

АЛЕКСАНДР БОРЦОВ

**КВАНТОВЫЙ
ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ
ГЕНЕРАТОР**

ГЛАВА 1

Александр Борцов

**Квантовый оптоэлектронный
генератор. Глава 1**

«Издательские решения»

Борцов А.

Квантовый оптоэлектронный генератор. Глава 1 / А. Борцов —
«Издательские решения»,

ISBN 978-5-44-904470-9

Ильин Юрий — кандидат технических наук, научные интересы —
квантовая электроника, лазеры. Создатель квантового оптоэлектронного
генератора (ОЭГ), 1982, автор пионерских научных работ по ОЭГ патентов
и изобретений.

ISBN 978-5-44-904470-9

© Борцов А.
© Издательские решения

Содержание

Введение	6
Конец ознакомительного фрагмента.	10

Квантовый оптоэлектронный генератор

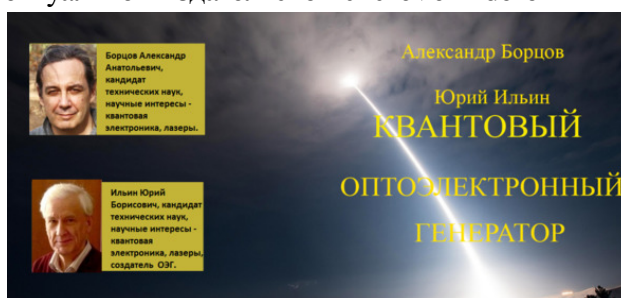
Глава 1

Александр Борцов

© Александр Борцов, 2018

ISBN 978-5-4490-4470-9

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero



Выражаю искреннюю благодарность моему учителю Ильину Юрию Борисовичу за ценные советы и дискуссии

По диссертации

на соискание ученой степени доктора технических наук

Книга содержит 402 с., 137 рис., 4 табл., 172 источников.

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор, генератор, автогенератор, лазер, лазерный диод, оптическое волокно, резонатор, фазовый шум, нанотехнология, технические характеристики, методы управления, частота.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию оптоэлектронного автогенератора (ОЭГ) с волоконно-оптической линией задержки (ВОЛЗ) в кольце положительной обратной связи. Спецификой проведенных в настоящей работе исследований оптоэлектронного генератора ОЭГ является использование в качестве модулированного источника света квантоворазмерного лазерного диода (КЛД). Квантоворазмерный лазерный диод является современным продуктом нанотехнологии, а в оптоэлектронном генераторе он является ключевым элементом. Впервые в настоящей работе оптоэлектронный генератор ОЭГ рассмотрен, как автоколебательная система, в которой развиваются два колебательных процесса в различных диапазонах: в оптическом диапазоне и в радиочастотном диапазоне. Построена ранее неизвестная теоретическая модель оптоэлектронного генератора ОЭГ в форме системы нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных с запаздывающим аргументом ВОЛЗ. Разработаны, реализованы и исследованы действующие экспериментальные образцы ОЭГ с КЛД и ВОЛЗ в СВЧ диапазоне. Рассмотрены перспективные схемы применения предложенные автором малошумящих ОЭГ в системах связи, бортовых радиолокационных станциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в волоконно-оптических датчиках, в волоконно-оптических линиях связи и различных измерительных комплексах.

Введение

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является разработка *компактных* малошумящих стабилизированных по частоте радиочастотных генераторов [1,2], работающих в диапазоне от 1 до 100 ГГц в интегральном или гибридном твердотельном исполнении. Подобные устройства формирования колебаний необходимы при разработке мобильной связи, систем авиационной и спутниковой связи, систем передачи информации для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), радиолокационных и оптических когерентных систем, антенно-фидерных трактов, высокоточной измерительной аппаратуры.

Имеющиеся в настоящее время известные традиционные СВЧ генераторы являются для ряда применений неприемлемыми. Традиционные генераторы с кварцевым резонатором и генераторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с умножением генерируемой частоты не дают возможности получить требуемый уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазового шума (ФШ) за счет многократного увеличения фазового шума при умножении частоты в СВЧ и КВЧ генераторных схемах. Такие известные генераторы не имеют требуемый уровень кратковременной нестабильности частоты в диапазоне частот 1... 100 ГГц.

Автогенераторы с диэлектрическим резонатором на керамических сплавах имеют явные ограничения по уровню фазовых шумов. За счет относительно низкой добротности такого резонатора, равной примерно 1000 (на частоте генерации 10 ГГц), типичный уровень фазовых шумов коммерчески доступных отечественных и зарубежных генераторов не превышает по модулю, как правило, минус 90...115 дБм/Гц при частотной отстройке 1 кГц от номинальной частоты генерации в диапазоне от 8 ГГц до 20 ГГц.

СВЧ автогенераторы со стабилизацией частоты твердотельным лейкосапфировым диэлектрическим резонатором [3] имеют на сегодняшний день самый низкий зарегистрированный уровень фазового шума – 167 дБм/Гц при отстройках от несущей на 1кГц ... 10 кГц при номинальной частоте порядка 10 ГГц. Рабочий диапазон частот таких генераторов составляет от 6 ГГц до 35 ГГц и имеет, как правило, дискретный диапазон частотной перестройки.

Лейкосапфировый резонатор такого генератора имеет относительно большие габаритные размеры (диаметр 30...100 мм) и вес (150...400 г). За счет больших габаритов и веса резонатора в таких генераторах частота генерации сильно зависит от механических нагрузок. Серьезным недостатком генератора с лейкосапфировым резонатором является то, что в таких генераторах, за счет относительно высокой зависимости диэлектрической проницаемости материала от температуры (10^{-4} 1/град), системы термостабилизации частоты являются сложными и дорогими.

Одним из альтернативных способов создания надежных компактных и малых по стоимости малошумящих автогенераторов в области частот 1...100 ГГц является применение в ОЭГ стабилизированной малошумящей волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ) на основе быстродействующих кванторазмерного лазерного диода и фотодиода, а также за счет специальных низкодисперсионных оптических волокон. Данные ВОЛЗ обладают большим запаздыванием для гармонических СВЧ колебаний. Время задержки в таких ВОЛЗ составляет от 1 нс до 50 пкс (при полосе передаваемых частот до 100 ГГц!). При этом, в таких ВОЛЗ потери мощности за счет рассеяния и оптоэлектронного преобразования составляют 10...18 дБ и более в СВЧ и КВЧ диапазонах.

В лучших образцах СВЧ оптоэлектронного генератора, имеющего в кольце обратной связи подобную ВОЛЗ, уже достигнута низкая спектральная плотность мощности фазовых шумов равная -153дБн/Гц при частотных отстройках по частоте на 1кГц ÷ 10 кГц от несущей 10 ГГц [73,94, 97]. Кратковременная нестабильность частоты такого ОЭГ составляет при-

мерно 10^{-10} [73]. Сверхнизкий фазовый шум такого ОЭГ достигается за счет создания на базе ВОЛЗ высокодобротного оптоэлектронного резонатора «бегущей волны» с нагруженной эквивалентной добротностью $Q = (0,2 \dots 0,8) \cdot 10^6$ (в диапазоне частот $1 \dots 70$ ГГц). В состав такой ВОЛЗ входят последовательно соединённые квантоворазмерный лазерный диод (КЛД) с внешним электрооптическим модулятором Маха-Цендера (или КЛД с прямой модуляцией), волоконно-оптическая система (ВОС), состоящая из одного или нескольких оптических волокон и фотодетектор (ФД). Подробное описание конструкции ОЭГ будет дано в главе 1.

В ОЭГ с КЛД и компактными ВОЛЗ возможно получить низкую относительную *кратковременную и долговременную* нестабильности частоты генерируемых СВЧ автоколебаний порядка $10^{-8} \dots 10^{-10}$. В таком ОЭГ управление частотой генерации можно производить оптическими и электронными методами. ОЭГ и перспективно использовать их в радиолокационных станциях и оптических локаторах нового поколения, в сверхширокополосных регенерируемых ВОЛЗ в качестве формирователей сверхкоротких оптических импульсов и радиоимпульсных сигналов длительностью $0,01 \div 1$ пс с малым «джиттером» (случайным уходом переднего фронта импульса), а также в ВОЛС для передачи информации в системах с повышенной конфиденциальностью с использованием маскирующих помех [81,82].

Однако данный тип перспективных ОЭГ недостаточно теоретически и экспериментально изучен. Не объяснены главные причины сверхмалого значения фазового шума радиочастотного колебания генерации при использовании в ОЭГ ВОЛЗ прямой и внешней схем модуляции КЛД. В России до 2004 года не было создано ни одного действующего лабораторного образца экспериментального макета ОЭГ в диапазоне частот $2 \dots 12$ ГГц и выше. За рубежом в начале 2000-х годов с появлением коммерческих СВЧ электрооптических модуляторов появились экспериментальные работы Малеки и Стива Яо (Калтех) и др. авторов по исследованию ОЭГ с внешней модуляцией с использованием электрооптического модулятора Маха-Цендера. В этих работах, наряду с успешными экспериментальными результатами по СПМ ФШ, не была все-таки построена теория ОЭГ с флуктуациями. Не было показано, как влияет фазовый шум лазера, определяемый его спонтанными шумами, на радиочастотный СПМ ФШ ОЭГ в целом. Не обсуждается упоминание о роли фазового шума лазера, входящего в состав ОЭГ в работах зарубежных авторов [61,69,70,74,75,94]. Указанные обстоятельства явились одним из стимулов для подготовки и проведения исследований данной диссертации в период с 2005 по 2014 гг.

Имеющиеся работы (опубликованные книги, статьи и материалы докладов) по исследованию ОЭГ [52—64] не дают сразу возможности определить основные свойства ОЭГ в СВЧ диапазоне, методы управления частотой, выделить и проанализировать факторы, влияющие на нестабильность частоты генерации и фазовый шум ОЭГ. Одним из достоинств настоящей работы является, по мнению автора, построение физической и инженерной теории оптоэлектронного генератора с учетом флуктуаций и объяснение влияния фазовых шумов спонтанного оптического излучения лазера на процесс формирования радиочастотных результирующих фазовых шумов ОЭГ при целенаправленной генерации в радиочастотном диапазоне.

Отметим, что ОЭГ относится, с точки зрения классической теории колебаний, к генераторам с запаздывающей обратной связью (ЗОС) [4—31], [32—45]. Теоретически изученными автогенераторами с ЗОС и близкими по своей схеме построения к ОЭГ, являются автогенераторы с линиями задержки на поверхностных акустических волнах (АГ ПАВ) [19—25, 40,41]. Эти исследования создали основу для теоретических исследований нового класса автогенераторов (АГ) – ОЭГ ВОЛЗ, исследованиям которого посвящена данная диссертационная работа.

Интенсивные исследования в 70-х – 80-х годах прошлого века волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и волоконно-оптических волокон с низкими оптическими потерями [42

—44] дали импульс к началу использования ВОЛЗ в автоколебательных системах [45—52], [46—52].

В последние десятилетия были выполнены работы по экспериментальному и теоретическому исследованию современных быстродействующих оптоэлектронных компонентов: лазеров, электрооптических модуляторов, фотодиодов, а также оптоэлектронных и волоконно-оптических систем с быстродействием 0,01 – 100 пс, с полосами частот модуляции до $(18 \div 200)$ ГГц [53—106]. Такие работы дали импульс для проведения исследований оптоэлектронных генераторов СВЧ и КВЧ диапазонов [57,61,63—66,73]. Работы по разработке и исследованию компонентов, используемых в ОАГ, активно проводятся в России [114—134]. В настоящее время в России группой Курносова В. Д. (ФГУП ПОЛЮС, Москва) ведутся исследования и разработка современных отечественных квантоворазмерных лазерных диодов (КЛД) и фотодиодов, позволяющих осуществлять модуляцию и демодуляцию на модулирующих частотах до 12 ГГц [102—103]. С появлением подобных сверхширокополосных отечественных КЛД стала возможной практическая разработка ОАГ ВОЛЗ в диапазоне до 12 ГГц [115—120,131,132]. Дальнейшие перспективы разработки ОАГ, работающих в СВЧ и КВЧ диапазонах, связаны с современными разработками оптоэлектронных устройств и фотонных нанотехнологий [135]. В последнее время в России появились работы по экспериментальному исследованию оптоэлектронного генератора группы проф. Белкина М. Е., что говорит об актуальности проблемы создания малошумящего оптоэлектронного генератора с ВОЛЗ [111].

Из зарубежных ученых в области экспериментальных исследований оптоэлектронного генератора ОАГ необходимо отметить публикации таких исследователей, как Наказава М. (Япония, 1982г.), Ярив А. (Калтех,1983г.), Малеки Л. (Калтех,1996г.), Стив Яо (Калтех,1996г.), Шумахер (Израиль,2005), Чен Ли (Республика Корея, 2008). Пионерскими теоретическими и экспериментальными исследованиями представляются работы отечественной российской «квантовой» группы МЭИ в составе Ильина Ю. Б., Константинова В. Н. и Борцова А. А., которые были выполнены в 1981—1993 гг. под научным руководством проф. д.ф.м. н. Григорьянца В. В. (МЭИ и ИРЭ РАН) [51,52,57,114—122]. В этих работах проведён анализ ОЭГ с ВОЛЗ, который в этих работах назывался лазерным автогенератором с ВОЛЗ или ЛАГ ВОЛЗ. Анализ оптоэлектронного генератора был проведен в предположении малого запаса по самовозбуждению и получены обыкновенные дифференциальные уравнения автономного ОЭГ с одиночным оптическим волокном (ОВ) в ВОЛЗ и были сформулированы основные концепции построения ОЭГ, как стабилизированного автогенератора на основе протяженного оптического волокна (ОВ). Одним из принципиально новых утверждений этой российской квантовой группы (и актуальными на сегодня) являлось доказанное положение, что малошумящий ОАГ может работать без радиочастотного усилителя. Этой квантовой группой с непосредственным участием автора настоящей диссертации, были впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования ОЭГ и опубликованы работы [51,52,57,114—122] об использовании в таком генераторе составных (на базе нескольких оптических волокон), дифференциальных ВОЛЗ и рециркулярных (нерекурсивных и рекурсивных) ВОЛЗ. Были разработаны новые способы управления частотой ОЭГ и доказано, что использование ВОЛЗ приводит к уменьшению кратковременной и долговременной нестабильности частоты ОЭГ [114—118].

На современном этапе ведутся интенсивные исследования за рубежом по созданию сверхкомпактного малошумящего генератора на базе ОЭГ с ВОЛЗ, предназначенного для бортового применения в малогабаритных БПЛА и других системах передачи информации. Построение сверхмалошумящих СВЧ автогенераторов на основе ОЭГ в различных областях техники, в вооружениях и военной специальной технике настоятельно требует ответа на многие вопросы. К ним можно отнести, в первую очередь, следующие. Какие должны быть в малошумящем ОЭГ по величине фазовые шумы КЛД? Какая должна быть в малошумящем ОЭГ

по величине ширина спектральной линии и мощность КЛД? Какова взаимосвязь оптических фазовых шумов лазера и радиочастотных фазовых шумов ОАГ, какие способы управления частотой необходимо применять в ОЭГ с ВОЛЗ, как влияет температура оптического волокна ВОЛЗ на уходы частоты автоколебаний в ОЭГ, какова должна быть геометрическая длина оптического волокна и многие другие.

Имеющиеся к настоящему моменту перечисленные теоретические работы не отвечают на вопросы, касающиеся ОЭГ, так как в этих работах авторы ограничивались изучением модели ОЭГ в виде кольцевой автоколебательной системы с бездисперсионным звеном запаздывания в петле положительной обратной связи, роль которого в рамках этой модели выполняет ВОЛЗ. Лазер в такой модели не рассматривался как самостоятельный источник оптических колебаний со своими амплитудными и фазовыми шумами, а представлялся линейным идеальным пассивным элементом.

В настоящий момент отсутствует сравнение ОЭГ по техническим характеристикам с другими генераторами, не проанализированы основные достоинства такого генератора. Не проведено теоретическое и экспериментальное исследование схем ОЭГ с прямой и внешней модуляцией КЛД с учетом шумов лазера.

Выше сказанное позволяет следующим образом сформулировать цель данной работы.

Целью диссертационной работы является целенаправленный анализ и решение ряда теоретических и практических проблем, включая математическое моделирование и экспериментальное исследование, которые возникают при планомерном изучении новой научной проблемы: исследовании и создании на базе нового класса оптоэлектронных генераторов с квантоворазмерным лазерным диодом современного малошумящего компактного генератора с учетом шума спонтанного излучения КЛД и выработки рекомендаций к характеристикам элементов ОЭГ, а также разработка схем и методов проектирования ОЭГ с прямой и внешней модуляцией параметров выходного излучения. В соответствии со сформулированной целью в диссертации решаются следующие задачи:

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.