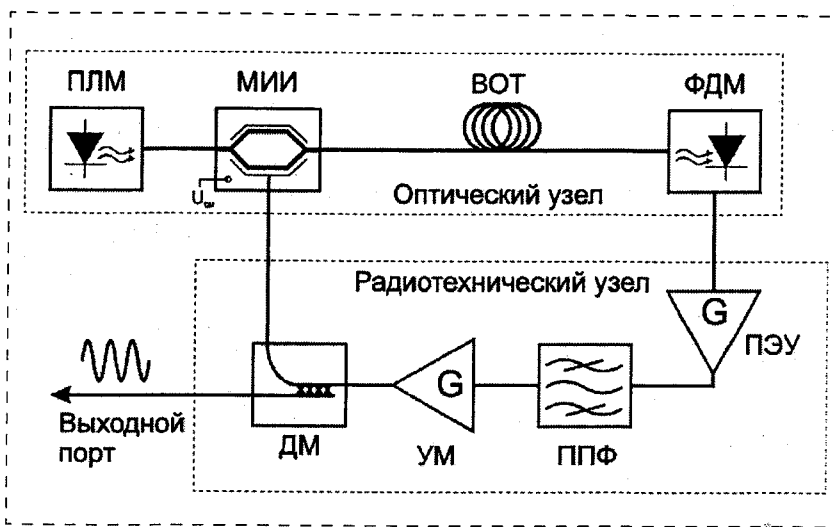


Рис. 2 Структурная схема оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона

ваемого оптического сигнала. Рассмотрим типичную структурную схему ОЭГ [5], приведенную на рис. 2. Как видно из этого рисунка, схема ОЭГ включает в себя оптический узел и радиотехнический узел. В состав оптического узла входят полупроводниковый лазерный модуль (ПЛМ), модулятор интенсивности излучения (МИИ), волоконно-оптический тракт (ВОТ) и фотодиодный модуль (ФДМ), а в состав радиотехнического узла — предварительный электрический усилитель (ПЭУ), полосно-пропускающий фильтр (ППФ), усилитель мощности (УМ) и делитель мощности (ДМ).

Кратко поясним принцип работы ОЭГ в стационарном режиме. Непрерывное излучение лазерного модуля ПЛМ (источника электромагнитной энергии) поступает на вход модулятора МИИ. В качестве МИИ обычно используется электрооптический модулятор бегущей волны на основе интегрального интерферометра Маха—Цандера. Далее модулированный СВЧ сигналом оптическое излучение проходит волоконно-оптический тракт ВОТ и

поступает на вход фотодиода ФДМ, в котором происходит его демодуляция. Демодулированный СВЧ сигнал предварительно усиливается с помощью электрического усилителя ПЭУ. Высокочастотный полосовой фильтр ППФ выделяет частоту генерации ОЭГ, подавляя СВЧ колебания на других частотах. После усиления в усилителе мощности УМ СВЧ сигнал поступает в делитель мощности ДМ, который одну часть сигнала направляет в выходной порт ОЭГ, а другую часть — на управляющий вход МИИ, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи.

В процессе разработки функционирование ОЭГ было описано с помощью объектно-ориентированной модели в специализированной оптоэлектронной САПР телекоммуникационного назначения VPI Transmission Maker™. Моделирование ОЭГ проводилось с использованием аperiодических граничных условий, что позволило одновременно моделировать его оптоэлектронные, оптические и радиочастотные узлы, входящие в состав цепи обратной связи. На рис. 3 приведена компьютерная модель одноконтурного ОЭГ, построенного по схеме рис. 2.

В разработанной модели ОЭГ функционирование ПЛМ имитировалось с помощью модели на основе скоростных уравнений одночастотного полупроводникового лазера с распределенной обратной связью. В качестве МИИ использовался дифференциальный модулятор Маха—Цандера. Волоконно-оптический тракт моделировался системой аттенуатор — линия задержки (на рис. 3 Δt и τ соответственно). В качестве ФДМ использовалась резистивно-емкостная модель *pin*-фотодиода. Влияние ППФ моделировалось полиномом Баттерворта 4-го порядка с мгновенной полосой пропускания 12 МГц и полосой перестройки 3...15 ГГц. Спектр СВЧ сигнала на выходе ОЭГ отображался на экране модели анализатора спектра.

Так как спектральное разрешение результатов моделирования зависит от размера временного окна, а число точек в спектре, определяемое частотой Найквиста, фиксировано и связано с частотой генерации ОЭГ, то для достижения спектрального разрешения менее 10 Гц, требуемого для измерения частотных шумов, размер временного окна данных должен содержать 10^8 точек, что является недостижимым вследствие ограничения объема оперативной памяти ПК. Данная проблема была решена за счет объединения данных для каждого из моделируе-

мых проходов петли обратной связи ОЭГ в стационарном режиме работы в единый файл с помощью встроенной в программу функции объединения временных окон. Далее общий сигнал поступал на ППФ с полосой пропускания 10 Гц, центральная частота которых отстоит от частоты генерации ОЭГ на 10, 100 и 1 МГц соответственно.

На рис. 4 приведены рассчитанные с помощью разработанной модели спектр генерации одноконтурного ОЭГ при длине волокна 65 м и спектры однополосного частотного шума при стандартной для СВЧ генераторов отстройке от несущей на 10, 100 и 1000 кГц в полосе 10 Гц.

Как следует из рис. 4, а, спектр ОЭГ содержит центральную частоту в районе 12 ГГц и боковые моды. Разнос между центральной частотой и ближайшей боковой модой, иначе — область свобод-

ной дисперсии в основном определяется длиной волоконно-оптического тракта ОЭГ $l_{\text{ВОТ}}$, и при $l_{\text{ВОТ}} = 65$ м составляет 2,44 МГц. При этом минимальный уровень подавления боковых мод превышает 35 дБ. Оценим результаты моделирования уровня частотных шумов ОЭГ. Как известно [1], спектральная плотность мощности частотных шумов S_{df} определяется, исходя из следующего соотношения:

$$S_{df} = 10 \log(P_{osc} / (P_{df} \Delta f)), \quad (1)$$

где P_{osc} — мощность генерации ОЭГ; P_{df} — мощность в полосе фильтра при отстройке от несущей на частоту df ; Δf — шумовая полоса измерений. С учетом этого соотношения и данных рис. 4, б приведенные уровни частотного шума ОЭГ соответствуют следующим значениям: $S_{10 \text{ кГц}} = -128,4$ дБн/Гц, $S_{100 \text{ кГц}} = -132,5$ дБн/Гц и $S_{1 \text{ МГц}} = -141,1$ дБн/Гц.

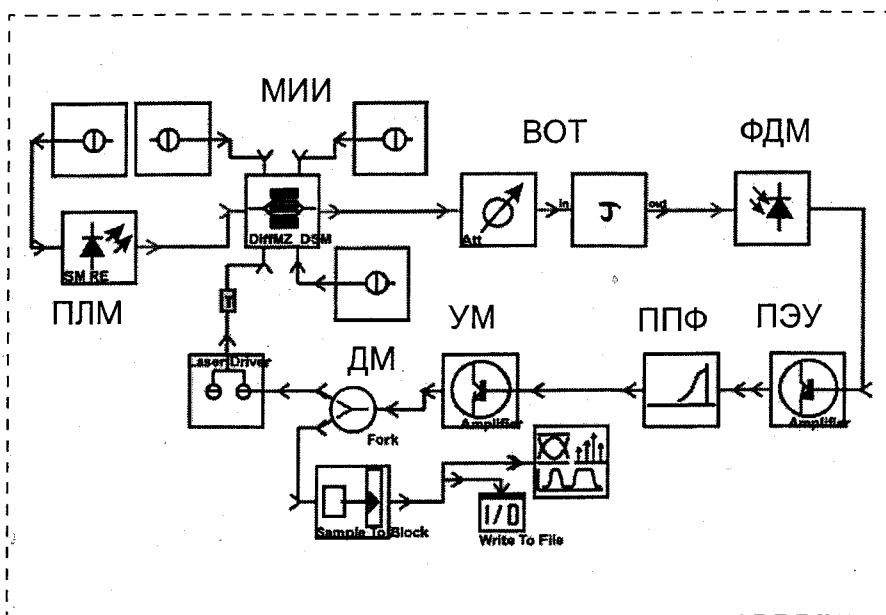


Рис. 3. Объектно-ориентированная модель оптоэлектронного генератора

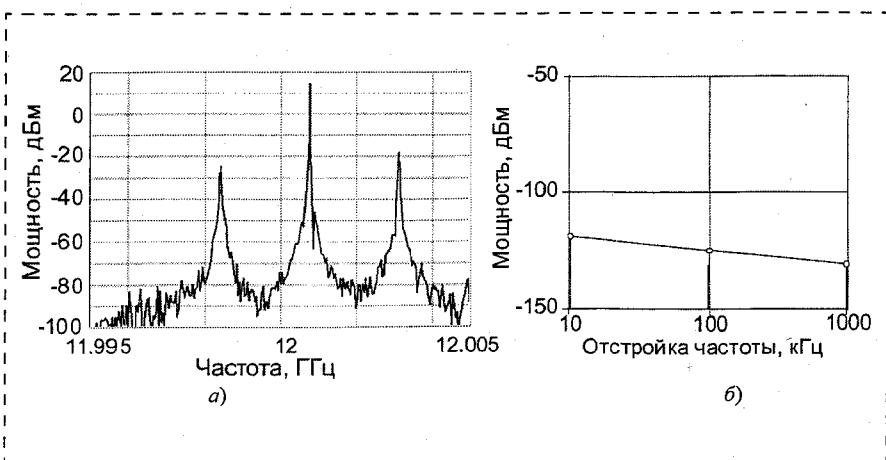


Рис. 4. Спектр генерации ОЭГ (а) и уровень мощности частотных шумов в полосе 10 Гц (б)

Экспериментальное исследование макета оптоэлектронного генератора

Для верификации результатов моделирования ОЭГ на основе схемы рис. 2 был разработан макет на дискретных компонентах с полосой перестройки в диапазоне 2,5...15 ГГц с шагом около 2,5 МГц. Общий вид его приведен на рис. 5. Для упрощения и повышения качества согласования все элементы оптического узла соединены посредством одномодового волоконного тракта с разъемами типа FC/APC, а радиотехнического узла — посредством СВЧ коаксиального тракта с разъемами типа SMA.

В оптическом узле макета в качестве ПЛМ использован лазерный излучатель с распределенной обратной связью LDI H-DFB-1550-10P-H-SM-FC/APC производства фирмы ИИТ, Минск (мощность излучения 11,5 мВт, рабочая длина волны 1550 нм, относительный уровень шума интенсивности (RIN) — 155 дБ/Гц). Для предотвращения отражений от оптических разъемов и фотодиода, что может привести к нарушению стабильности генерации ПЛМ, к его выходу подключен оптический изолятор (модель IS-S-15-L-10-FA, производство Ascentta, Inc., США, минимальная развязка 33 дБ). Для уменьшения потерь оптического сигнала на вход ММ

подключен волоконный корректор поляризации (КП), модель FPC-030, Thorlabs, США. В качестве МИИ применен ниобат-литиевый модулятор на основе интегрального интерферометра Маха-Цандера модели Mach-005-40, Covaga, США (рабочий спектральный диапазон 1525...1605 нм, вносимые оптические потери не более 5,5 дБ, полоса пропускания по модулирующему входу до 35 ГГц, полуволновое напряжение смещения на частоте 1 ГГц не более 4 В). Наконец, для детектирования оптического излучения использован ФДМ модели XPDV-2120R производства фирмы U2T Photonics, Германия (рабочий спектральный диапазон 1480...1620 нм, токовая чувствительность 0,58 А/Вт при напряжении обратного смещения 2,8 В, темновой ток менее 5 нА, полоса пропускания по уровню -3 дБ не менее 50 ГГц).

В радиотехническом узле макета ОЭГ в качестве ПЭУ использовался малошумящий усилитель МШУ 1-3 (ФГУП "НПП Исток", Фрязино), в качестве ППФ — четырехзвенный фильтр с резонаторами на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) модели ФФЛК2-17 производства ОАО "Завод Магнетон" (Санкт-Петербург) (потери около 5 дБ, полоса перестройки 2...15 ГГц с мгновенной полосой пропускания около 20 МГц на частоте генерации ОЭГ). Усилитель мощности УМ был реализован на микросхеме HMC383 (Hittite Microwave Corporation, США). Общий коэффициент усиления радиотехнического узла составляет около 45 дБ.

Спектральные и шумовые характеристики макета исследовали на контрольном выходе делителя мощности ДМ с помощью анализатора спектра Agilent E4448A с рабочим частотным диапазоном 3 Гц...50 ГГц. Результаты экспериментального исследования ОЭГ (с $l_{\text{ВОТ}} = 65$ м) представлены на рис. 6.

Как следует из рис. 6, а, спектр генерации макета ОЭГ содержит три спектральные компоненты: основную на частоте 11,9 ГГц и две боковых на расстоянии примерно 2,6 МГц от основной.

Мощность основной моды генерации составляет 9,1 дБм, боковые моды подавлены более чем на 54 дБ. Кроме того, уровень частотных шумов макета ОЭГ (рис. 6, б) получился $S_{10 \text{ кГц}} = -125,4$ дБн/Гц; $S_{100 \text{ кГц}} = -128,2$ дБн/Гц и $S_1 \text{ МГц} = -137,4$ дБн/Гц.

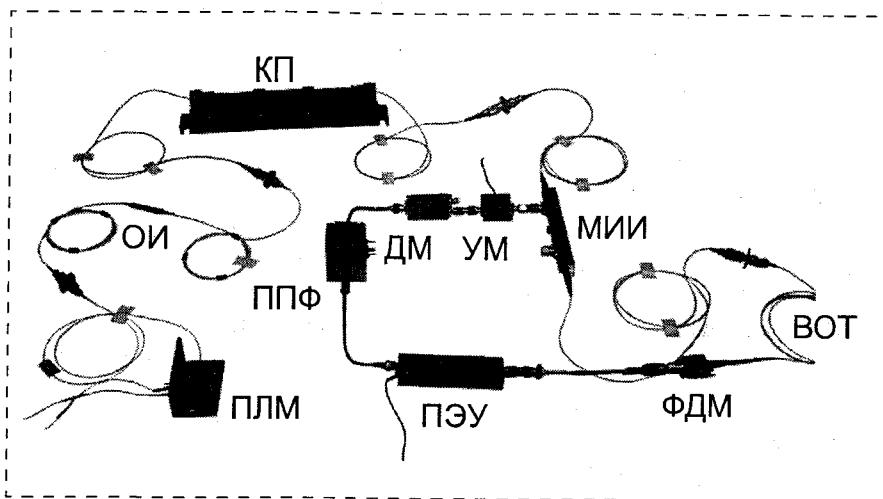


Рис. 5. Внешний вид макета разработанного ОЭГ

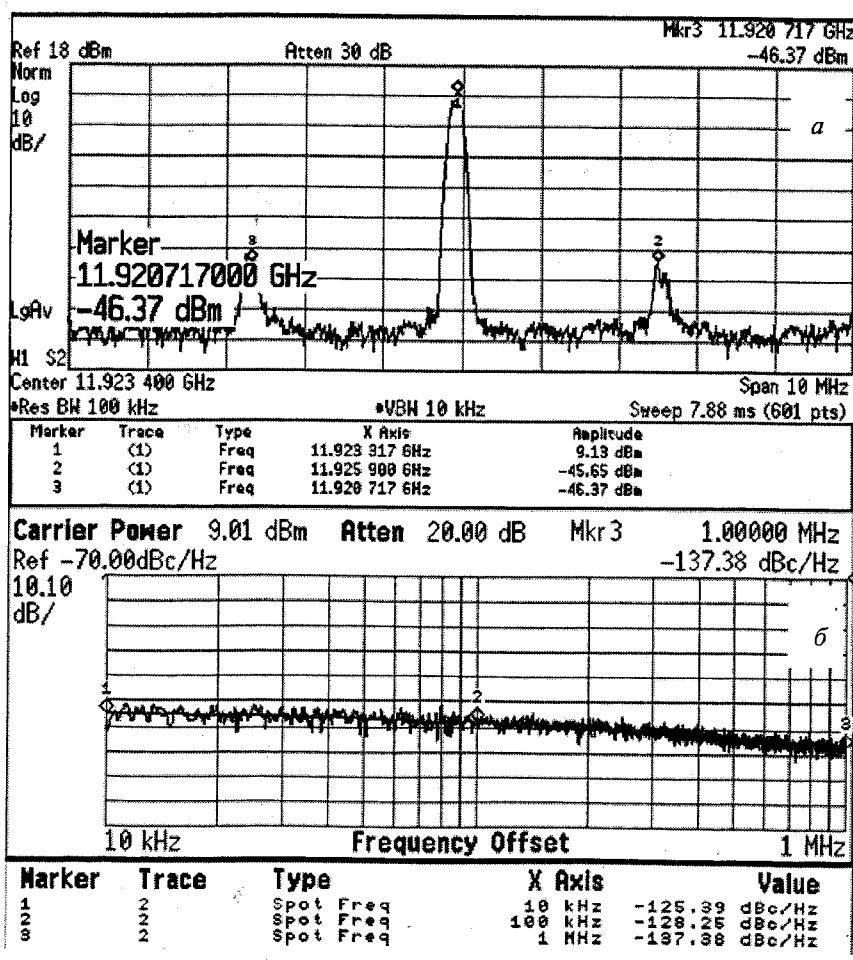


Рис. 6. Результаты экспериментального исследования спектральных (а) и шумовых (б) характеристик одноконтурного ОЭГ ($l_{\text{ВОТ}} = 65$ м)

Изделие	Мощность генерации, дБм	Полоса перестройки частоты, ГГц	Подавление побочных мод в спектре, Дб	Уровень частотных шумов при отстройке от несущей частоты		
				19 кГц	100 кГц	1 МГц
СВЧ генератор HMC388LP4 [10]	4,9	3,15–3,4	7	–87	–105	–
СВЧ генератор SHV2270-98 [11]	14	12,65–12,85	–	–60	–90	–113
Синтезатор частот ADF4350 [12]	5	2,2–4,4	13	–92	–111	–134
Разработанный ОЭГ	9,1	2,5–15	54	–125,4	–128,2	–137,4

Оценка полученных результатов

Сопоставление результатов моделирования и экспериментального исследования разработанного ОЭГ показывает, что разность рассчитанных и измеренных значений области свободной дисперсии и частотных шумов не превышает 5 %, что свидетельствует о корректности предложенной модели. Существенное расхождение выходной мощности генерации (расчетное значение 14 дБм, измеренное значение 9 дБм) можно объяснить разницей принятых в ходе моделирования и реальных коэффициентов усиления усилителей радиотехнического узла.

Для подтверждения отмеченных выше достоинств разработанного оптоэлектронного генератора проведем параметрическое сравнение с серийно выпускаемыми изделиями известных зарубежных изготовителей МИС генераторов СВЧ диапазона как на базе генератора, управляемого напряжением (ГУН) с варакторной перестройкой частоты [10, 11], так и на базе современного синтезатора частот [12]. Результаты сравнения представлены в таблице.

Как следует из таблицы, разработанный ОЭГ при сопоставимой мощности генерации обладает гораздо более широкой полосой перестройки (2,5 октавы) и значительно меньшими частотными шумами, особенно вблизи от несущей. Также стоит отметить высокое подавление побочных мод генерации, что повышает эффективность его работы в составе СВЧ радиоаппаратуры.

Заключение

В данной работе детально исследован новый подход к разработке и проектированию оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона, в котором сочетаются относительно низкие частотные шумы и широкая полоса перестройки частоты генерации. Предложенная компьютерная модель обеспечивает его корректное проектирование и может также быть применена для других вариантов схем построения, например многоконтурных и инжекционно синхронизированных ОЭГ. Разработанный макет имеет существенно больший уровень частотного шума по сравнению с известным не пере-

страиваемым вариантом построения ОЭГ [6], однако выгодно отличается от него возможностью электрической перестройки частоты в широкой полосе. Тем не менее результаты сравнения показали, что уровень его частотного шума гораздо ниже, чем у современных СВЧ генераторов на основе традиционной схемы построения, что позволяет сделать вывод о перспективности использования оптоэлектронного генератора в общем, и предложенного подхода к его построению в частности, в аппаратуре СВЧ радиосистем телекоммуникационного и радиолокационного назначений.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта по аналитической ведомственной целевой программе Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)".

Список литературы

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
2. Maas S. A. Nonlinear Microwave and RF Circuits. — Artech House, 2003. 582 p.
3. Белкин М. Е., Лопарев А. В. Компьютерное проектирование монолитной интегральной схемы сверхвысокочастотного генератора на гетероструктурных полевых транзисторах // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2010. Вып. 1 (224). С. 45–52.
4. Белкин М. Е., Сигов А. С. Новое направление фотоники — сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 8. С. 901–914.
5. Белкин М. Е., Лопарев А. В. Оптоэлектронный генератор — первое практическое устройство СВЧ оптоэлектроники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 6. С. 62–70.
6. <http://www.oewaves.com>
7. 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.
8. Белкин М. Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // ИНТЕРМАТИК—2008 "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения" / Материалы международной НТК, Москва, октябрь 2008. — М.: Энергоатомиздат, 2008. С. 289–297.
9. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / Под ред. К. А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. 528 с.
10. Hittite Microwave Corporation, VCO Product Details. URL: <http://www.hittite.com>
11. Herley Specification of the Voltage Controlled Oscillator V2060. URL: <http://www.herley.com>
12. Analog Devices product datasheet. URL: <http://www.analog.com>