

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.2>

УДК: 621.373.826

ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И РЕЗОНАТОРА «МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ» ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА РЛС

Н.К. Галкин, Н.А. Голов, И.И. Юрасова

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Статья поступила в редакцию 17 мая 2022 г.

Аннотация. Исследованы и обобщены технологии создания микрорезонаторов на основе эффекта «мод шепчущей галереи» (МШГ) и лазеров с распределенной обратной связью (РОС), применяемых в оптоэлектронном генераторе (ОЭГ) радиочастотных колебаний. Представлен расчет собственных частот МШГ резонатора и РОС-лазера. Реализовано программное моделирование распределения электромагнитного поля в среде MATLAB. Предложен подход к технологии изготовления РОС-лазера с низким уровнем фазовых шумов на основе фотонного кристалла (ФК). Рассмотрена возможность применения данного лазера и резонатора в оптоэлектронной системе формирования сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала для создания когерентных радиофотонных радиолокаторов. Показаны преимущества данных лазеров для создания единого задающего ОЭГ перспективных многодиапазонных радиолокационных станций.

Ключевые слова: РОС-лазер, МШГ-резонатор, оптоэлектронный генератор (ОЭГ), радиофотонные РЛС.

Автор для переписки: Галкин Никита Константинович,
selenium322@gmail.com

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются технологии интегральной и волоконной оптики [1], включая разработку оптических устройств с малыми габаритами, фильтров, модуляторов и т. д. Однако, дальнейшее развитие когерентной оптики и систем формирования и оптической обработки СВЧ сигналов требует перехода к чисто оптическим линейным и нелинейным устройствам, которые позволят значительно сократить габариты приборов, уменьшить их энергопотребление и повысить быстродействие. В связи с этим, актуальной задачей является создание схем ОЭГ с малым уровнем шума, которые позволят улучшить технические характеристики различных радиолокационных средств.

Задающий ОЭГ является одним из главных устройств, применяемых в перспективных радиофотонных РЛС с оптоэлектронной системой формирования СВЧ сигнала. Структурно его можно разделить на колебательную систему оптического и радиочастотного диапазонов, рисунок 1.

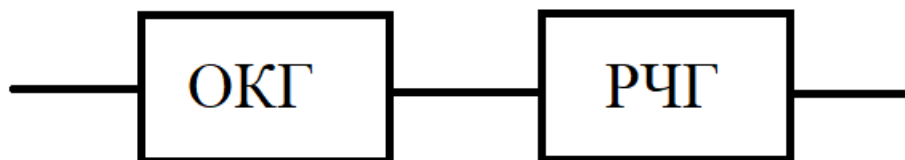


Рис. 1. ОЭГ, состоящий из двух колебательных систем [2]. ОКГ – оптический квантовый генератор, РЧГ – радиочастотный генератор

Для формирования оптических колебаний могут применяться РОС-лазер или лазер непрерывного излучения и МШГ-резонатор, поэтому возникает необходимость анализа и оценки их характеристик для применимости в задающем ОЭГ.

Применение МШГ-резонатора позволяет добиться высокой добротности [3], что необходимо для создания задающих колебательных систем РЛС. При разработке МШГ-резонатора требуется учитывать особенности ввода и вывода излучения, технологические аспекты обработки торцевой и образующей поверхности и требования к борьбе с внешними воздействиями, такими как

вибрации и климатические условия, поскольку все это влияет на характеристики РЛС.

РОС-лазер имеет структуры с регулярными неоднородностями, расположенными с периодом, сравнимым с длиной электромагнитной волны [4]. Такие структуры позволяют генерировать спектрально чистое излучение с узкой шириной пика. Однако если МШГ резонаторы могут быть изготовлены сравнительно просто с помощью механической обработки, то получение РОС-структур (и микрорезонаторов МШГ) с периодом около сотен нанометров для оптического диапазона стало возможным лишь в последние годы и массовых технологий не так много (в основном экспериментальные лабораторные установки). Отдельным вопросом является особенности их применения в оптоэлектронных системах формирования зондирующего сигнала радиодифракционных РЛС.

Для решения данных вопросов необходимо рассмотреть существующие технологии изготовления микрорезонаторов МШГ и РОС-лазеров. Для оценки характеристик будущего ОЭГ, провести расчет собственных частот и моделирование распределения электромагнитного поля. Рассмотреть возможность создания ОЭГ на основе данного микрорезонатора и лазера для улучшения показателей эффективности РЛС. Предложить подход к технологии изготовления РОС-лазера с низким уровнем фазовых шумов для применения в ОЭГ радиочастотного диапазона.

1. Резонатор на основе эффекта «мод шепчущей галереи» (МШГ-резонатор)

Микрорезонаторы с модами шепчущей галереи являются перспективными элементами радиодифракционной оптики. На их основе предложено множество различных приборов, таких как сверхчувствительные химические и биологические датчики [5, 6], электрооптические модуляторы и приемники [7], оптоэлектронные генераторы [8, 9] и генераторы оптических гребенок [10, 11]. Они также широко используются в фундаментальных высокоточных экспериментах, например, в квантовой оптомеханике. Критическим моментом в экспериментальном

использовании резонаторов МШГ является реализация связи с остальной оптической схемой.

1.1 Ввод оптического излучения

Существует множество методов возбуждения МШГ [3], наиболее удобные и часто применяющиеся это: призмная связь и связь с помощью растянутого волоконного элемента, рисунок 2.

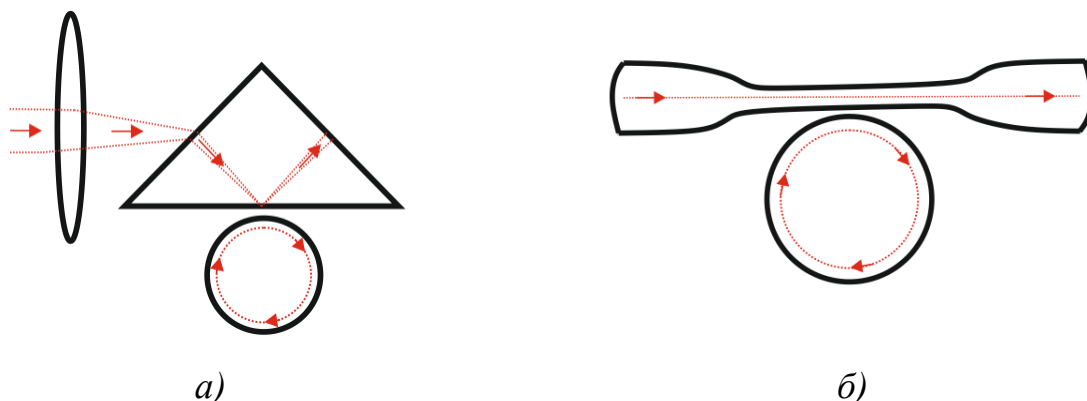


Рис. 2. Метод возбуждения МШГ с помощью призмного элемента *a)* и с помощью растянутого волокна *б)*

Эти оптические элементы позволяют гибко настраивать ввод оптического излучения и имеют сравнительно малые потери ввода. Таким образом, для больших кристаллических резонаторов МШГ связь обычно может быть настроена во время эксперимента, однако наибольший интерес представляют микрорезонаторы, выполненные по интегральной технологии на единой подложке, которые можно совмещать с изготовлением других элементов тракта ОЭГ.

1.2 Формы МШГ-резонаторов и технологии их изготовления

Возбуждение МШГ основано на принципе использования полного внутреннего отражения электромагнитной волны на границе раздела двух диэлектриков. Можно выделить две основные конструкции оптических резонаторов: диэлектрические резонаторы расположенные в воздушной среде, и резонаторы слюевой конструкции, состоящие из нескольких диэлектриков.

Геометрическая структура самого резонатора возможна в нескольких вариантах, таких как цилиндрические оптические волокна, микросферы, катушки из микрофибры, микродиски, микротороиды, полости фотонных кристаллов [12-14] и т.д. вплоть до самых экзотических конструкций, таких как бутылочные [15, 16] и пузырьковые микрорезонаторы [17-19]. Далее рассматриваются наиболее распространенные структуры резонаторов МШГ.

1.2.1 Сферический резонатор

В лаборатории МГУ был получен сферический резонатор на ножке с рекордной добротностью путем плавления кварцевого уса с утолщением на конце [3]. В качестве заготовки использовался высокочистый плавленный кварц марки КУВИ. Процесс изготовления показан на рисунке 3.

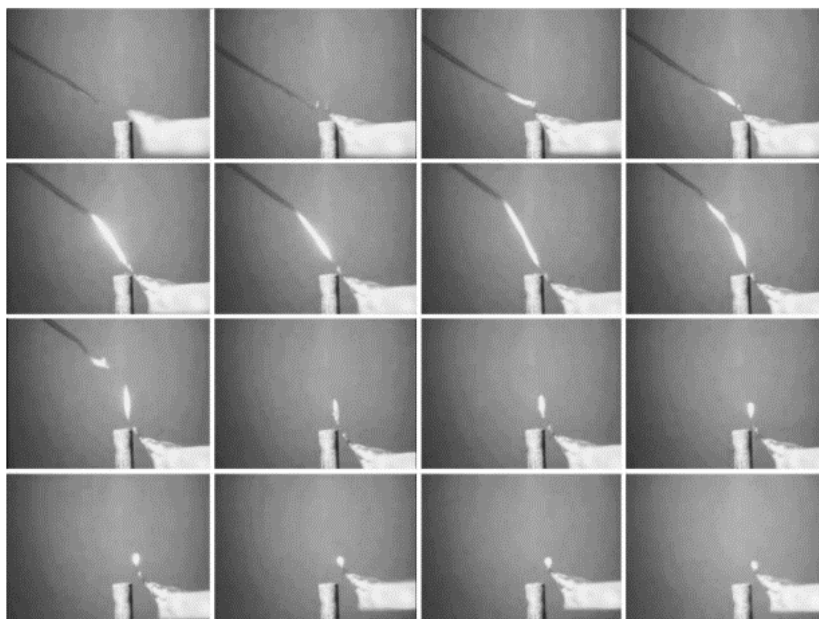


Рис. 3. Процесс изготовления микрорезонатора сферической формы в лаборатории МГУ [3]

Авторами работы [20] предложен метод изготовления резонаторов с добротностью порядка 10^8 в лабораторных условиях из стандартных оптических волокон толщиной 125 мкм. После предварительного испарения или механического удаления защитной пластиковой окантовки с участка в несколько сантиметров происходит также процедура растяжения до требуемой толщины,

которая определяется нужными размерами будущего резонатора. Резонатор формируется на растянутом конце, рисунок 4.

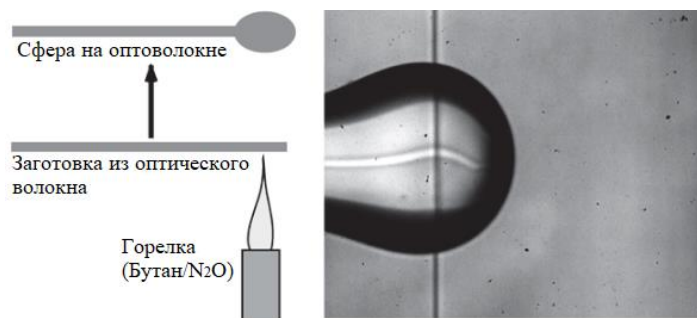


Рис. 4. Изготовление микросферического резонатора путем плавления оптического волокна в горячем пламени [20]

Данный способ позволяет обойтись без дополнительных подложек, поскольку резонаторы в экспериментальной установке могут фиксироваться за свободный конец оптоволокна.

Существуют также интегрированные методы создания сферических микрорезонаторов МШГ [21, 22]. Изготовленная сфера из диоксида кремния помещается в полое двухжильное волокно. Используя метод сужения волокна, микросфера прикрепляется к стенкам. Таким образом сразу решается проблема ввода излучения в резонатор. Проходящий свет от одномодового волокна с коническим входом попадает во встроенную кремнеземную микросферу через две подвешенные сердцевинки волокна и возбуждает моды шепчущей галереи. Пример реализации такой интегрированной структуры показан на рисунках 5-6.

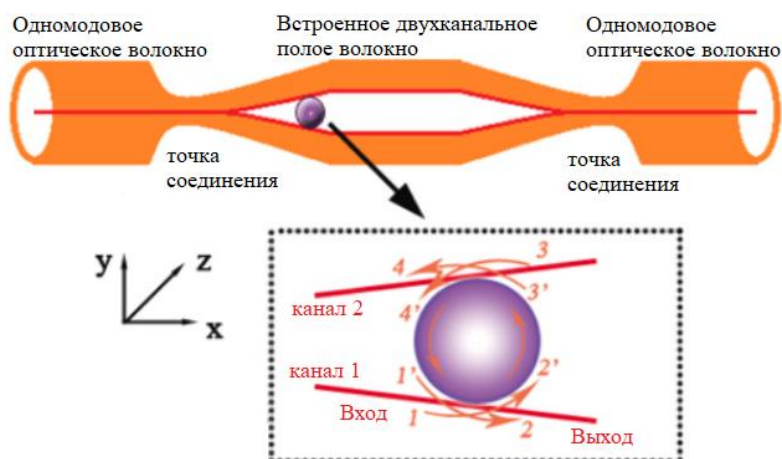


Рис. 5. Оптоволоконная структура с внедренной микросферой и распространение света в ней [21]

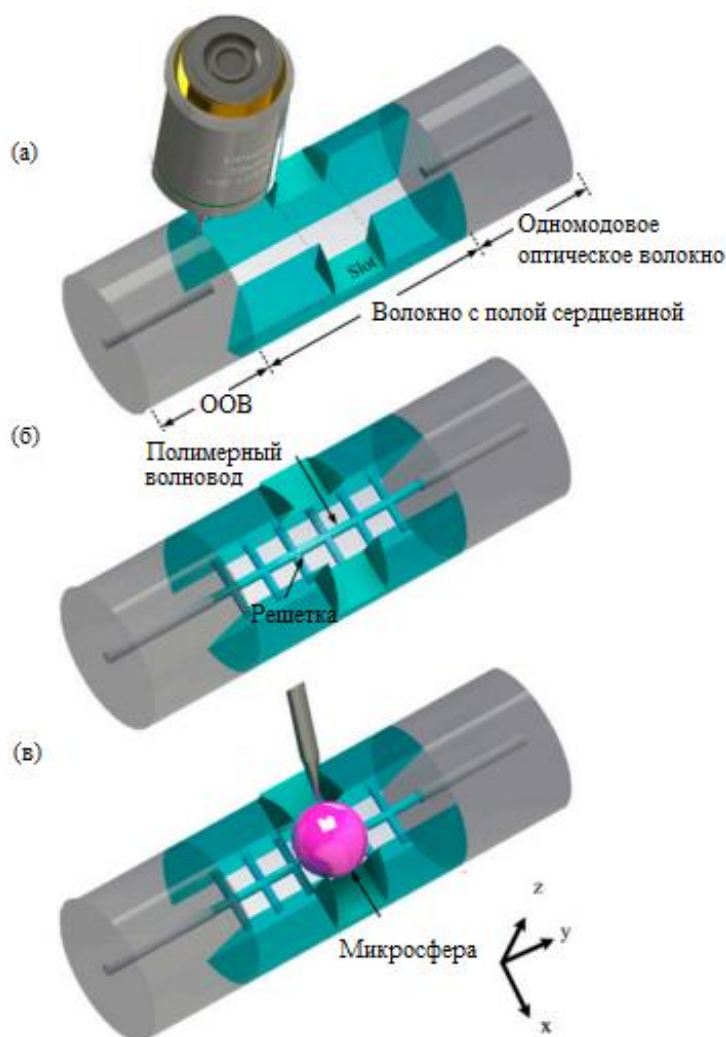


Рис. 6. Процедура изготовления интегрированного резонатора МШГ [22]

1.2.2 Дискковый резонатор

Процесс изготовления дискковых резонаторов МШГ состоит в следующем. Параллелепипед из чистого плавленого кварца или других материалов разрезается на пластины с помощью алмазной пилы. Пластины закрепляются на подложке, после чего из них вырезаются дискковые резонаторы. Боковая поверхность получившегося резонатора имеет высокую неоднородность, и как следствие, потери энергии, что препятствует к его дальнейшему применению. Заключительным этапом является обязательная шлифовка плоскостей диска с использованием, например, корундовых порошков с постепенным уменьшением гранул и окончательная полировка с использованием специальных полировальных пленок.

При изготовлении дисковых резонаторов микроразмера в процессе вырезки применяется лазерная абляция, а фрезерование боковой поверхности ведется посредством сфокусированного ионного пучка (СИП). В качестве исходной подложки используются коммерчески доступные подложки, например, из CaF_2 толщиной 1 мм. Пример изготовления дискового микрорезонатора представлен на рисунке 7.

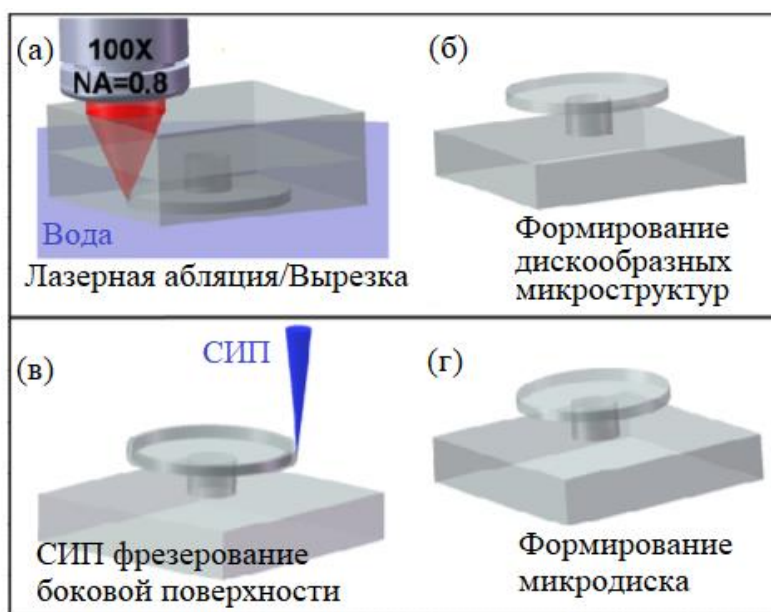


Рис. 7. Процесс изготовления микродиска из фторида кальция (CaF_2) с помощью фемтосекундной лазерной абляции с водой и с последующим СИП фрезерованием [23]

Особое внимание следует уделять обработке торцевой поверхности, так как она играет важную роль в возбуждении мод, поскольку оставленные на поверхности неоднородности могут значительно снизить добротность резонатора.

1.2.3 Тороидальный резонатор

Процесс изготовления схож с предыдущим способом (изготовления дискового резонатора), но при финальной обработке кварцевые диски нагреваются сверху лучом, например, CO_2 лазера, оплавливающим их края. В качестве теплоотвода служит кремниевый столбик в середине диска. Плавленный кварц непрозрачен для инфракрасного излучения CO_2 лазера с длиной волны 10,6 мкм, и поэтому поглощая его, нагревается, а кремний прозрачный в этом

диапазоне и излучение с ним не взаимодействует. Под действием сил поверхностного натяжения при плавлении краев кварцевого диска формируется гладкая тороидальная поверхность микрорезонаторов, рисунок 8.

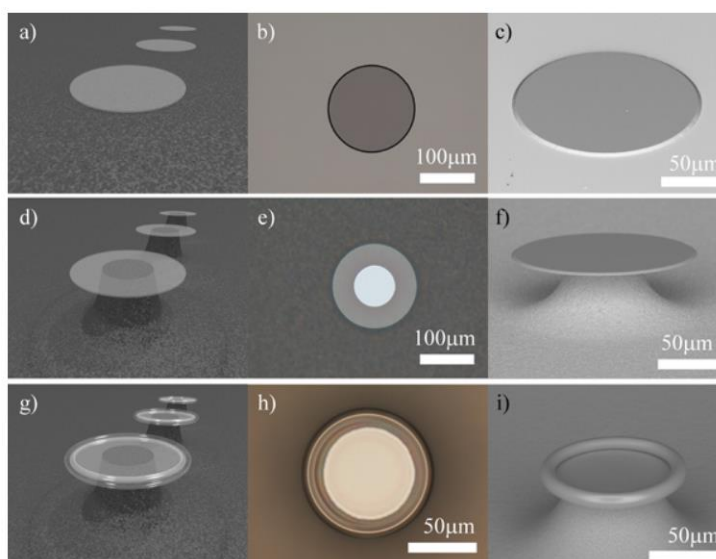


Рис. 8. Процесс изготовления микротороида, первый столбец: рендеринг, второй: оптическая микрофотография вида сверху, третий: вид сбоку [24]

1.3 ОЭГ на основе МШГ резонатора

Полученные в настоящее время экспериментальные образцы резонаторов МШГ обладают высокой добротностью и хорошим коэффициентом ввода, что позволяет их применять в ОЭГ при формировании задающих сигналов радиотонных РЛС.

В работе [25] предлагается оптоэлектронная система формирования СВЧ сигнала в дискретном исполнении, рисунок 9.

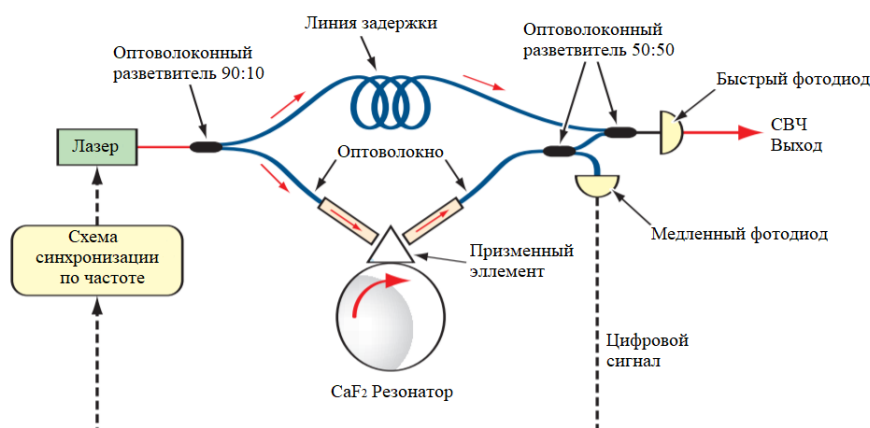


Рис. 9. Пример ОЭГ на основе сферического МШГ резонатора [25]

Лазер накачки, на алюмоиттриевом гранате, генерирует линейно поляризованный свет накачки с длиной волны 1,32 мкм. Свет поступает на оптоволоконный разветвитель, часть которого направляется в линию задержки, а другая передается на оптическую систему ввода излучения в резонатор МШГ, в качестве которой выступает срезанное волокно и призма, далее луч попадает в кристаллический дисковый резонатор из CaF_2 . Выходной свет резонатора собирается через другую сторону призмы связи и одномодовое оптическое волокно, которое передает свет на оптоволоконный делитель 50:50. Один выход этого разветвителя направляется на «медленный» фотодиод для получения сигнала постоянного тока и привязки лазера к определенной моде резонатора. Другой выход этого разветвителя объединяется с задержанным лазерным сигналом в другом оптоволоконном разветвителе 50:50, используемом в качестве сумматора. Выход сумматора подается на «быстрый» фотодиод, который демодулирует свет и генерирует СВЧ сигнал.

Однако в такой оптической конфигурации подача света непосредственно на «быстрый» фотодиод может не регистрировать СВЧ сигнал. Такое поведение характерно для фазомодулированного света, поэтому необходимо использовать интерферометр Маха-Цендера с двойным плечом. На одно плечо которого подается выход резонатора, а на другое задержка.

Также, дискретное исполнение ограничивает практическое применение в радиофотонных РЛС так как требуется точная настройка призмы относительно сферического МШГ резонатора, в связи с чем любые вибрации нарушают связь.

Авторы работы [26] исследуют ОЭГ, содержащий резонатор МШГ, предназначенный для создания малошумящих СВЧ сигналов в X-, Ku- и Ka-диапазонах частот. Генерируемый сигнал на частоте 9,4 ГГц имеет уровень фазового шума – 140 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц. Приведенная в работе зависимость лучше чем у электрических генераторов СВЧ сигнала. Например, генератор DSG3000B фирмы RIGOL [27] имеет уровень ФШ – 95 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц (несущая частота 10 ГГц), а генератор MXG фирмы Keysight

[28] имеет уровень ФШ – 130 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц (несущая частота 10 ГГц).

Стоит отметить работу [29], в которой предлагается резонансная система на основе планарного дискового резонатора, рисунок 10. Такое исполнение позволяет зафиксировать связь оптического элемента ввода с резонатором, дает возможность вакуумного корпусирования для защиты от внешних воздействий (пыли), которые значительно снижают добротность и улучшает защиту от вибраций.

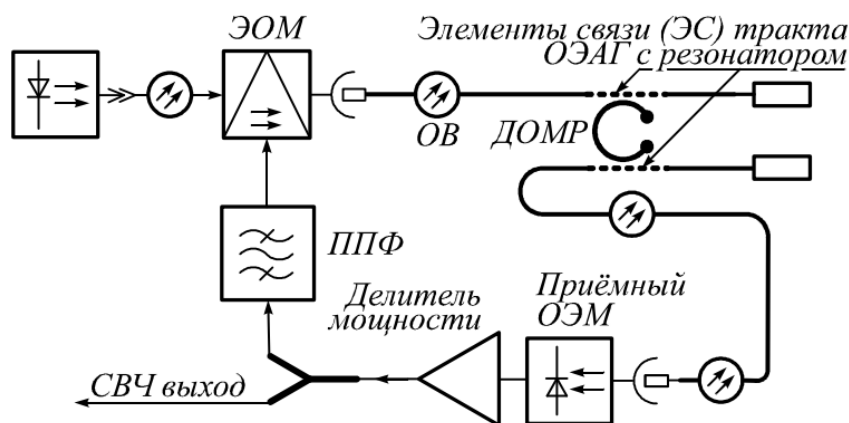


Рис. 10. Структурная схема ОЭГ на основе дискового МШГ резонатора [29]

Расчеты полей внутри резонатора, коэффициент связи, расположение элементов связи относительно поверхности резонатора, и др. необходимы для дальнейшей оценки параметров и технологического изготовления будущего ОЭГ.

2. Результаты расчета собственных частот и моделирования электромагнитного поля дискового МШГ резонатора

Результаты анализа показывают, что резонатор МШГ обладает высокой добротностью. ОЭГ на его основе имеет низкий уровень фазового шума, по сравнению с электрическими генераторами СВЧ сигнала. Для дальнейшего изготовления резонатора МШГ и его применения в ОЭГ необходимо рассчитать и смоделировать поля резонатора.

Расчет проводится согласно [30], который отличается от существующих методов расчета относительной простой и достаточной точностью для «инженерного» расчета собственных резонансных частот МШГ.

Необходимо найти дисперсионное уравнение для собственных волн цилиндра, для этого совместно решаются уравнения Максвелла и материальные уравнения с применением электродинамических граничных условий. Уравнение резонансных частот для диска получается квантованием продольного волнового вектора, входящего в дисперсионное уравнение цилиндра. При этом для определения дискретных значений продольного волнового вектора используется условие баланса фаз колебаний в диске. Задача решается для двух случаев, когда продольное волновое число β больше поперечного волнового числа k_{air} – «толстый» диск, и случая когда продольное волновое число находится между поперечными волновыми числами резонатора и свободного пространства $k_{res} > \beta > k_{air}$ – «тонкий» диск. Дисперсионные уравнения для двух случаев записываются как:

$$\frac{m}{R^2} \left(\frac{\varepsilon_{res}}{k_{\perp 1}^2} - \frac{\varepsilon_{air}}{k_{\perp 2}^2} \right) \left(\frac{1}{k_{\perp 1}^2} - \frac{1}{k_{\perp 2}^2} \right) = \left[\frac{\varepsilon_{res}}{k_{\perp 1}} \frac{J'_m(k_{\perp 1}R)}{J_m(k_{\perp 1}R)} + \frac{\varepsilon_{air}}{k_{\perp 2}} \frac{H'_m(k_{\perp 2}R)}{H_m(k_{\perp 2}R)} \right] \times \left[\frac{1}{k_{\perp 1}} \frac{J'_m(k_{\perp 1}R)}{J_m(k_{\perp 1}R)} + \frac{1}{k_{\perp 2}} \frac{H'_m(k_{\perp 2}R)}{H_m(k_{\perp 2}R)} \right], \quad (1)$$

где m – порядок цилиндрической функции,

R – радиус резонатора,

$\varepsilon_{res}, \varepsilon_{air}$ – диэлектрическая проницаемость внутри и снаружи резонатора,

$k_{\perp 1}, k_{\perp 2}$ – поперечное волновое число внутри и снаружи резонатора:

$$k_{\perp 1} = \sqrt{(\omega/c)^2 \varepsilon_{res}^2 - \beta^2}; k_{\perp 2} = \sqrt{(\omega/c)^2 \varepsilon_{air}^2 - \beta^2}, \quad (2)$$

где ω – круговая частота,

c – скорость света,

J_m – функция Бесселя и ее производная,

H_m – функция Ханкеля и ее производная.

$$\frac{m}{R^2} \left(\frac{\varepsilon_{res}}{k_{\perp 1}^2} + \frac{\varepsilon_{air}}{(ik)_{\perp 2}^2} \right) \left(\frac{1}{k_{\perp 1}^2} + \frac{1}{(ik)_{\perp 2}^2} \right) = \left[\frac{\varepsilon_{res}}{k_{\perp 1}} \frac{J'_m(k_{\perp 1}R)}{J_m(k_{\perp 1}R)} + \frac{\varepsilon_{air}}{ik_{\perp 2}} \frac{K'_m(ik_{\perp 2}R)}{K_m(ik_{\perp 2}R)} \right] \times \quad (3)$$

$$\times \left[\frac{1}{k_{\perp 1}} \frac{J'_m(k_{\perp 1}R)}{J_m(k_{\perp 1}R)} + \frac{1}{ik_{\perp 2}} \frac{K'_m(ik_{\perp 2}R)}{K_m(ik_{\perp 2}R)} \right],$$

где i – мнимая единица,

K_m – функция Макдональда и ее производная.

Из (1) и (3) следует, что характер мод в приближении «толстого» и «тонкого» диска имеет гибридную структуру, т. е. в решении можно выделить HE_{ml} - и EH_{ml} -моды. Однако при $m = 0$, для случая «тонкого» диска моды не являются гибридными. В этом случае уравнение (2) распадается на два более простых, описывающих поперечные TE_{ml} - и TM_{ml} -моды.

Для учета дискретизации резонансных частот за счет конечной толщины резонатора применяется условие баланса фаз. Определяется неизвестное значение продольного волнового числа:

$$\beta = (\pi n - \varphi) / d, \quad (4)$$

где n – целое число, характеризующее количество максимумов по осевой координате,

φ – фазовый набег при отражении волны от границ раздела сред,

d – толщина резонатора.

Резонансные типы колебаний диэлектрического дискового резонатора и отвечающие им частоты характеризуются тремя индексами m , l и n . Индекс m фигурирует в (1) и (3) в явном виде и характеризует количество длин волн, укладываемых по угловой координате. Индекс l отражает число вариаций поля по радиальной координате. Он определяется номером решения уравнений (1) и (3), у которых существует бесконечное множество корней. Индекс n указывает количество вариаций поля по оси диска.

На рисунке 11 представлены результаты расчета собственных частот EH_{ml} -мод МШГ резонатора с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6,76$ (CaF_2) для m , изменяющегося от 2 до 32, при $l = 1$. Квадратными маркерами на рисунке обозначены резонансные частоты для диска с толщиной $d = 3$ мкм,

треугольными – для $d = 2$ мкм, круглыми – для $d = 1$ мкм. Радиус диска $R = 300$ мкм.

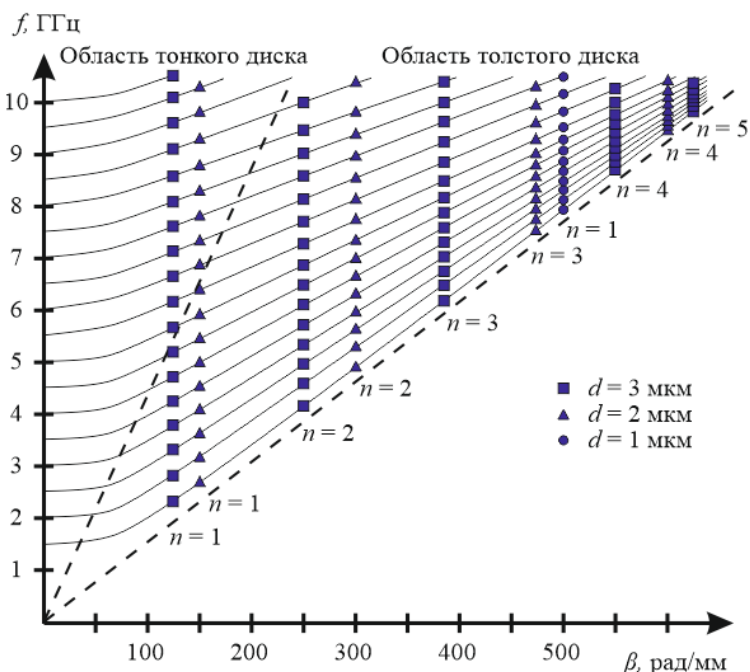


Рис. 11. Собственные частоты МШГ резонатора

Расчет применен для дисков меньшего размера и хорошо согласуется с [30], однако следует привести возникающие колебания мод внутри резонатора. Результаты моделирования резонатора МШГ средствами MATLAB для радиуса $R = 300$ мкм показаны на рисунке 12.

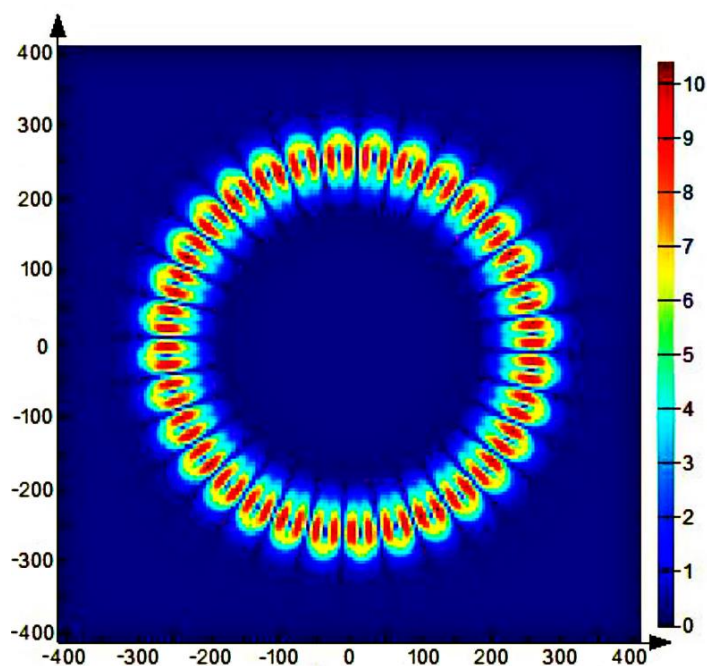


Рис. 12. Распределение электромагнитного поля дискового МШГ резонатора (вид сверху, ОХ и ОУ: мкм, колорбар: интенсивность)

Хорошо видно возбуждение мод МШГ для выбранных параметров резонатора, следовательно данный резонатор может применяться в схемах ОЭГ планарного исполнения. Это дает возможность вакуумного корпусирования с сохранением добротности, а также уменьшение воздействия вибраций.

3. Лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер)

В настоящее время в схемах ОЭГ все более широко используется РОС-лазер из-за его устойчивости к колебаниям температуры и возможностью генерации узкой спектрально чистой линии излучения [31].

Отличительной чертой РОС-лазера является использование брэгговского рассеяния на периодических неоднородностях с целью создания условий для распространения и усиления в активной среде определенного типа волн, вместо использования локальных отражателей (резонаторов). В результате периодически расположенных оптических неоднородных структур образуется положительная обратная связь, которая способствует усилению сигнала.

В качестве периодически изменяющихся оптических параметров среды могут выступать показатель преломления, коэффициент оптического усиления, сечение оптического волновода, рисунок 13.

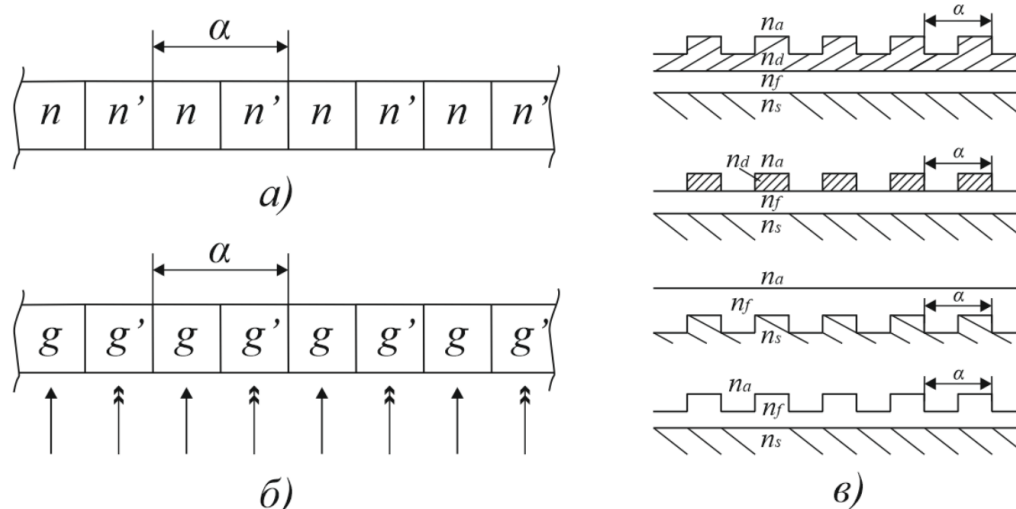


Рис. 13. Способы осуществления РОС: пространственная модуляция с периодом α показателя преломления а), коэффициента оптического усиления б), сечения различных типов оптических волноводов в), где n_a, n_d, n_f, n_s – показатели преломления соответственно воздуха, верхнего диэлектрического слоя, пленки и подложки

Модуляция показателя преломления среды. Для получения пространственной модуляции показателя преломления среды используются тонкие пленки, которые освещаются когерентными пучками света, образующими интерференционные полосы с определенным шагом. Далее посредством химической обработки пленки (голографическими методами) в ее объеме образовывается периодическая модуляция показателя преломления, повторяющая интерференционную картину. В первой реализации РОС-лазера данным способом авторы [32] получили пленку из дихромированного желатина, активированного родамином бЖ, с интерференционными полосами. Генерация была получена на длине волны 0,6 мкм при оптической накачке без использования резонатора.

Модуляция коэффициента оптического усиления. Для получения пространственной модуляции коэффициента оптического усиления необходимо периодически изменять уровень накачки вдоль активной области лазера. Частота генерации будет определяться шагом интерференционной картины. В данном случае легко допускается перестройка в пределах полосы усиления за счет изменения угла между интерферирующими пучками. Такой способ предъявляет весьма высокие требования к когерентности источника накачки, особенно при достаточно большом размере активной области.

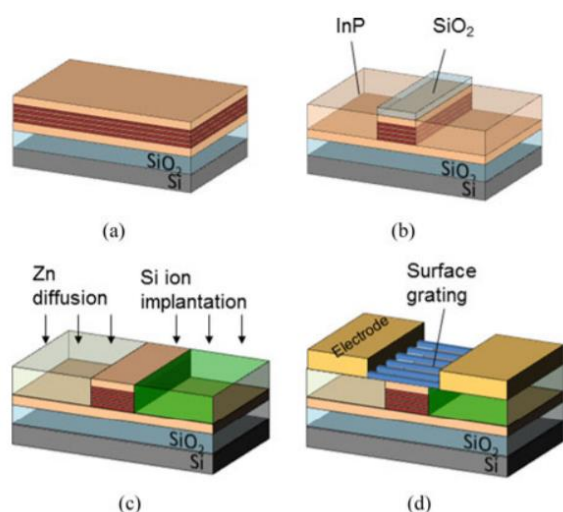
Периодическое изменение сечения волновода. Если активная область лазера представляет собой оптический волновод, то РОС может быть осуществлена за счет периодической гофрировки (изменения сечения) поверхности, которая ограничивает волновод.

Для создания РОС-лазера необходима периодическая структура с варьированием одним из этих параметров.

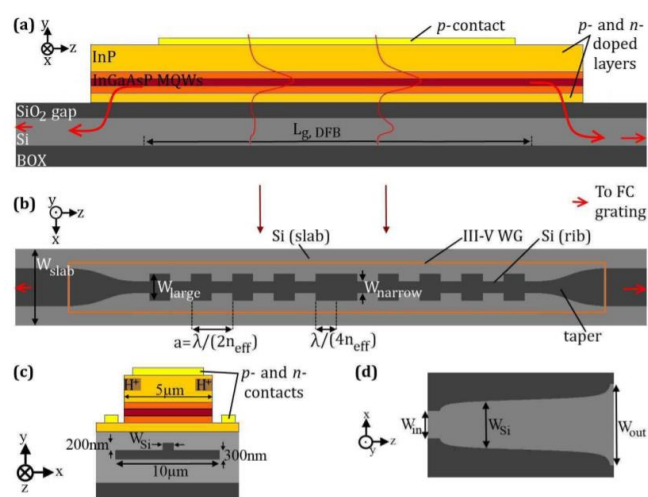
3.1 Технологии изготовления РОС-лазера

Наиболее часто предлагается использование гибридных технологий изготовления РОС-лазеров с использованием различных сечений волноводов. Сначала изготавливается заготовка на подложке из SiO₂/Si, затем выращивается

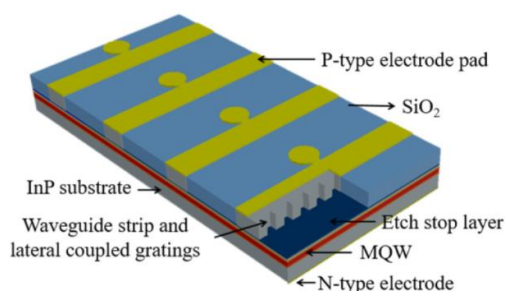
внутренний слой InP, в котором в свою очередь может располагаться область с более широкой запрещенной зоной и более низкой преломляющей способностью из полупроводников АЗВ5. После этого формируются штифтовые соединения, на которых изготавливается поверхностная решетка, отвечающая за обратную связь, и делаются электроды. Методики изготовления и полученные структуры [33-38] РОС-лазеров представлены на рисунке 14.



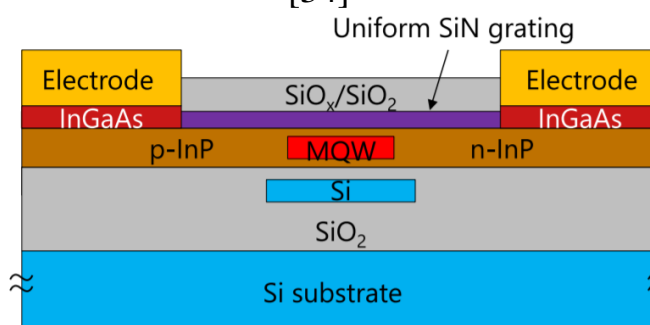
[33]



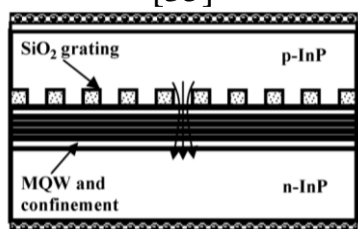
[34]



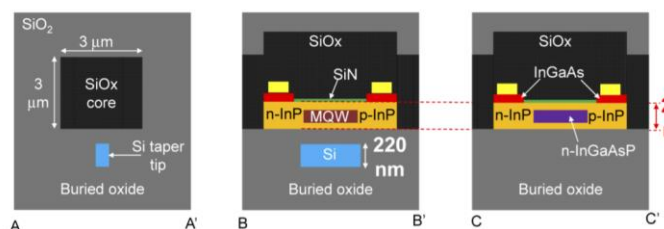
[35]



[36]



[37]



[38]

Рис. 14. Методики изготовления и полученные структуры РОС-лазеров

Приведенные на рисунке 14 структуры очень сложны, поскольку при производстве используются установки для МОС-гидридной эпитаксии, фотолитографии, ионной имплантации и диффузии. Отдельной технологической задачей является скрепление шаблона АЗВ5 с пластиной SiO₂/Si. Все это

вызывает определенные технологические трудности для изготовления лабораторных образцов и оценки их характеристик.

Также стоит отметить, что в вышеперечисленных работах РОС-лазер изготавливается для оптических систем связи, поскольку частотная перестройка РОС-лазера (частотное разделение) позволяет эффективно увеличить пропускную способность канала и обеспечить требуемую энергетику для пакетной передачи информации по оптическому каналу. В радиолокации необходимо сформировать зондирующий сигнал определенной формы и обеспечить высокую когерентность, поэтому применение таких гибридных структур может вызвать некоторые трудности с технологической точки зрения и заметно повысить сложность изготовления и стоимость ОЭГ в целом. Однако, предложенный подход может быть положен в основу технологии, позволяющей обеспечить достижение высоких характеристик по чистоте спектральной линии, ее ширине и ФШ (таблица 1), путем применения схожей структуры, и позволит создать ОЭГ для формирования сигналов сложной формы [39].

Таблица 1. Сравнение характеристик РОС лазеров

Работа	Длина волны	Выходная мощность	Возможность перестройки длины волны	Относительная интенсивность фазового шума	Мощность накачки	Ширина оптической линии
[40]	1550 нм	10 мВт	температура	– 135 дБн/Гц	-	менее 300 кГц
[41]	1300 нм	97,4 мВт	ток	– 135 дБн/Гц	-	-
[42]	-	10 мВт	-	– 105 дБн/Гц	-	менее 300 кГц
[43]	1280 нм	25 мВт	-	– 140 дБн/Гц	-	2 кГц
[44]	1550 нм	2 мВт	-	-	10 мВт	-

3.2 ОЭГ на основе РОС-лазера

Типовая структура ОЭГ помимо РОС-лазера включает: электрооптический модулятор, фотодетектор, усилитель мощности и полосовой фильтр. Обобщенная структура ОЭГ представлена на рисунке 15.

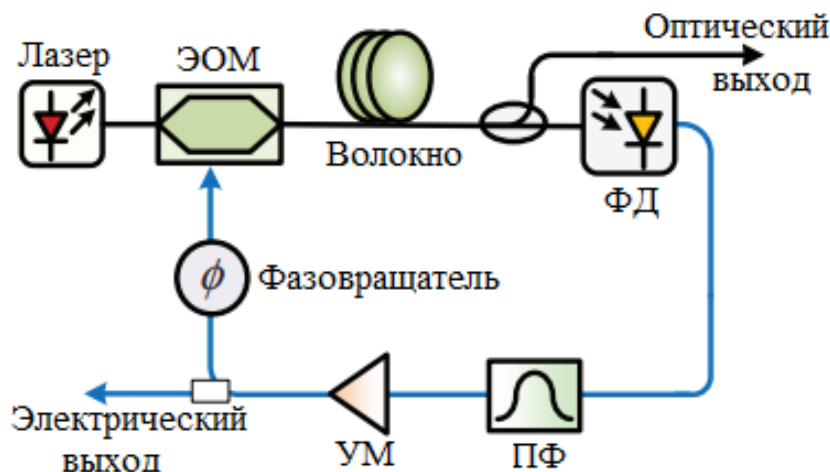


Рис. 15. Архитектура ОЭГ на основе РОС-лазера. ЭОМ – электрооптический модулятор, ФД – фотодетектор, УМ – усилитель мощности, ПФ – полосовой фильтр [45]

Варианты используемых схем ОЭГ отличаются только входящими в его состав устройствами модуляции сигнала и окончными каскадами после оптоэлектронного преобразования на фотодетекторе, а РОС-лазер выступает в качестве ОКГ (см. рисунок 1).

Стоит отметить, что в таких схемах может быть и другой вид лазера [46].

3.3 РОС-лазер на основе фотонного кристалла

В связи с технологической сложностью изготовления РОС-лазеров, применяемых в оптических системах передачи информации, для радиолокационных систем возникает необходимость упростить технологию с сохранением основных качественных и количественных характеристик РОС-лазера.

Авторами настоящей работы предлагается использование технологии изготовления РОС-лазера на основе фотонного кристалла (ФК), который будет выступать в качестве основы, с активизацией полученной SiO₂ матрицы

родамином бЖ. Самих технологий создания кремниевых ФК на данный момент существует достаточно много [47-49]. Два наиболее часто используемых метода: метод вертикального осаждения (подвижного Мениска) [50, 51] и метод седиментации (гравитационной укладки) [52, 53], рисунок 16.

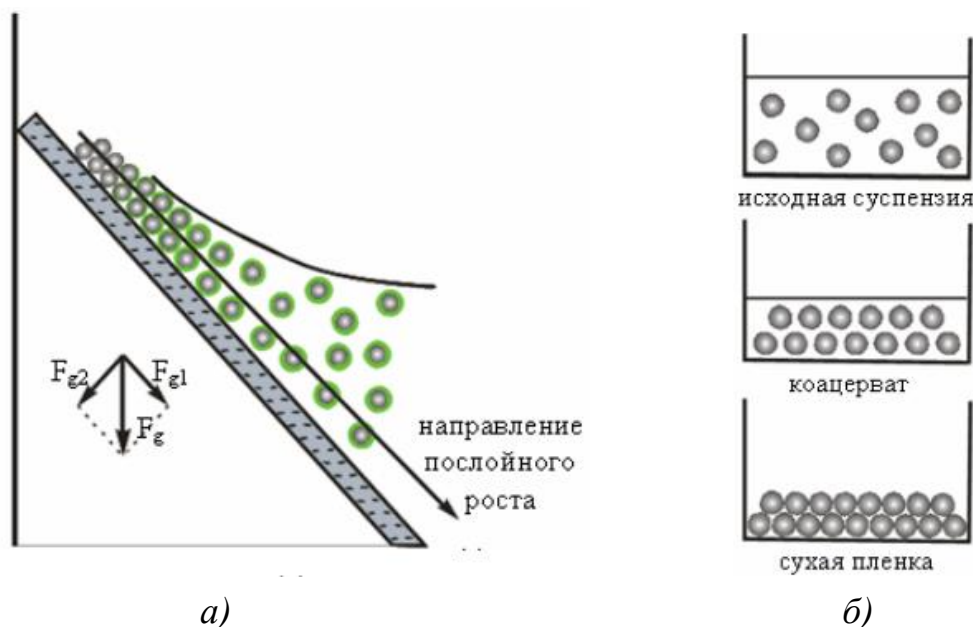


Рис. 16. Метод вертикального осаждения *а)* и метод седиментации *б)*

В методе вертикального осаждения наращивание слоев происходит за счет плавного смещения мениска вдоль подложки. В открытой области (области сушки) кристалла осуществляется упорядочивание и стягивание структуры. Само смещение мениска вдоль подложки чаще всего обусловлено испарением растворителя.

Метод седиментации заключается в постепенном улетучивании растворителя из исходной суспензии вплоть до образования самоорганизованной твердой структуры и позволяет получать объемные образцы большого размера. Недостатком метода седиментации является низкая упорядоченность его слоев вблизи подложки. Ряд авторов отмечает [54], что слои, расположенные ближе к поверхности, имеют более упорядоченную структуру. Связано это с одновременным формированием нескольких центров кристаллизации, которые случайно пространственно-ориентированы друг относительно друга. Рост происходит вокруг таких центров независимо и при взаимодействии приводит к образованию разупорядоченных областей.

Более подробные сведения о параметрах, влияющих на процесс синтеза ФК, стадиях синтеза и характеристиках полученной матрицы из ФК, приведены в работах [55-57].

После изготовления опаловой матрицы осуществляется допирование родамином бЖ для создания периодически расположенных квантовых ям. Количество слоев и толщина определяют структуру фазового сдвига и коэффициент усиления РОС-лазера.

Такие технологии позволяют создавать объемные оптические волноводы с периодической структурой, одновременно снижая сложность изготовления РОС-лазера в целом и дают возможность обеспечить качественные и количественные характеристики генерируемого сигнала.

4. Результаты расчета спектра и фазовых шумов РОС-лазера на основе фотонного кристалла

Для расчета ОЭГ на основе РОС-лазера возникает необходимость определения характеристик лазерного излучения.

Задача решается методом связанных волн. Ширина зоны запрещенных частот в спектре волноводной моды определяется соотношением:

$$\Delta\omega = 2 \frac{\partial\omega}{\partial k_z} \frac{\partial k_z}{\partial W} \operatorname{Re} \left[\sqrt{f_{+m_0} f_{-m_0}} \right], \quad (5)$$

где k_z – волновой вектор,

W – толщина волновода,

$f_{\pm m_0}$ – амплитуда рассеяния m_0 -го порядка, отвечающая брэгговскому отражению.

Величины f для конкретной решетки рассчитываются методами теории дифракции или могут быть измерены экспериментально.

Наложение граничных условий приводит к дискретному спектру волноводных мод. В случае нулевых граничных условий и решетки второго порядка ($m_0 = 2$) частоты n -ой моды определяются как:

$$\omega_n = \omega_0 \pm \frac{1}{2} \Delta\omega \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\partial\omega}{\partial k_z} \frac{\pi}{\Delta\omega L} \right)^2 \cdot n^2 \right], \quad (6)$$

где L – длина активной области волновода.

Спектр частот РОС-лазера представлен на рисунке 17. Он представляет собой набор практически эквидистантных частот, расположенных симметрично относительно $\nu_0 = \omega_0 / 2\pi$, с межмодовым расстоянием $c / 2nL$, по аналогии с резонатором Фабри-Перо.

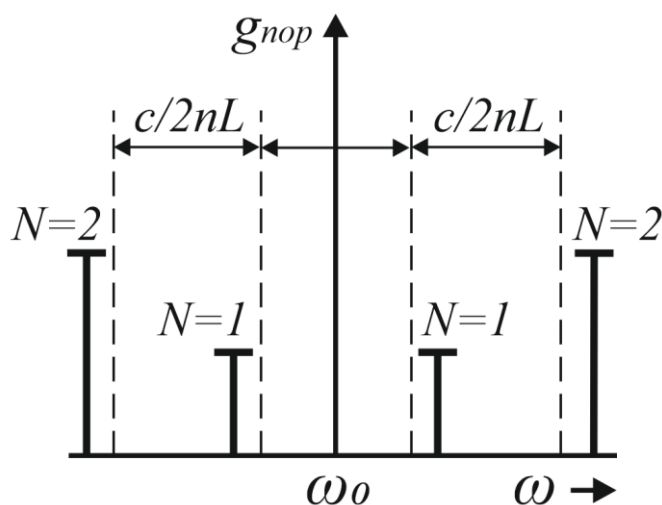


Рис. 17. Спектр резонансных частот и пороги усиления в относительных единицах РОС-лазера

При оценке фазового шума, как корня из спектральной плотности, моделируемого РОС-лазера, рисунок 18, необходимо учесть, что при практической реализации, полученные значения будут несколько хуже, однако такие характеристики позволят успешно снизить фазовые потери ОЭГ в целом и улучшить синхронизацию между передатчиком и приемником радиофотонной РЛС.

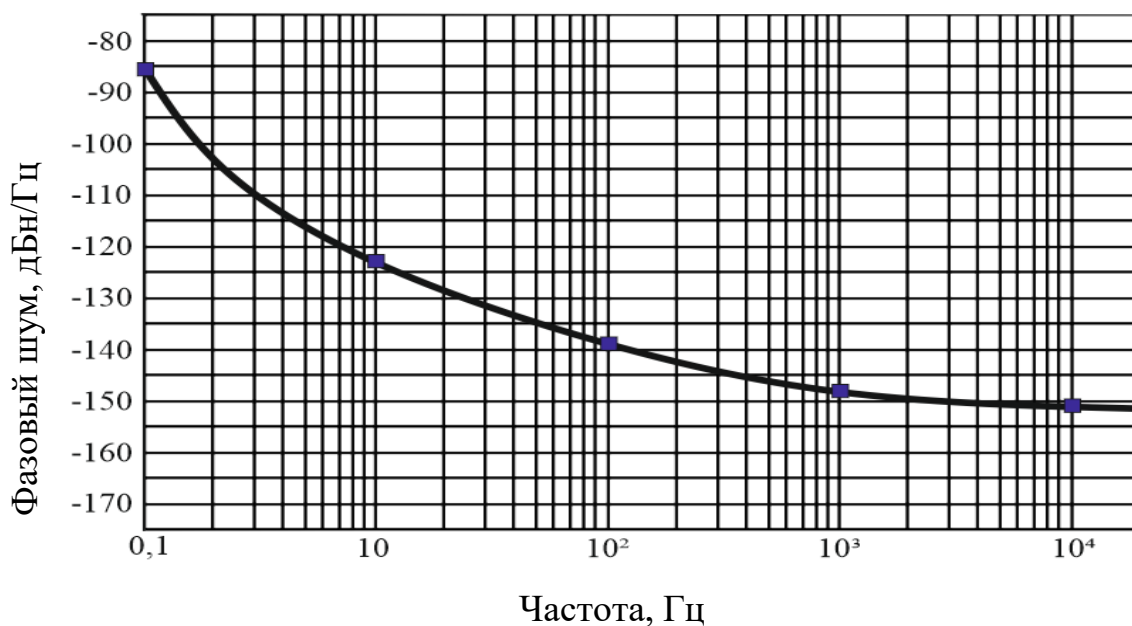


Рис. 18. Фазовый шум РОС-лазера

Основными потерями с наибольшим вкладом в фазовый шум лазера являются: оптические потери (обусловленные потерей излучения через решетку) и квантовые шумы (возникающие в результате спонтанного излучения активной области).

Заключение

Исследованы и обобщены технологии создания микрорезонаторов МШГ и РОС-лазеров, применяемых в ОЭГ радиочастотных колебаний. Представлен расчет собственных частот EH_{ml} -мод МШГ микрорезонатора с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6,76$ (CaF_2) для m , изменяющегося от 2 до 32, при $l = 1$. Толщина диска $d = 1-3$ мкм. Радиус диска $R = 300$ мкм. Проведено моделирование распределения электромагнитного поля в MATLAB для выбранных параметров резонатора, которое позволяет оценить оптический коэффициент ввода, расположение элементов связи относительно резонатора и локализацию поля. Это дает возможность определить характеристики и целесообразность создания ОЭГ, защищенного от окружающих воздействий (вибрация, пыль, температура).

Предложен подход к технологии изготовления РОС-лазера с низким уровнем фазовых шумов на основе ФК. Относительный уровень фазового шума при отстройке 10 Гц составил менее – 120 дБн/Гц. Расчет резонансных частот показал симметричное расположение относительно центральной частоты $\nu_0 = \omega_0 / 2\pi$. Данный тип лазера может применяться в конструкции ОЭГ.

Применение резонатора МШГ и РОС-лазера позволяет снизить фазовые шумы, повысить чистоту спектральной линии генерируемого сигнала и увеличить добротность колебательной системы, однако требуется учитывать технологические особенности их изготовления. Внедрение таких ОЭГ в перспективные радиофотонные РЛС позволит повысить когерентность.

Литература

1. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика. *Успехи физических наук*. 1986. Т.148. №2. С.289-311. <http://doi.org/10.3367/UFNr.0148.198602c.0289>
2. Борцов А.А. Технологии создания сверхмалошумящих (прецизионных) СВЧ-генераторов на основе лазерного оптоэлектронного автогенератора. *Наукоемкие технологии*. 2011. Т.12. №9. С.33-40.
3. Городецкий М.Л., и др. Высокодобротные оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи и их применение в прецизионных измерениях. *Метрология*. 2014. №12. С.22-40.
4. Лукьянов В.Н., и др. Лазеры с распределенной обратной связью (обзор). *Квантовая электроника*. 1975. Т.2. №11. С.2373-2398.
5. Vollmer F., et al. Protein detection by optical shift of a resonant microcavity. *Applied physics letters*. 2002. Т.80. №21. С.4057-4059. <http://doi.org/10.1063/1.1482797>
6. Rostami A., et al. Microsphere and Fiber Optics based Optical Sensors. *Optical Sensors - New Developments and Practical Applications*. INTECH Publ. 2014. P.83-102. <https://doi.org/10.5772/57465>

7. Abdalmalak K.A., et al. Microwave radiation coupling into a WGM resonator for a high-photonic-efficiency nonlinear receiver. *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2018. C.781-784. <http://doi.org/10.23919/EuMC.2018.8541628>
8. Volyanskiy K. et al. Compact optoelectronic oscillator using whispering gallery mode resonators for radio-frequency and millimeter wave generation. *International Society for Optics and Photonics*. 2011. T.7936. C.79360B. <https://doi.org/10.1117/12.876985>
9. Merrer P.H. et al. Characterization technique of optical whispering gallery mode resonators in the microwave frequency domain for optoelectronic oscillators. *Applied optics*. 2012. T.51. №20. C.4742-4748. <https://doi.org/10.1364/AO.51.004742>
10. Браунфельдс Я. и др. Получение частотных гребенок в генераторах на WGM в микросферах для телекоммуникационных приложений. *Квантовая электроника*. 2020. Т.50. №11. С.1043-1049.
11. Патент РФ №2710002 С1. Биленко И.А. и др. *Компактный прибор с лазерами с множеством продольных мод, стабилизированными высокочастотными микрорезонаторами с генерацией оптических частотных гребенок*. Дата заявки: 27.03.2019. Дата публикации: 23.12.2019. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2710002C1>
12. Ryu H.Y., et al. High quality-factor whispering-gallery mode in the photonic crystal hexagonal disk cavity. *Optics express*. 2004. Т.12. №8. С.1708-1719. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.001708>
13. Srinivasan K., et al. Experimental demonstration of a high quality factor photonic crystal microcavity. *Applied Physics Letters*. 2003. Т.83. №10. С.1915-1917. <https://doi.org/10.1063/1.1606866>
14. Lee P.T., et al. High quality factor microcavity lasers realized by circular photonic crystal with isotropic photonic band gap effect. *Applied physics letters*. 2007. Т.90. №15. С.151125. <https://doi.org/10.1063/1.2724899>

15. Sumetsky M. Whispering-gallery-bottle microcavities: the three-dimensional etalon. *Optics letters*. 2004. T.29. №1. C.8-10. <https://doi.org/10.1364/OL.29.000008>
16. Murugan G.S., Wilkinson J.S., Zervas M.N. Optical excitation and probing of whispering gallery modes in bottle microresonators: potential for all-fiber add-drop filters. *Optics letters*. 2010. T.35. №11. C.1893-1895. <https://doi.org/10.1364/OL.35.001893>
17. Sumetsky M., Dulashko Y., Windeler R.S. Super free spectral range tunable optical microbubble resonator. *Optics letters*. 2010. T.35. №11. C.1866-1868. <https://doi.org/10.1364/OL.35.001866>
18. Sumetsky M., Dulashko Y., Windeler R.S. Optical microbubble resonator. *Optics letters*. 2010. T.35. №7. C.898-900. <https://doi.org/10.1364/OL.35.000898>
19. Li H. et al. Analysis of single nanoparticle detection by using 3-dimensionally confined optofluidic ring resonators. *Optics express*. 2010. T.18. №24. C.25081-25088. <https://doi.org/10.1364/OE.18.025081>
20. Vollmer F., Arnold S., Keng D. Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. T.105. №52. C. 20701-20704. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808988106>
21. Zhang M., et al. In-fiber whispering-gallery mode microsphere resonatorbased integrated device. *Optics letters*. 2018. T.43. №16. C.3961-3964. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003961>
22. Li C., et al. In-Fiber BaTiO₃ Microsphere Resonator for High-Sensitivity Temperature Measurement. *Micromachines*. 2021. T.12. №3. C.318. <https://doi.org/10.3390/mi12030318>
23. Lin J. et al. Fabrication of three-dimensional microdisk resonators in calcium fluoride by femtosecond laser micromachining. *Applied Physics A*. 2014. T.116. №4. C.2019-2023. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8388-1>
24. Maker A.J., Armani A.M. Fabrication of silica ultra high quality factor microresonators. *Journal of visualized experiments: JoVE*. 2012. №65. C.4164. <https://doi.org/10.3791/4164>

25. Maleki L., et al. Microwave Oscillators Based on Nonlinear WGM Resonators [web]. *Tech Briefs*. Дата обращения: 30.03.2022. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/ptb/briefs/12121>
26. Savchenkov A.A., et al. Whispering-gallery mode based opto-electronic oscillators. *2010 IEEE International Frequency Control Symposium*. IEEE. 2010. P.554-557.
27. DSG3000B Series RF Signal Generator [web]. *RIGOL*. Дата обращения: 05.04.2022. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/ptb/briefs/12121>
28. Генераторы СВЧ сигналов [web]. *Keysight*. Дата обращения: 05.04.2022. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-04483/brochures/5991-4876.pdf>
29. Задорин А.С., Лукина А.А. Резонансная система оптоэлектронного автогенератора на основе проходного планарного оптического дискового микрорезонатора. *Компьютерная оптика*. 2018. Т.42. №1. С.60-66. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-1-60-66>
30. Зарецкая Г.А., Дроздовский А.В., Калиникос Б.А. Метод расчета собственных резонансных частот оптических резонаторов с модами шепчущей галереи. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2017. №1. С.56-64.
31. Suematsu Y. Dynamic single-mode lasers. *Journal of lightwave technology*. 2013. Т.32. №6. С.1144-1158. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2293817>
32. Kogelnik H., Shank C.V. Stimulated emission in a periodic structure. *Appl. Phys. Letts*. 1971. V18. P.152 <https://doi.org/10.1063/1.1653605>
33. Matsuo S., et al. Directly Modulated DFB Laser on SiO₂/Si Substrate for Datacenter Networks. *Journal of Lightwave Technology*. 2015. Т.33. №6. С.1217-1222. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2386875>
34. Duprez H., et al. Hybrid III–V on Silicon Laterally Coupled Distributed Feedback Laser Operating in the O-Band. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2016. Т.28. №18. С.1920-1923. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2576021>

35. Wang Q., et al. A Directly Modulated Laterally Coupled Distributed Feedback Laser Array Based on SiO₂ Planarization Process. *Applied Sciences*. 2021. T.11. №1. C.221. <https://doi.org/10.3390/app11010221>
36. Aihara T., et al. Membrane III-V/Si DFB Laser Using Uniform Grating and Width-Modulated Si Waveguide. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. T.38. №11. C.2961-2967. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2978808>
37. Teng J.H., et al. Complex-Coupled DFB Laser Using a Buried SiO₂ Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2008. T.20. №4. C.231-233. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.913262>
38. Hiraki T., et al. Integration of a high-efficiency Mach-Zehnder modulator with a DFB laser using membrane InP-based devices on a Si photonics platform. *Optics Express*. 2021. T.29. №2. C.2431-2441. <https://doi.org/10.1364/OE.411483>
39. Галкин Н.К., Голов Н.А. Методы синтеза зондирующих сигналов со ступенчатым изменением частоты. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.15>
40. Kumar R., et al. Integrated multi-wavelength DFB laser with 200 GHz channel spacing. *Proc. of SPIE*. 2022. T.12021. C.1202106-1. <https://doi.org/10.1117/12.2626494>
41. Liu Y. et al. Optical and RIN Spectrum Improvements in Necked Waveguide High-Power DFB Laser Diode. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2022. T.34. №5. C.275-278. <https://doi.org/10.1109/LPT.2022.3150799>
42. Li M. et al. Development of narrow linewidth distribution feedback fiber laser for fiber hydrophone system. *Third International Conference on Optoelectronic Science and Materials (ICOSM 2021)*. SPIE. 2021. T.12030. C.1203002.
43. Kumar R. et al. A multi-wavelength III-V/Si hybrid DFB laser with even wavelength spacing and uniform output power. *2021 IEEE 17th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. IEEE. 2021. C.1-2. <https://doi.org/10.1109/GFP51802.2021.9673975>

44. Gulzar A., Qazi G. Investigation and performance evaluation of DFB-(SP) EDFA configuration with optimum intrinsic EDFA parameters. *Optical and Quantum Electronics*. 2022. Т. 54. №1. С.1-19. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03381-1>
45. Zhang F., Pan S. Microwave photonic signal generation for radar applications. *2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*. IEEE, 2016. С.1-3. <https://doi.org/10.1109/iWEM.2016.7504991>
46. Pan S., and Zhang Y. Microwave photonic radars. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. Т.38. №19. С.5450-5484. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2993166>
47. Sinitskii A.S., Klimonsky S.O., Garshev A.V., Primenko A.E., Tretyakova Y.D. Synthesis and microstructure of silica photonic crystals. *Mendeleev Commun.* 2004. Т.14. №4. С.165-167. <https://doi.org/10.1070/MC2004v014n04ABEH001968>
48. Якиманский А.В., Меньшикова А.Ю., Евсеева Т.Г., Шевченко Н.Н., Билибин А.Ю. Монодисперсные полимерные частицы с ковалентно присоединенными хромофорными группировками как структурные элементы фотонных кристаллов. *Российские нанотехнологии*. 2006. Т.1. №1-2. С.171-178.
49. Меньшикова А.Ю. и др. Синтез монодисперсных частиц полистирола с контролируемой структурой привитых сополимеров в поверхностном слое. *Высокомолек. соед. А*. 2004. Т.46. №9. С.1479-1487.
50. Vlasov Y.V., Bo X.-Zh., Sturm J.C., Norris D.J. On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals. *Nature*. 2001. Т.414. С.289-293. <https://doi.org/10.1038/35104529>
51. Плеханов А.И., Калинин Д.В., Сердобинцева В.В. Нанокристаллизация монокристаллических пленок опала и пленочных опаловых гетероструктур. *Российские нанотехнологии*. 2006. Т.1. С.233-239.

52. Mayoral R., Requena J., Moya J.S., López C., Cintas A., Miguez H., Meseguer F., Vázquez L., Holgado M., Blanco A. 3D Long-range ordering in ein SiO₂ submicrometer-sphere sintered superstructure. *Adv. Mater.* 1997. Т.9. №3. С.257-260. <https://doi.org/10.1002/adma.19970090318>
53. Калинин Д.В., Сердобинцева В.В., Шабанов В.Ф. Механизм укладки монодисперсных сферических частиц кремнезема в фотоннокристаллическую пленочную структуру из лиофильных суспензий. *Доклады Академии наук.* 2008. Т.419. №5. С.609-611.
54. Johnson N.P., McComb D.W., Richel A., Treble B.M., De La Rue R.M. Synthesis and optical properties of opal and inverse opal photonic crystals. *Synthetic Metals.* 2001. Т.116. №1. С.469-473. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(00\)00417-3](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(00)00417-3)
55. Юрасова И.И. и др. О скорости роста нанокластеров SiO₂ при различном соотношении числа молей компонентов системы (вода–ТЭОС) при щелочном катализе. *Журнал физической химии.* 2021. Т.95. №6. С.923-927. <https://doi.org/10.31857/S0044453721060297>
56. Юрасова И. И., Юрасов Н. И., Галкин Н. К. Стадии процесса синтеза глобул аморфного кремнезема в технологии изготовления фотонного кристалла. *Необратимые процессы в природе и технике.* 2021. С.106-108.
57. Yurasov N.I. et al. Irreversible phase transitions in structural elements of synthetic opal. *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. 2019. Т.1348. №1. С.012082. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1348/1/012082>

Для цитирования:

Галкин Н.К., Голов Н.А., Юрасова И.И. Технологии лазера с распределенной обратной связью и резонатора «мод шепчущей галереи» для оптоэлектронного генератора РЛС. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.2>