

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФОТОНИКА

УДК 621.373

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОФОТОННЫХ УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2022 г. В. А. Грачев^{1,*}, А. С. Раевский¹, Д. М. Шустов¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

*E-mail: grachev.v@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 20.03.2022 г.

Принята к публикации 20.03.2022 г.

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования паразитных параметров лазерных излучателей, радиофотонных генераторов и преобразователей частоты СВЧ-сигналов.

DOI: 10.56304/S2782375X22040064

ВВЕДЕНИЕ

Применение оптических методов передачи и обработки радиочастотных сигналов в радиолокации и связи является одним из перспективных направлений. Использование методов радиопоники при создании узлов приемопередающей аппаратуры для радиолокации и связи может обеспечить значительное улучшение их основных тактико-технических характеристик: увеличение разрешающей способности по дальности и информативности, обеспечение высокой помехозащищенности и уменьшение массогабаритных характеристик. Достижение перечисленных преимуществ возможно благодаря внедрению функциональных узлов на основе электрооптических модуляторов, демодуляторов, источников и приемников оптического сигнала, оптических линий задержек и фазовращателей, волоконно-оптических линий связи.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В технике оптических систем передачи наиболее часто используется прямая модуляция тока накачки лазера. Но существует ограничение полосы модуляции в СВЧ-диапазоне, которое вызвано паразитными электрическими эффектами, возникающими вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов, требуемых для его подсоединения ко вводу модулирующего сигнала. Их необходимо учитывать при практической реализации прототипа волоконно-оптической линии связи.

Производители лазерных диодных модулей, отмечая в описании своей продукции основные электрические и оптические параметры модуля, не указывают ни полное сопротивление излучателя, ни его RLC-параметры, к которым относятся сопротивление и емкость кристалла, индуктивность выводов, реактивные сопротивления корпуса излучателя. Для обеспечения согласования лазера с драйвером и источником СВЧ-сигнала необходимо обладать информацией о данных параметрах. Их важно учитывать, так как они могут оказывать существенное влияние на полосу пропускания аналогового волоконно-оптического тракта.

Для нахождения точных значений паразитных RLC-параметров лазерного излучателя (ЛИ) существует метод, включающий в себя следующие основные этапы [1]:

- составление адекватной математической модели замещения ЛИ;
- оценка параметров элементов в полученной модели;
- составление системы уравнений, описывающей модель лазера;
- решение системы уравнений, описывающей полученную модель.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема измеряемой цепи, которая совмещает в себе элементы схемы СВЧ-платы, схему замещения ЛИ, монтажную емкость C_M и индуктивность соединительной линии L_M (индуктивность прямого отрезка проводника).

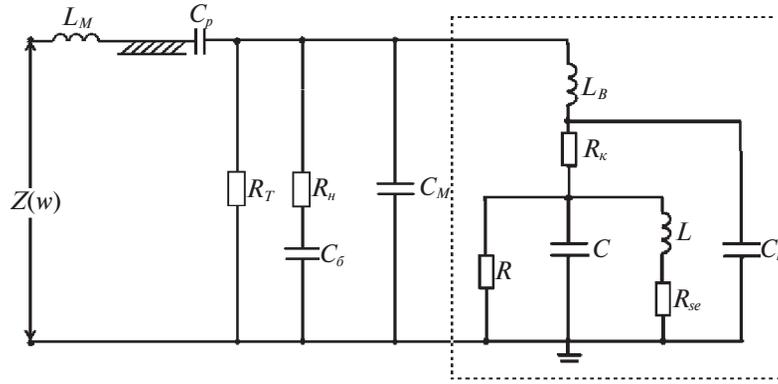


Рис. 1. Эквивалентная схема измеряемой цепи.

Для нахождения полного сопротивления измерительной схемы используем формулу преобразования сопротивлений вдоль линии передачи:

$$Z_n(\omega) = Z_B \frac{Z_H + jZ_B \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_B + jZ_H \operatorname{tg}(\beta l)}, \quad (1)$$

где $\beta l = \sqrt{\epsilon_{эф}} \frac{2\pi f}{c} l$ – электрическая длина линии.

Сопротивление нагрузки определяется следующим образом:

$$Z_H(\omega) = \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_б} + R_n\right) R_T Z_{ЛИ}^*(\omega)}{\left(\frac{1}{j\omega C_б} + R_n\right) R_T + Z_{ЛИ}^*(\omega) \left(\frac{1}{j\omega C_б} + R_n\right) + R_T Z_{ЛИ}^*(\omega)}, \quad (2)$$

где $Z_{ЛИ}^*(\omega)$ – комплексное сопротивление ЛИ с учетом его подключения к драйверу. Оно вычисляется по формуле

$$Z_{ЛИ}^*(\omega) = \frac{Z_{ЛИ}(\omega) \frac{1}{j\omega C_M}}{Z_{ЛИ}(\omega) + \frac{1}{j\omega C_M}}. \quad (3)$$

Используя формулы (1)–(3), можем найти полное сопротивление цепи $Z(\omega)$, изображенной на рис. 1:

$$Z(\omega) = Z_n(\omega) + j\omega L_M. \quad (4)$$

Для нахождения точных значений RLC-параметров составим систему уравнений:

$$\begin{cases} Z(\omega_1, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_1(\omega_1) + j \operatorname{Im} Z_1(\omega_1) \\ Z(\omega_2, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_2(\omega_2) + j \operatorname{Im} Z_2(\omega_2) \\ \dots \\ Z(\omega_N, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_N(\omega_N) + j \operatorname{Im} Z_N(\omega_N), \end{cases} \quad (5)$$

где $R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M$ – неизвестные величины, а $\omega_i, \operatorname{Re} Z_i(\omega_i), \operatorname{Im} Z_i(\omega_i)$ – измеряемые.

Система из N комплексных уравнений распадается на $2N$ действительных уравнения. Следовательно, для определения восьми (в данном случае) неизвестных величин достаточно провести измерения активных и реактивных составляющих полных сопротивлений ЛИ на четырех ча-

стотах и записать систему из четырех комплексных уравнений (5).

Графики зависимостей активной и реактивной составляющих полного сопротивления от частоты при отсутствии тока накачки представлены на рис. 2а и 2б соответственно.

Аналогичные зависимости были сняты при номинальном токе накачки ЛИ $I = 68$ мА (рис. 3а, 3б).

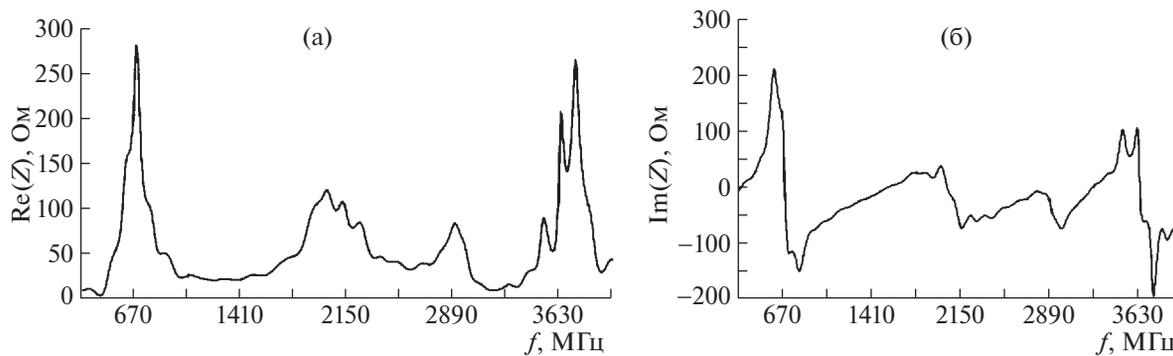


Рис. 2. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих полного сопротивления при отсутствии тока накачки.

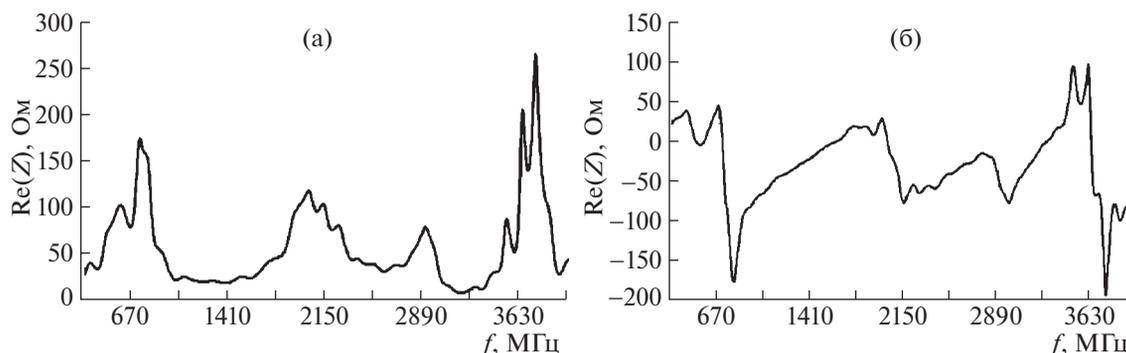


Рис. 3. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих полного сопротивления при номинальном токе накачки $I = 68$ мА.

Для расчета значений RLC-параметров ЛИ была написана программа в среде MatLab, выполняющая решение составленной системы уравнений, используя встроенный алгоритм решения системы нелинейных уравнений, содержащих комплексные числа.

Для оценки влияния паразитных элементов корпуса на ширину полосы пропускания ЛИ построим на одном графике две кривые, рассчитанные при разных значениях RLC-параметров. В качестве первого примера используем значения при токе, равном 68 мА. Для второго варианта используем произвольные меньшие значения RLC-параметров корпуса. Было выявлено, что при внесении изменений в значения параметров элементов чипа лазерного диода (C , L , R , R_{se}) практически не происходит изменения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), а существенное влияние оказывают величины параметров корпуса: C_k , L_B , и R_k .

Графики зависимости АЧХ в логарифмическом масштабе от частоты модуляции при токе, равном 68 мА, при двух вариантах значений параметров корпуса показаны на рис. 4: кривая 1 –

при $C_k = 10$ пФ, $L_B = 2$ нГн, $R_k = 2$ Ом; кривая 2 – при $C_k = 5$ пФ, $L_B = 1$ нГн, $R_k = 1$ Ом.

Из рис. 4 видно, что по уровню -3 дБ верхние частоты полосы пропускания составляют $f = 1.471$ (кривая 1) и 2.001 ГГц (кривая 2). Таким образом, уменьшение индуктивности выводов с 2 до 1 нГн, контактного сопротивления с 2 до 1 Ом и емкости корпуса с 10 до 5 пФ приводит к увеличению полосы пропускания по уровню -3 дБ на 530 МГц.

В ходе исследования установлено, что существенное ограничение на ширину полосы модуляции полупроводниковых одномодовых лазеров накладывают паразитные элементы корпуса, наибольший вклад из которых дает индуктивность выводов.

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ АВТОГЕНЕРАЦИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

Актуальной задачей является разработка радиочастотных генераторов, работающих в СВЧ-диапазоне, обладающих высокой стабильностью частоты, широкой полосой перестройки, а также небольшими размерами и массой. По

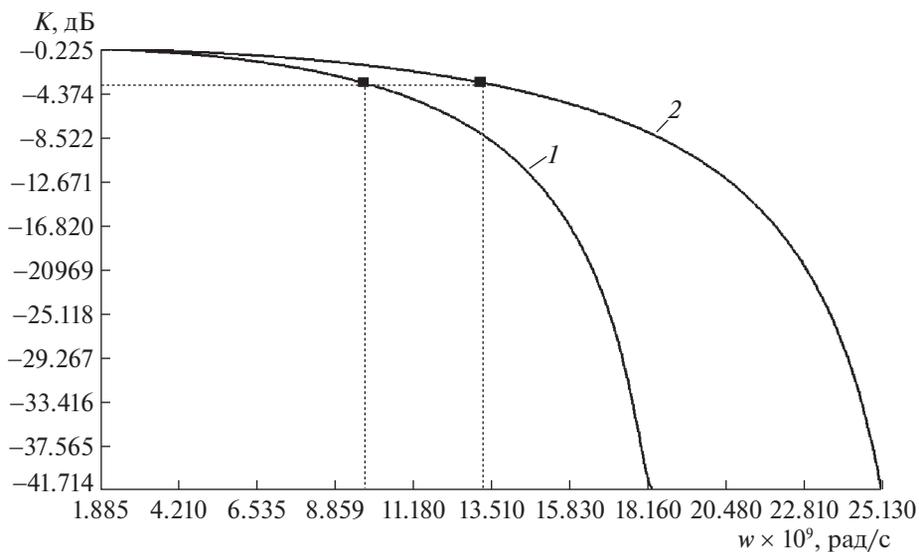


Рис. 4. Рассчитанные амплитудно-частотные характеристики лазерного излучателя.

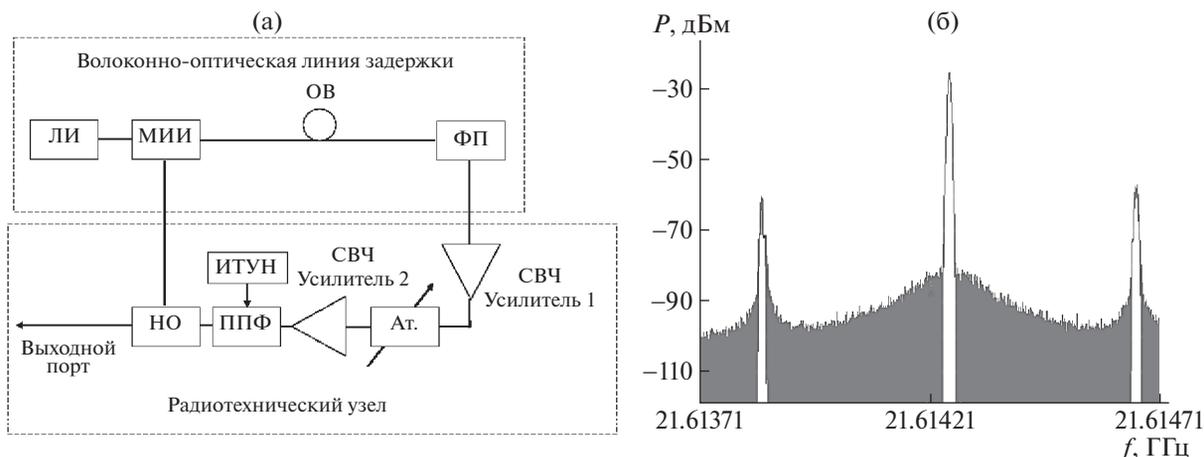


Рис. 5. Структурная схема (а) и спектрограмма выходного сигнала (б) автогенератора с внешним электрооптическим модулятором.

принципу работы и схеме построения оптоэлектронный генератор аналогичен классическому радиочастотному автогенератору с линией задержки в цепи обратной связи. Особенностью его работы является многочастотный характер генерируемых колебаний, для которых выполняются условия баланса амплитуд и баланса фаз. Структурная схема лабораторного макета радиочастотного автогенератора и спектр его выходного сигнала представлены на рис. 5.

Принцип работы автогенератора в стационарном режиме следующий. Непрерывное излучение ЛИ поступает на вход модулятора интенсивности излучения (МИИ). Далее модулированное СВЧ-сигналом оптическое излучение проходит через оптическое волокно и поступает

на вход фотоприемника, в котором происходит его демодуляция. Высокодобротный полосно-пропускающий фильтр (ППФ) выделяет частоту генерации, подавляя СВЧ-колебания на других частотах. Для стабильной работы ППФ используется источник тока, управляемый напряжением. Демодулированный СВЧ-сигнал усиливается и поступает на направленный ответвитель, который одну часть сигнала направляет в выходной порт генератора, а другую — на управляющий вход МИИ, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи.

Оценочный расчет ожидаемых спектральных характеристик сигнала радиопотонного автогенератора по известной методике приведен ниже.

Определение времени задержки распространения сигнала в оптическом волокне

$$\tau_{ОВ} = \frac{nl}{c} = \frac{1.45 \times 515}{3 \times 10^8} = 2.489 \times 10^{-6} \text{ (с)},$$

где n – показатель преломления световода, l – длина волоконного световода, c – скорость света в свободном пространстве.

Определение расстояния между двумя соседними модами

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_{ВОТ}} = \frac{1}{2.489 \times 10^{-6}} \cong 402 \text{ (кГц)}.$$

Было проведено экспериментальное исследование спектрального состава выходного сигнала автогенератора с помощью анализатора спектра Rohde&Schwarz FSU50, при этом мощность лазера составляла 10 дБм, а длина оптической линии задержки – 515 м. Результат такого исследования при полосе обзора анализатора 1 МГц представлен на рис. 5б. Из этого рисунка видно, что расстояние между соседними модами в спектре выходного сигнала составило 407 кГц, что соответствует теоретическим оценкам.

Также была предпринята попытка измерить фазовый шум отдельной спектральной составляющей сигнала, но ввиду того, что собственные шумы анализатора превышали фазовый шум генератора, измерить последний не удалось. В связи с этим можем говорить лишь о том, что фазовый шум на частоте $f = 16.720857$ ГГц не хуже – 105 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц.

ГЕТЕРОДИННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

Еще одним актуальным вопросом является возможность сопряжения волоконно-оптического тракта и радиоканала с применением метода оптического гетеродинирования. Принцип данного метода заключается в том, что при попадании на светочувствительную площадку фотодетектора (ФД) излучения с несколькими частотами его выходной сигнал будет содержать гармоники этих частот, а также составляющие с разностными и суммарными частотами исходных колебаний.

Устройство, основанное на принципе оптического гетеродинирования, было смоделировано в системе автоматизированного проектирования (САПР) OptiSystem. Также разработана функциональная схема устройства (рис. 6), способного моделировать работу двух устройств: когерентного оптического приемника и формирователя радиочастотных сигналов.

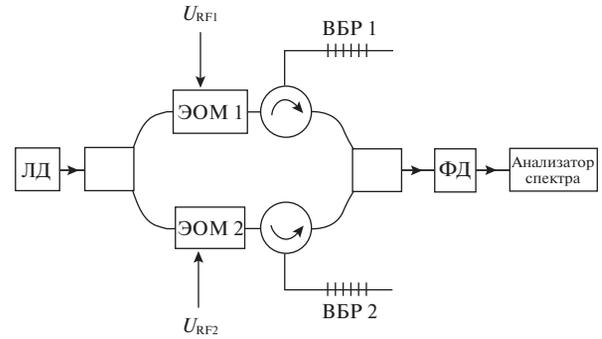


Рис. 6. Функциональная схема макета-имитатора.

Принцип работы данной схемы заключается в следующем. Сигнал с лазерного диода с помощью разветвителя направляется в два плеча, в каждом из которых присутствует электрооптический модулятор, на СВЧ-входы которых подаются сигналы с близкими частотами от генераторов. Таким образом в каждом плече после модуляторов получаем сигналы, в спектрах каждого из которых присутствуют несущая и две боковые составляющие. Далее эти сигналы поступают на оптические фильтры, выполненные на базе волоконных брэгговских решеток. С помощью фильтров из полного спектра выделяем по одной боковой полосе в каждом плече и с помощью оптического сумматора направляем сигналы на приемную площадку ФД. Необходимо подобрать такие частоты модулирующих сигналов, чтобы после выделения боковых полос в каждом плече разность частот этих боковых полос лежала в СВЧ-диапазоне и не превышала верхнюю граничную частоту ФД.

Результат моделирования описанного устройства в САПР OptiSystem представлен на рис. 7. Модулирующие напряжения U_{RF1} и U_{RF2} были выбраны равными 18 и 10 ГГц соответственно. На выходе ФД был получен СВЧ-сигнал с частотой 7.97 ГГц и уровнем мощности – 34 дБм.

После моделирования устройства в САПР собрали экспериментальную установку. Фильтры были исключены из схемы для получения всех возможных комбинационных составляющих, в том числе на искомой частоте 7.97 ГГц. На рис. 8 представлен спектр на выходе ФД. Можно видеть, что был сформирован СВЧ-сигнал с частотой 7.98 ГГц и уровнем мощности – 107 дБм.

Различия в уровнях мощностей, полученных при моделировании схемы и в результате экспериментального измерения, можно объяснить потерями в реальном оптическом тракте, а также на разъёмных соединениях лабораторного макета.

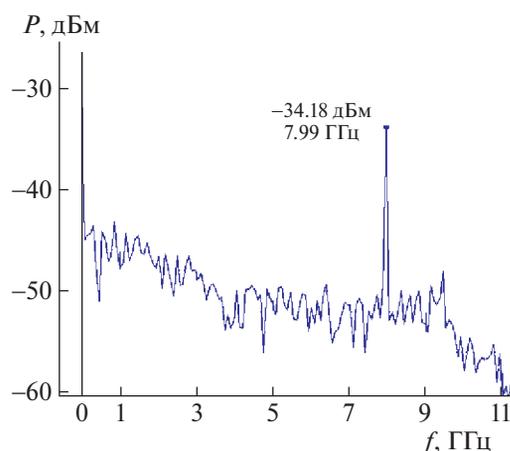


Рис. 7. Спектр на выходе ФД при моделировании в САПР.

РАДИОФОТОННЫЕ УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ: УМНОЖИТЕЛЬ И СМЕСИТЕЛЬ

Смеситель сигналов является важным компонентом приемопередающей аппаратуры, спутникового оборудования, информационно-измерительных систем и т.д. [2–4]. Наибольшее распространение получили диодные смесители частот, обладающие высоким быстродействием и низким уровнем шумов. Но перспективными и принципиально новыми являются смесители сигналов, построенные на элементной базе радиофотоники. Главным преимуществом таких смесителей является широкая полоса рабочих частот, ограниченная лишь пропускной способностью его оптических компонентов. Пример реализации смесителя СВЧ-сигналов на дискретной элементной базе радиофотоники представлен на рис. 9. На представленной структурной схеме приняты обозначения: ЛИ – лазерный излуча-

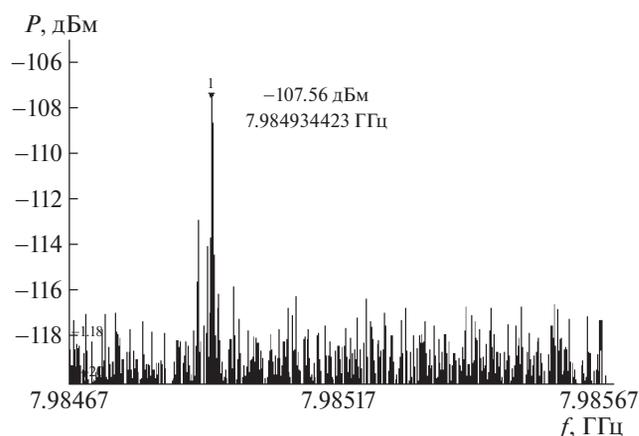


Рис. 8. Спектр на выходе ФД.

тель; ММЦ 1, ММЦ 2 – оптоэлектронные модуляторы на базе интерферометра Маха–Цандера; ФД – фотодетектор.

Принцип действия такого смесителя заключается в следующем: оптический сигнал с ЛИ поступает на ММЦ 1, модулируется первым СВЧ-сигналом. Оптический спектр на выходе ММЦ 1 содержит три гармонические составляющие. Полученный сигнал повторно модулируется в ММЦ 2 вторым СВЧ-сигналом. Спектр на выходе ММЦ 2 содержит девять гармонических составляющих, среди которых присутствуют гармоники на разностной и суммарной частоте СВЧ-сигналов. Затем сигнал детектируется ФД.

Главными элементами такого радиофотонного смесителя являются электрооптические модуляторы [5]. Перед проведением теоретических и экспериментальных исследований были сняты модуляционные характеристики (МХ) обоих модуляторов и определены полуволновые напряжения.

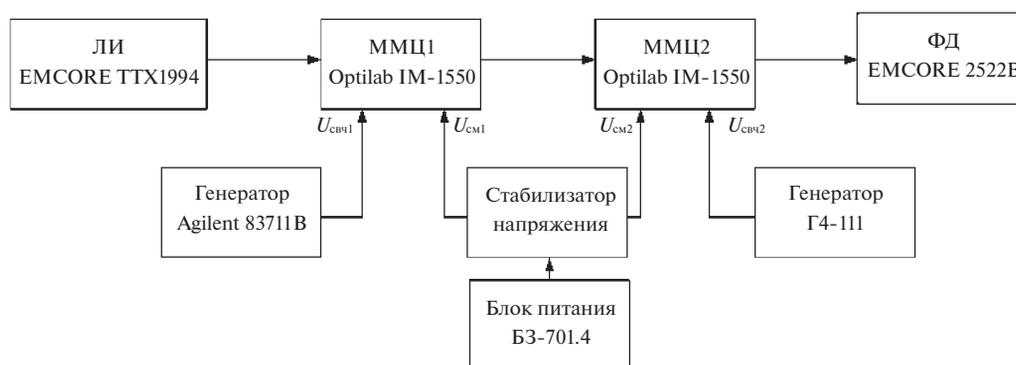


Рис. 9. Структурная схема лабораторного макета: ЛИ – лазерный излучатель, ММЦ 1, ММЦ 2 – оптоэлектронные модуляторы на базе интерферометра Маха–Цандера, ФД – фотодетектор.

Мощность оптического излучения на выходе второго модулятора можно выразить как

$$P_{\text{выхонт}} = P_0 \operatorname{Re} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_{n,m}^2 e^{i(n\omega_n + m\omega_m)t},$$

где $W_{n,m} = \frac{i^{n+m}}{2} \left(e^{\frac{i\pi(U_{01}-U_{02})}{2}} J_m \left(-\frac{\pi U_{x2}}{2} \right) + e^{\frac{i\pi(U_{01}+U_{02})}{2}} \times \right. \\ \left. \times J_m \left(\frac{\pi U_{x2}}{2} \right) \right) J_n \left(\frac{\pi U_{x1}}{2} \right) e^{i(m\varphi_m + n\varphi_n)}$, U_{01}, U_{02} – нормированные напряжения смещений, U_{x1}, U_{x2} – нормированные амплитуды модулирующих напряжений, ω_n, ω_m – круговые частоты модулирующих сигналов.

Выходная мощность СВЧ-сигнала на выходе фотоприемника будет определяться как

$$P_{\text{вых}} = \frac{(0.4R\Pi_{\text{ФД}}P_{\text{вх}})^2}{4\alpha_{\text{ЭОМ}}^4} \times \\ \times \left\{ 1 + \left[\cos(\phi_{01}) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{см1}}}{U_{\pi}} \right) \left(J_0 \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_n t) \right) - \right. \\ \left. - \cos(\phi_{01}) \sin \left(\pi \frac{U_{\text{см1}}}{U_{\pi}} \right) \times \right. \\ \left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_n t) - \right. \\ \left. - \sin(\phi_{01}) \sin \left(\pi \frac{U_{\text{см1}}}{U_{\pi}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[J_0 \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_n t) \right] - \right. \\ \left. - \sin(\phi_0) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{см1}}}{U_{\pi}} \right) \times \right. \\ \left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх1}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_n t) \right] \Big\}^2 \times \\ \times \left\{ 1 + \left[\cos(\phi_{02}) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{см2}}}{U_{\pi}} \right) \left(J_0 \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_n t) \right) - \right. \\ \left. - \cos(\phi_{02}) \sin \left(\pi \frac{U_{\text{см2}}}{U_{\pi}} \right) \times \right. \\ \left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_n t) - \right. \\ \left. - \sin(\phi_{02}) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{см2}}}{U_{\pi}} \right) \times \right. \\ \left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_n t) \right] \Big\}^2,$$

$$- \sin(\phi_{02}) \sin \left(\pi \frac{U_{\text{см2}}}{U_{\pi}} \right) \left[J_0 \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_n t) \right] - \\ - \sin(\phi_{02}) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{см2}}}{U_{\pi}} \right) \times \\ \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх2}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_n t) \Big\}^2,$$

где $\Pi_{\text{ФД}}$ – чувствительность фотоприемника, $\alpha_{\text{ЭОМ}}$ – потери в электрооптических модуляторах, R – сопротивление нагрузки фотоприемника.

Экспериментально исследовали спектр сигнала на выходе модулятора ММЦ 2. При выполнении экспериментальных исследований максимальный уровень комбинационных составляющих на выходе второго модулятора был зафиксирован при $U_{\text{см1}} = 7.35$, $U_{\text{см2}} = 7.80$ В, $P_{\text{СВЧ1}} = 15$, $P_{\text{СВЧ2}} = 13$ дБм, $P_{\text{опт}} = 15$ дБм, $\lambda = 1550$ нм. Он составил порядка -40 дБм. Частоты модулирующих сигналов были равны $f_1 = 4$, $f_2 = 12$ ГГц. Теоретический спектр оптического сигнала на выходе второго модулятора при данных условиях показан на рис. 10а, а на выходе ФД – на рис. 11а.

Экспериментально полученный спектр оптического сигнала на выходе второго модулятора показан на рис. 10б, а на выходе ФД – на рис. 11б. Как видно из рис. 11, спектр сигнала, рассчитанный теоретически, совпадает с экспериментальными результатами с точностью до 4 дБм.

Главным преимуществом полученного смесителя является широкая рабочая полоса частот, ограниченная лишь граничными частотами работы ФД и внешних электрооптических модуляторов. Уровень комбинационных составляющих, полученный экспериментально, обуславливается максимальными мощностями генераторов радиочастотных сигналов.

Также на основе волоконно-оптической линии задержки выполняются радиотонные умножители частоты, которые представляют большой интерес прежде всего тем, что работают по новому принципу, не схожему с применяемыми в классических умножителях. Основным элементом простейшего радиотонного умножителя является модулятор на основе интерферометра Маха–Цандера, рабочая точка которого смещена в экстремум МХ.

На управляющие входы модулятора подаются напряжение смещения (для изменения положения рабочей точки на МХ) от источника питания и ВЧ-сигнал от генератора ВЧ-сигналов. По изменению уровня первой гармоники в зависимо-

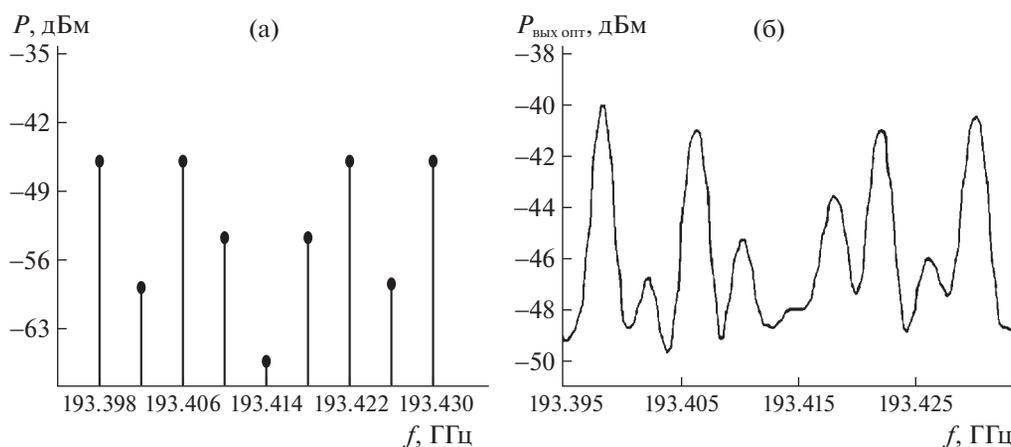


Рис. 10. Оптический спектр на выходе второго модулятора: теоретический (а) и экспериментальный (б).

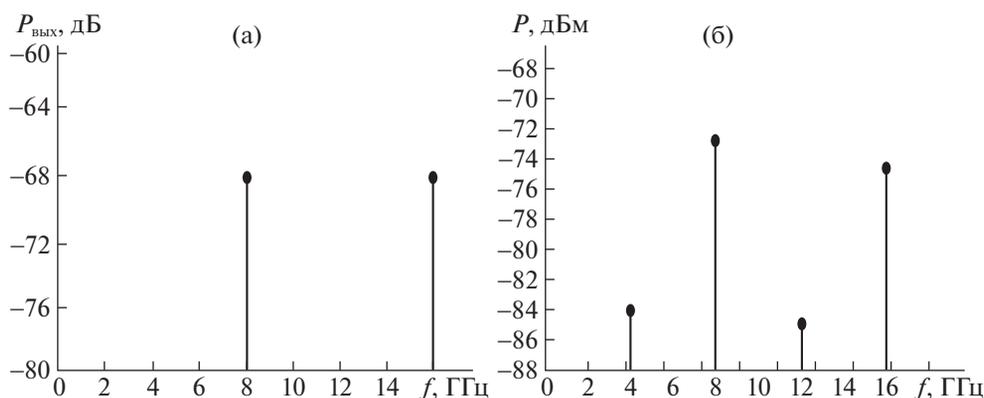


Рис. 11. Радиочастотный спектр на выходе фотодетектора: теоретический (а) и экспериментальный (б).

сти от величины прикладываемого напряжения смещения можно судить о виде МХ исследуемого модулятора. Если рабочая точка находится в области квадратуры МХ, то уровень первой гармоники на выходе достигает своего максимального значения. Если рабочая точка находится в максимуме или минимуме МХ — наблюдаются минимальные значения первой гармоники. Именно при работе на нелинейных участках МХ можно реализовать умножение частоты.

Для используемого модулятора было экспериментально определено напряжение смещения, при котором рабочая точка оказывается в экстремуме МХ. Это напряжение составило 2.3 В.

Экспериментально получены зависимости уровней первой и второй гармоник в спектре выходного сигнала умножителя от уровня мощности модулирующего СВЧ-сигнала с частотой 1 ГГц при постоянной мощности оптической несущей 6 дБм. Они представлены на рис. 12а. При положении рабочей точки в экстремуме МХ электрооптического модулятора на выходе фотопри-

емника первая гармоника (кривая 1 на рис. 12а) подавлена, а вторая (кривая 2 на рис. 12а) возрастает линейно с ростом мощности модулирующего сигнала.

Одним из существенных недостатков интегрального модулятора на основе интерферометра Маха—Цендера является изменение положения рабочей точки. Причиной этого могут быть как внешние источники (температура, влажность или механическая нагрузка), так и внутренние, связанные с перераспределением электрического заряда внутри структур модулятора. В результате возникает необходимость постоянной подстройки напряжения смещения на электродах модулятора с целью удержания интерферометра Маха—Цендера в точке минимума пропускания первой гармоники (чтобы реализовать умножение частоты входного ВЧ-сигнала). В проведенном эксперименте зависимость значения напряжения смещения от уровня мощности ВЧ-сигнала имеет вид, приведенный на рис. 12б. При повышении мощности входного сигнала от -3 до 1 дБм на-

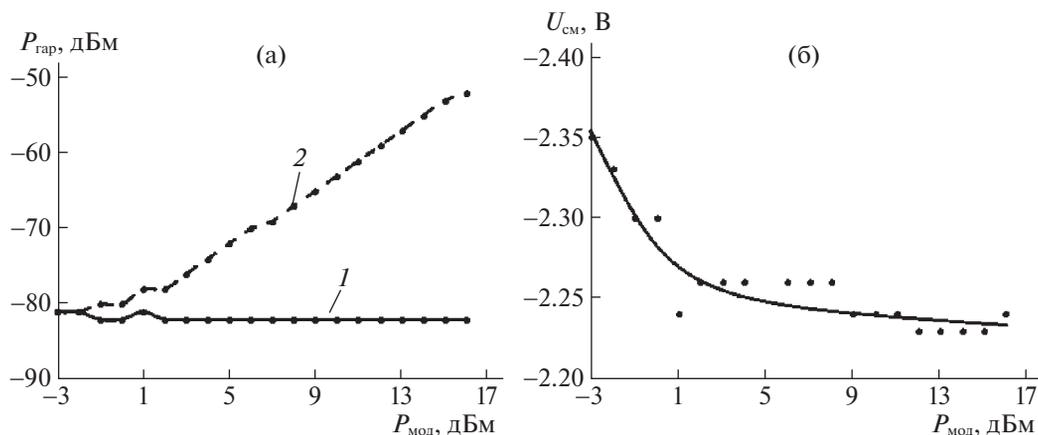


Рис. 12. Зависимость уровней первых двух гармоник от входной мощности входного СВЧ-сигнала при $U_{см} \approx 2.3$ В (а) и зависимость напряжения смещения от мощности входного ВЧ-сигнала (б).

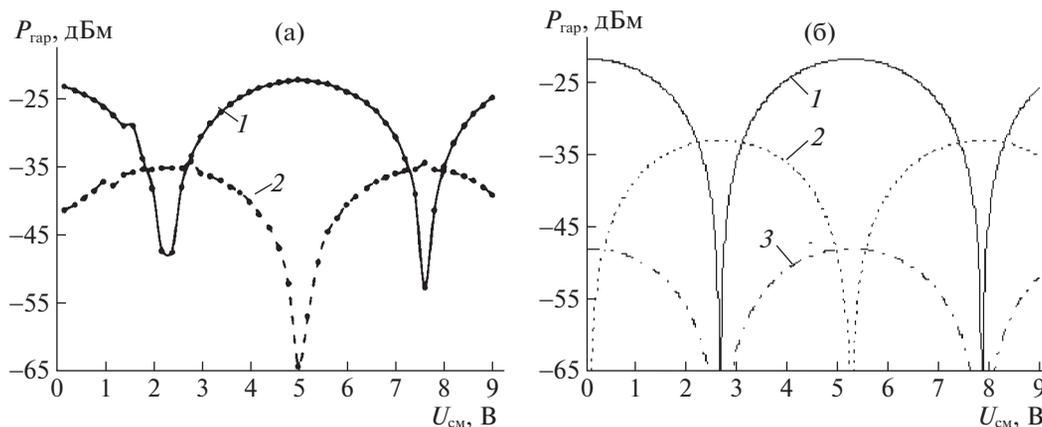


Рис. 13. Экспериментально (а) и теоретически (б) полученные зависимости уровня первых гармоник от напряжения смещения.

пряжение смещения изменяется достаточно ощутимо – в пределах 0.1 В. При дальнейшем увеличении мощности эти изменения уже значительно меньше – в пределах 0.03 В.

С использованием той же экспериментальной установки, но зафиксировав уровень модулирующего сигнала на уровне 16 дБм, а оптическую мощность на уровне 15 дБм и изменяя напряжение смещения в пределах от 0 до 9 В, была получена зависимость мощностей первой и второй гармоник на выходе фотоприемника от напряжения смещения, подаваемого на управляющий вход модулятора (рис. 13а). Из рисунка видно, что происходит перераспределение энергии между первой (кривая 1) и второй (кривая 2) гармониками. Если рабочая точка находится в “квадратуре”, то наблюдается максимум на основной частоте, при смещении рабочей точки происходит возрастание

уровня второй гармоник и понижение уровня первой. В точке максимальной нелинейности МХ первая гармоника подавлена относительно второй на 20–25 дБм.

Используя формулу

$$U_{\text{вых СВЧ}} = \frac{0.4R\Pi_{\text{ФД}}P_{\text{вх}}}{\alpha_{\text{ЭОМ}}} \times \left\{ 1 + b \left[\cos(\phi_0) \cos\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) \left(J_0\left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}\left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}}\right) \cos(2n\omega_m t) \right) - \cos(\phi_0) \sin\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) \times \right.$$

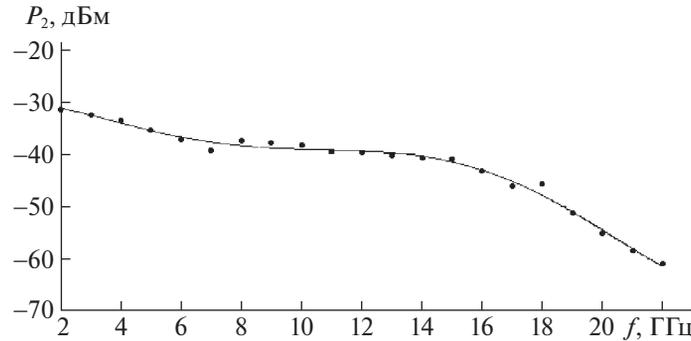


Рис. 14. Частотная зависимость уровня второй гармоники.

$$\begin{aligned} & \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ ВХ}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_{\text{м}}t) - \\ & \quad - \sin(\phi_0) \sin \left(\pi \frac{U_{\text{СМ}}}{U_{\pi}} \right) \times \\ & \times \left[J_0 \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ ВХ}}}{U_{\pi}} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ ВХ}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_{\text{м}}t) \right] - \\ & \quad - \sin(\phi_0) \cos \left(\pi \frac{U_{\text{СМ}}}{U_{\pi}} \right) \times \\ & \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ ВХ}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_{\text{м}}t) \Bigg\}, \end{aligned}$$

где R и $P_{\text{ФД}}$ — нагрузка и чувствительность фотодетектора соответственно, $P_{\text{ВХ}}$ — мощность оптической несущей на входе модулятора, и учитывая, что мощность, выделяемую в нагрузке ФД, можно найти как $\frac{U_{\text{ВЫХ СВЧ}}^2}{2R}$, получим выражения для определения мощностей отдельных гармоник. Теоретически рассчитанная зависимость уровня первых трех гармоник от напряжения смещения приведена на рис. 13б. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими не только качественно, но и количественно.

В ходе экспериментального исследования радиофотонного умножителя частоты СВЧ-сигнала была получена частотная зависимость уровня второй гармоники (рис. 14).

Приведенная зависимость показывает, что в рабочей полосе частот модулятора и фотоприемника (верхняя граничная частота 20 ГГц) уровень второй гармоники изменяется монотонно, что является основным преимуществом рассматриваемого умножителя частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования паразитных параметров лазерных излучателей показано, что существенное ограничение на ширину полосы модуляции полупроводниковых одномодовых лазеров накладывают паразитные элементы корпуса, наибольший вклад из которых дает индуктивность выводов.

Оптоэлектронные автогенераторы радиосигналов, работающие в СВЧ-диапазоне, обладают высокой стабильностью частоты и широкой полосой перестройки (определяется используемыми оптическими и радиотехническими компонентами), а также небольшими размерами и массой. По принципу работы и схеме построения оптоэлектронный генератор аналогичен классическому радиочастотному автогенератору с линией задержки в цепи обратной связи.

Радиочастотные сигналы могут быть сформированы путем сложения на чувствительной площадке фотодетектора двух волн с близкими частотами, генерируемых лазерными источниками. Для формирования сигналов со сверхнизким значением фазового шума необходимо выполнение условия фазовой синхронизации излучений лазерных источников. Частота формируемого радиочастотного сигнала в этом случае ограничена лишь верхней граничной частотой фотоприемника. Системы с оптическим гетеродинамированием по сравнению с квадратичным детектированием дополнительно позволяют усиливать радиочастотные сигналы путем изменения мощности гетеродина.

Использование средств радиофотоники является перспективным для развития таких устройств, как преобразователи частоты. Уровень и число спектральных составляющих на выходе модулятора зависит от мощности СВЧ-сигнала и оптического излучения, а также от местоположения рабочей точки на модуляционной характеристике модулятора. Из эксперимента видно, что при уровне СВЧ-сигнала более 2 дБм и напряже-

нии смещения, необходимом для вывода рабочей точки на нелинейный участок модуляционной характеристики модулятора, можно наблюдать в выходном спектре лишь вторую гармонику, первая будет находиться на уровне шумов измерительного прибора. Основным преимуществом радиофотонных умножителей частоты является широкая полоса рабочих частот, которая определяется граничными частотами работы модулятора и фотоприемника, а главным недостатком — малый коэффициент преобразования во вторую гармонику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков Н.С., Крюкова И.В., Чуковский Н.Н.* // *Машиностроение и компьютерные технологии.* 2012. № 3. С. 22.
2. *Белюсов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В. и др.* // *Прикладная фотоника.* 2014. № 1. С. 65.
3. *Морозов О.Г., Бурдин В.А., Морозов Г.А. и др.* // *Прикладная фотоника.* 2015. Т. 2. № 3. С. 223.
4. *Manika M.E.* // *Microwave Photonics.* 2008. P. 275. <https://doi.org/10.1109/MWP.2008.4666690>
5. *Бирюков В.В., Грачев В.А., Капустин С.А. и др.* // *Матер. XXVI междунар. Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо-2016).* 2016.