

На правах рукописи

Донцова Екатерина Игоревна

Непрерывная генерация излучения с длиной волны менее 1 мкм с использованием основной и второй гармоники волоконного ВКР-лазера

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель : доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
Каблуков Сергей Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Цветков Владимир Борисович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

кандидат физико-математических наук
Иваненко Алексей Владимирович
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования Новосибирский государственный
университет

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт лазерной физики
СО РАН

Защита диссертации состоится "12" октября 2017 г. в ___ час. на заседании
диссертационного совета Д.003.005.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО
РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.ф.-м.н. Ильичёв Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность

Перспективными волоконными лазерными источниками с генерацией в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне выступают лазеры на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), называемые также рамановскими лазерами, в резонаторе которых происходит рассеяние излучения накачки на оптических фонах среды с уменьшением частоты генерируемого излучения [1]. Значительное преимущество волоконных ВКР-лазеров определяется тем, что длина волны генерируемого излучения зависит только от выбора длины волны излучения накачки. Спектр ВКР-усиления в волокнах достаточно широкий [2], что даёт возможности перестройки частоты. В зависимости от состава используемого волокна возможно получать различный частотный сдвиг.

Значительный интерес представляют непрерывные лазерные источники в области 0.6-1.8 мкм для таких приложений как оптические телекоммуникационные технологии, сенсорные системы, лазерная спектроскопия и т.д. Если генерация ВКР-лазеров на длинах волн 1-1.8 мкм легко реализуема, поскольку в этой области существует набор волоконных лазеров накачки, в частности, неодимовых, иттербиевых, эрбиевых, то коротковолновая генерация ВКР-лазера (менее 1 мкм) затруднена отсутствием достаточно мощных одномодовых волоконных источников. Непрерывные волоконные лазеры от видимой области спектра до 1 мкм потенциально широко применимы, например, в проекционных системах, в биомедицинских исследованиях, спектроскопии и других приложениях. Для длин волн генерации менее 1 мкм может стать перспективным как удвоение частоты генерации волоконных лазеров ИК диапазона, так и применение лазерных диодов для прямой накачки ВКР-лазеров.

Существует два перспективных метода, которые позволяют использовать многомодовые лазерные диоды в качестве источников излучения накачки. Первый заключается в использовании многомодового градиентного (GRIN) волокна, имеющего достаточно большой диаметр сечения сердцевины для заведения напрямую многомодового излучения [3]. Вторым методом является использование волокна с двойной оболочкой в волоконном резонаторе [4]. Излучение накачки в таком случае заводится во внутреннюю оболочку волокна, а генерируемое излучение распространяется только по сердцевине. Однако до начала диссертационной работы в указанных случаях для накачки применялись только твердотельные неодимовые и волоконные лазеры соответственно.

Отражателями в резонаторах ВКР-лазеров выступают различные волоконные и объёмные зеркала, однако лазер может быть реализован и в отсутствие отражательных элементов – со случайно распределённой обратной связью (СРОС) на рэлеевском рассеянии [5]. Волоконный СРОС ВКР-лазер имеет уникальные свойства и известен как высокоэффективный источник излучения [6]. Широкий спектр ВКР-усиления позволяет в таком лазере получать перестройку длины волны в широком диапазоне [7].

Ещё один метод расширения диапазона генерации волоконных ВКР-лазеров из ближнего ИК в коротковолновую область - нелинейное преобразование частоты лазерного излучения, например, генерация второй гармоники (ГВГ). Используя ГВГ излучения волоконных ВКР-лазеров с длиной волны 1.1-1.7 мкм, возможно получать излучение видимого диапазона, включая зелёное, жёлтое и красное [8]. Удвоение частоты ВКР-лазеров с локальными отражателями рассматривалось в разных работах, однако для СРОС ВКР-лазера ещё не было изучено.

При удвоении частоты в объёмных кристаллах [9] как правило возникают неудобства в виде необходимости юстировки оптических элементов, а также в виде потерь на них. Полностью волоконное исполнение лазера видимого диапазона может быть решением такой проблемы. Эффективное удвоение частоты волоконных лазерных источников внутри волокна уже было продемонстрировано в импульсном режиме работы лазера накачки [10,11]. Схема удвоения частоты непрерывного излучения с использованием волокна с периодически наведённой квадратичной нелинейностью (ВПНКН) была представлена только в жёлтом диапазоне спектра в работе [12].

Цель работы

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является разработка непрерывных источников с длиной волны генерации менее 1 мкм на основе волоконных ВКР-лазеров и, в частности, исследование возможности получения ВКР-генерации с прямой многомодовой накачкой лазерными диодами с длиной волны менее 1 мкм при точечном и случайно распределённом отражении в резонаторе, а также исследование особенностей генерации второй гармоники ВКР-лазеров со случайно распределённой обратной связью.

Задачи работы

Для достижения указанных целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Получение ВКР-генерации с прямой многомодовой диодной накачкой в резонаторе с градиентным волокном и локальными отражательными элементами, а также в резонаторе с градиентным волокном и случайно распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии в волокне.
2. Получение и исследование генерации второй гармоники (ГВГ) в видимом диапазоне спектра волоконного ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью в нелинейном оптическом кристалле.
3. Сравнение характеристик волоконного ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью и с двумя локальными отражательными элементами на основной и удвоенной частоте.
4. Исследование ГВГ волоконного лазера в волокне с периодически наведённой квадратичной нелинейностью (ВПНКН).

Научная новизна

К моменту начала исследований не существовало волоконных ВКР-источников с прямой многомодовой диодной накачкой. В диссертационной работе была впервые продемонстрирована такая возможность при накачке многомодовым лазерным диодом с длиной волны излучения 938 нм. При этом лазер на основе волокна с градиентным профилем изменения показателя преломления был исследован в конфигурациях с резонатором с двумя локальными отражательными элементами и со случайно распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии. Показано, что эффект уменьшения расходимости генерируемого излучения по сравнению с излучением накачки в градиентном волокне проявляется сильнее для СРОС-конфигурации ВКР-лазера.

Впервые получена генерация второй гармоники излучения непрерывного СРОС ВКР-лазера в кристалле PPLN. Проведено сравнение эффективности удвоения частоты СРОС ВКР-лазера и аналогичного ВКР-лазера с локальными отражателями в резонаторе той же длины.

Кроме того, в новой перспективной области исследований по удвоению частоты в полностью волоконной схеме с использованием волокна с

периодически наведённой квадратичной нелинейностью впервые получена и исследована генерация непрерывного излучения сине-зелёного диапазона.

Практическая значимость

Применение непрерывных волоконных ВКР-лазеров с прямой многомодовой накачкой и градиентным волокном определяется высокой яркостью этих источников и возможностью выбора длины волны в субмикронной спектральной области. Схема с прямой накачкой многомодовыми диодами позволяет упростить конструкцию лазера, а также использовать длины волн накачки вне диапазона генерации иттербиевых лазеров, что позволяет получить новые длины волн генерации. Конфигурация резонатора может включать два локальных отражателя, либо один отражатель и СРОС на рэлеевском рассеянии. Следует учесть, что эффект уменьшения расходимости генерируемого излучения по сравнению с излучением накачки проявляется сильнее для СРОС ВКР-лазера.

Непрерывный волоконный ВКР-лазер со случайно распределённой обратной связью и ГВГ в кристалле PPLN позволяет получать излучение видимого диапазона и может быть использован взамен аналогичного ВКР-лазера с резонатором с двумя локальными отражателями. Показано, что преимуществом СРОС ВКР-лазера является более высокий порог генерации второй стоксовой компоненты, ограничивающей мощность первой стоксовой компоненты рассеяния, следовательно и рост мощности второй гармоники.

Реализованный полностью волоконный лазер с излучением в сине-зелёной области видимого спектра на основе волокна с наведённой нелинейностью может служить источником излучения в системах проточной цитометрии, спектроскопии, прочих применениях, требующих селективного воздействия излучением небольшой мощности. ВКР-лазеры в свою очередь могут выступать в качестве источников накачки в схеме для полностью волоконного удвоения частоты непрерывного излучения в ВПНКН. Таким образом, возможно получение излучения на различных длинах волн в широком диапазоне видимой области спектра.

Апробация работы

Материалы работ по теме диссертации были доложены на следующих конференциях: 15th International Conference on Laser Optics (25-29 июня 2012г. - Санкт-Петербург); Российский Семинар по Волоконным Лазерам (27-30 марта 2012г. - Новосибирск); Winter College on Optics: Trends in Laser Development and Multidisciplinary Applications to Science and Industry (4-15 февраля 2013г. - Триест, Италия); 22th International Laser Physics Workshop (15-19 июля 2013г. – Прага, Чехия); International Symposium “Modern Problems of Laser Physics” (25-31 августа 2013г. - Новосибирск); Всероссийская конференция по волоконной оптике (16-18 октября 2013г. – Пермь); Photonics West (1-6 February 2014г. – Сан-Франциско, США); Российский Семинар по Волоконным Лазерам (14-18 апреля 2014 - Новосибирск); Photonics West (7-12 February 2015г. – Сан-Франциско, США); Байконур 2015. Физика - космосу. (10-17 декабря 2015г. - Байконур, Казахстан); International Conference on Laser Optics (27 June - 1 July 2016г. – Санкт-Петербург), Российский семинар по волоконным лазерам (5-9 сентября 2016г. – Новосибирск).

Результаты также докладывались на научных семинарах Института автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск (5 декабря 2013 г., 29 января 2015 г., 21 февраля 2017 г.).

Защищаемые положения

1. Достигнутый уровень яркости в современных многомодовых лазерных диодах достаточен для создания волоконных непрерывных ВКР-лазеров в градиентных многомодовых волокнах с прямой накачкой многомодовыми диодами как в конфигурации резонатора с локальными отражательными элементами, так и в конфигурации со случайно распределённой обратной связью.
2. Эффект уменьшения расходимости излучения ВКР-лазера на основе многомодового градиентного волокна относительно расходимости излучения многомодовой диодной накачки проявляется сильнее в случае конфигурации ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью.
3. Увеличение порога высших стоксовых порядков генерации и возможность сужения спектра генерации волоконного ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью в сравнении с аналогичным

лазером с локальными отражателями в резонаторе той же длины позволяет увеличить мощность генерации второй гармоники.

4. Для увеличения мощности генерации второй гармоники в полностью волоконной схеме образец волокна с периодически наведённой квадратичной нелинейностью (ВПНКН) может быть помещён во внешний волоконный резонатор.

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. Е.И. Донцова занималась проведением экспериментов, обработкой результатов и проведением расчётов, участвовала в обсуждениях результатов и подготовке статей.

Публикации

Основные результаты данной работы опубликованы в 6 рецензируемых научных журналах [А1–А6], 5 из которых входят в список определенных высшей аттестационной комиссией (ВАК), и 12 материалах конференций и семинаров [А7–А17].

Структура и объём диссертации

Работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Диссертация изложена на 105 страницах текста, содержит 43 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 96 наименований.

Основное содержание работы

Во введении описывается область проведения исследований. Представлено состояние работ в этой области к моменту начала диссертационной работы, определена актуальность и практическая значимость работы. В этой части сформулированы цели и задачи работы, защищаемые положения, описано содержание текста диссертации по главам. Также приводится информация о количестве публикаций автора по теме исследования, список конференций и семинаров, на которых была

представлена работа. В конце введения сформулированы защищаемые положения диссертации.

Первая глава посвящена описанию техники эксперимента. В первом разделе рассматриваются основные оптические компоненты, входящие в состав волоконных лазеров. Во втором разделе приводятся основные виды схем непрерывных волоконных лазеров. Рассматриваются лазеры как на основе активных волокон с легирующими добавками, так и на основе пассивных волокон. Также рассматриваются существующие непрерывные волоконные ВКР-лазеры с локальными отражательными элементами и со случайно распределённой обратной связью, в том числе в обычном телекоммуникационном волокне, возможные варианты источников излучения накачки. Приводится несколько вариантов схем случайных волоконных ВКР-лазеров.

Третий раздел посвящён возможностям удвоения частоты генерации непрерывных волоконных лазеров. Рассматриваются гибридные схемы ГВГ и технология создания образцов волокон с периодически наведённой квадратичной нелинейностью для полностью волоконного удвоения частоты.

В конце главы делаются выводы о перспективах продвижения волоконных ВКР-лазеров к коротковолновой границе ИК диапазона. Далее описываются рабочие диапазоны генерации волоконных лазеров разных типов. Представлена возможность расширения диапазонов генерации к видимой области посредством удвоения частоты. Делаются выводы о перспективах полностью волоконных схем лазеров с излучением видимого диапазона при использовании технологии внутриволоконного удвоения частоты.

Во второй главе речь идёт о волоконных ВКР-лазерах. Сначала описываются волоконные ВКР-лазеры с накачкой волоконными иттербиевыми лазерами. Рассматривается несколько конфигураций с различными отражательными элементами: две СРОС-конфигурации полуоткрытого резонатора (с узкополосной волоконной брэгговской решёткой (ВБР₁) и с широкополосным зеркалом Саньяка) и резонатор с двумя отражательными элементами (ВБР₂ и зеркало Саньяка). Схемы резонаторов приведены на рис.1.

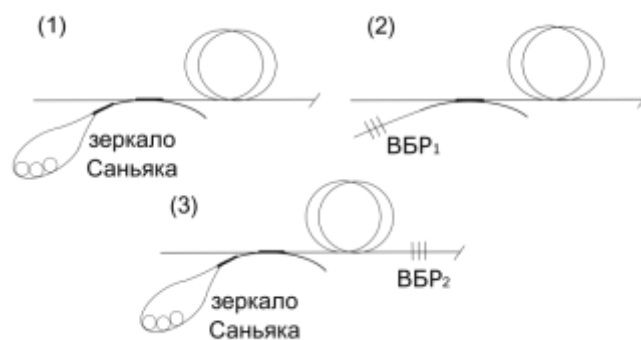


Рисунок 1. Схемы резонаторов ВКР-лазеров: (1) СРОС ВКР-лазер с зеркалом Саньяка, (2) СРОС ВКР-лазер с плотной ВБР₁, (3) ВКР-лазер с двумя отражательными элементами (зеркало Саньяка и выходная ВБР₂).

Проведено сравнение мощностных и спектральных характеристик представленных ВКР-лазеров. Так измеренные зависимости мощности излучения генерации от мощности излучения накачки (иттербиевого лазера) демонстрируют более высокий порог генерации для СРОС ВКР-лазеров по сравнению с ВКР-лазером с двумя отражателями. Однако СРОС ВКР-лазеры имеют более быстрый рост мощности от порогового значения до ~ 8 Вт накачки, после чего значения мощности для СРОС ВКР-лазеров и ВКР-лазера с локальными отражателями на этом участке примерно совпадают.

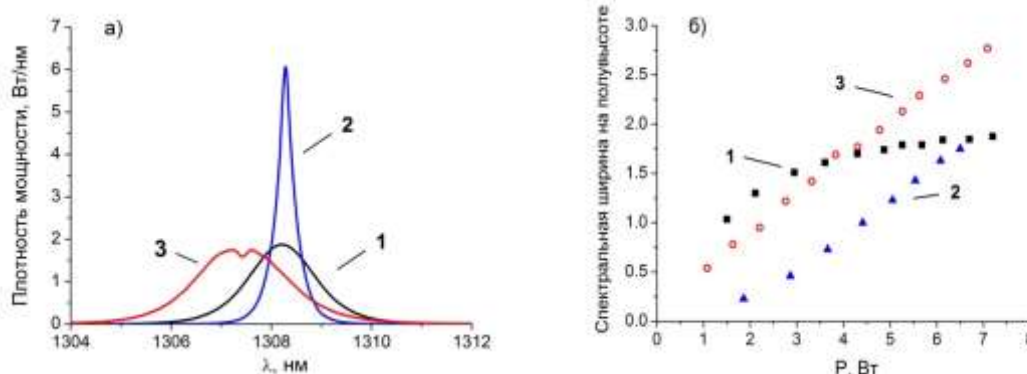


Рисунок 2. Выходные спектры волоконных ВКР-лазеров при одинаковой мощности генерации ~ 4 Вт (а) и их спектральные ширины в зависимости от мощности генерации (б), где (1) - СРОС ВКР-лазер с зеркалом Саньяка, (2) – СРОС ВКР-лазер с плотной ВБР₁, (3) - ВКР-лазер с двумя отражательными элементами (зеркало Саньяка и выходная ВБР₂).

Пример спектров генерации трёх конфигураций ВКР-лазера приведён на рис.2а при одинаковой мощности иттербиевого лазера равной 7 Вт (мощности генерации ~ 4 Вт). По измеренным ширинам в зависимости от мощности генерации (рис.2б) можно оценить, что ВБР в качестве

спектрально-селективного элемента позволяет значительно сузить спектр генерации при мощности генерации до ~ 6 Вт, однако при дальнейшем увеличении мощности ширины спектра для двух конфигураций СРОС ВКР-лазера сравниваются. Тем не менее, спектры СРОС ВКР-лазеров уширяются в меньшей степени, чем спектр ВКР-лазера с двумя локальными отражателями. Более узкий спектр генерации СРОС ВКР-лазера со спектрально-селективным элементом в виде ВБР представляет интерес для ГВГ, поскольку кристаллы для видимой области как правило обладают шириной синхронизма, составляющей доли нм.

Далее рассматривается возможность использования прямой накачки многомодовыми лазерными диодами в конфигурации ВКР-лазера на основе многомодового градиентного волокна с двумя отражательными элементами в резонаторе и СРОС-конфигурации с одним отражательным элементом. На рис.3а представлены мощностные зависимости проходящего излучения накачки с длиной волны 938 нм (квадраты) и излучения генерации с длиной волны 980 нм, распространяющегося в прямом с накачкой (треугольники) и обратном (круги) направлении. Максимальная величина суммарной мощности генерируемого излучения составила 2.9 Вт. При добавлении в схему объёмного зеркала, возвращающего часть излучения накачки в резонатор, получается двухпроходная схема накачки с мощностью генерации уже до 3.3 Вт.

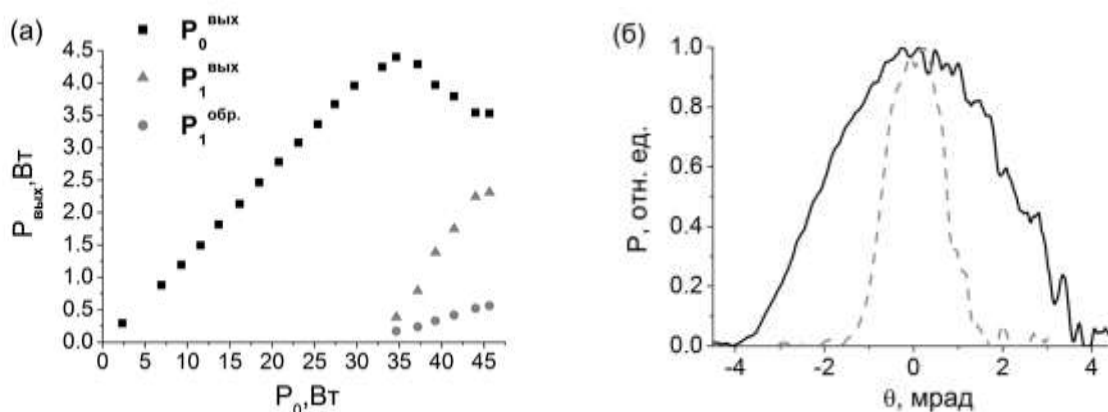


Рисунок 3. (а) Мощность генерации ($P_1^{\text{вых}}$ - вперед, $P_1^{\text{обр}}$ - назад) многомодового ВКР-лазера с прямой диодной накачкой и двумя отражателями в резонаторе и проходящей накачки $P_0^{\text{вых}}$ в зависимости от входной мощности накачки P_0 ; (б) профили интенсивности излучения проходящей накачки (сплошная линия) и стоксовой генерации (пунктирная линия).

В СРОС-конфигурации ВКР-лазера с прямой диодной накачкой вырастает порог генерации до 42 Вт, мощность генерации при доступном

уровне мощности накачки составляет ~ 0.3 Вт (рис.4а кружки), в двухпроходной схеме накачки – 0.5 Вт (рис.4а треугольники).

При рассмотрении лазерных пучков на расстоянии ~ 84 см от выхода лазера зарегистрировано уменьшение расходимости выходного ВКР-излучения в 3 раза по сравнению с излучением накачки (рис.3б). Для аналогичного СРОС ВКР-лазера также наблюдается эффект уменьшения расходимости генерируемого излучения, по сравнению с накачкой. При этом разница расходимости проявляется ещё сильнее - в 4.5 раза (рис.4б), что связано с меньшей добротностью резонатора в связи с отсутствием локального отражения и возможным влиянием радиальной зависимости рэлеевского отражения в градиентном волокне. Профиль пучка СРОС ВКР-лазера хорошо аппроксимируется гауссовой функцией (рис.4б, пунктирная линия).

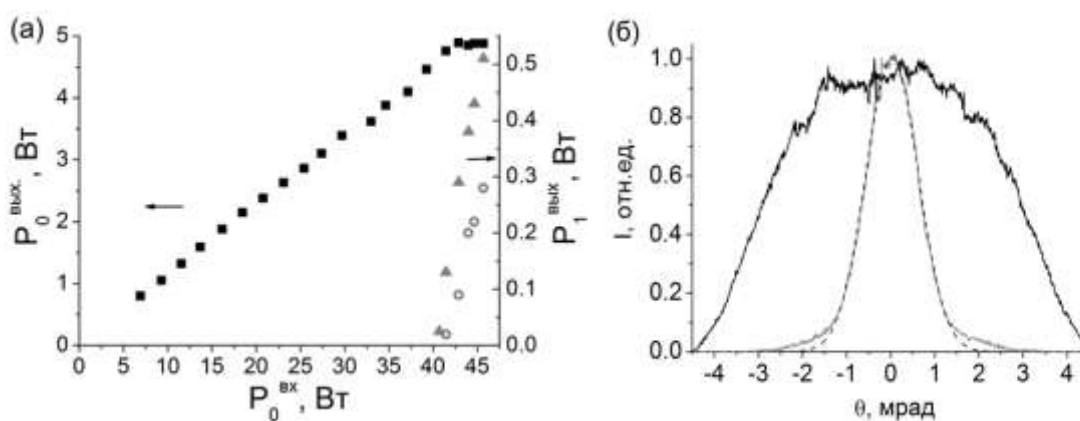


Рисунок 4. (а) Мощность генерации ($P_1^{\text{вых}}$) в однопроходной (треугольники) и двухпроходной (кружки) схеме СРОС ВКР-лазера с прямой диодной накачкой и проходящей накачки $P_0^{\text{вх}}$ (квадраты) в зависимости от входной мощности накачки P_0 ; (б) профили интенсивности излучения проходящей накачки (чёрная линия) и стоксовой генерации (серая линия) и распределение Гаусса (пунктир).

В конце главы обобщаются результаты по первой экспериментальной демонстрации прямой накачки лазерными диодами непрерывных ВКР-лазеров на основе градиентного волокна в двух конфигурациях с длиной волны 980 нм. Высокое качество выходного излучения таких лазеров за счёт эффекта уменьшения расходимости открывает путь к эффективной ГВГ их излучения в видимом диапазоне спектра. Причём СРОС ВКР-лазеры могут выступать альтернативой аналогичным ВКР-лазерам с двумя отражательными элементами, обладая более высоким качеством выходного пучка. Продемонстрированные схемы дают новые возможности в развитии простых лазерных источников широкого

диапазона длин волн - от ближнего ИК до видимого, как для научных, так и для практических применений.

Третья глава представляет результаты по генерации второй гармоники в видимом диапазоне спектра непрерывных волоконных лазеров в качестве одного из методов продвижения в коротковолновую область спектра. Сначала рассматривается ГВГ ВКР-лазеров (рис.1) с накачкой иттербиевым волоконным лазером, рассмотренных в разделе 2.1 диссертации. Удвоение частоты осуществляется в однопроходной схеме в периодически ориентированном кристалле LiNbO_3 , легированном MgO , (MgO:PPLN) с длиной доменной структуры 8 мм и периодом доменной структуры ~ 12.7 мкм. На рис.5 точками показаны измеренные значения мощности второй гармоники в зависимости от мощности основного излучения для трёх конфигураций ВКР-лазеров. В проводимых исследованиях были получены также расчётные спектры на удвоенной частоте и расчётные мощности второй гармоники (рис.5, линии).

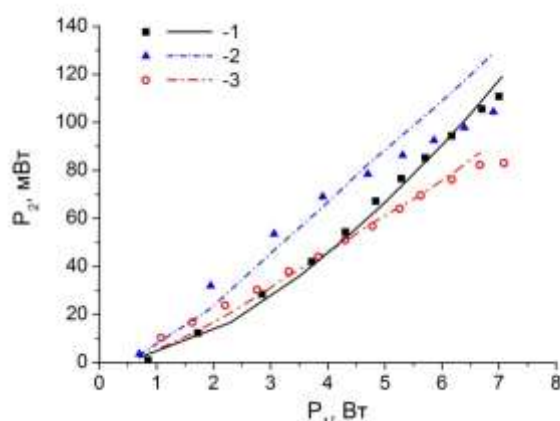


Рисунок 5. Зависимость мощности второй гармоники от мощности основного излучения: (1) - СРОС ВКР-лазера с зеркалом Саньяка, (2) – СРОС ВКР-лазера с плотной ВБР₁, (3) - ВКР-лазера с двумя отражательными элементами (зеркало Саньяка и выходная ВБР₂) в соответствии с рис.1 и 2. Точки – эксперимент, линии – расчёт.

Из рисунка следует, что СРОС ВКР-лазер даёт возможность получить больше мощности второй гармоники (до 110 мВт) на 654 нм благодаря более высокому порогу генерации второй стоксовой компоненты ВКР. При этом при мощностях основного излучения менее 4 Вт для СРОС ВКР-лазера с узкополосным отражателем в полуоткрытом резонаторе мощность второй гармоники получается в ~ 2 раза выше, чем для случая с широкополосным отражателем, пока ширина основного спектра меньше

ширины квазисинхронизма, составляющей 0.6 нм. В результате продемонстрировано, что эффективность удвоения частоты выше для СРОС ВКР-лазера с наиболее узким спектром, то есть в схеме с узкополосной ВБР.

Возможность удвоения частоты волоконных лазеров в видимой области спектра демонстрируется также с образцами ВПНКН, в частности, в синезелёном диапазоне, что сделано впервые. Сначала рассматривается внрезонаторная однопроходная полностью волоконная схема удвоения частоты лазера. Экспериментально получены кривые синхронизма с одночастотным и многочастотным основным излучением волоконного лазера, а также с лазером с самосканированием частоты. Источник со сканированием частоты позволяет прописать кривые синхронизма отдельно для различных состояний поляризации. Оказалось, что в условиях пересечения максимумов квазисинхронизма нескольких типов в имеющихся образцах эффективность удвоения частоты поляризованного и неполяризованного излучения имеет близкие величины.

Для повышения эффективности преобразования частоты образец ВПНКН помещался во внешний волоконный резонатор (рис.6). В эксперименте сравнивалась мощность ГВГ во внешнем волоконном резонаторе с ВПНКН и во внрезонаторной однопроходной схеме.

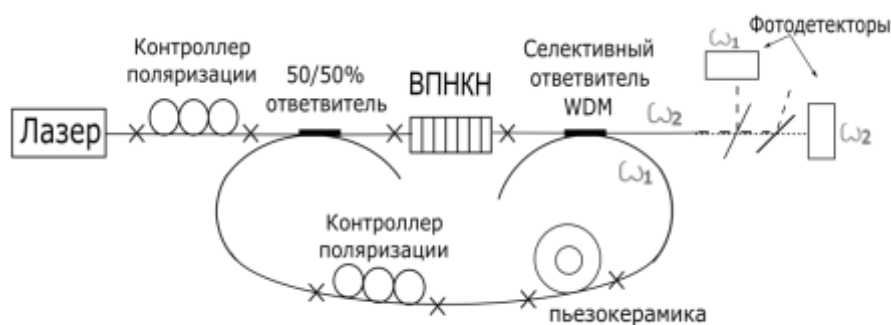


Рисунок 6. Схема ГВГ во внешнем резонаторе с ВПНКН.

Внешний кольцевой резонатор работал в режиме сканирования длины. В ходе эксперимента измерялись спектры пропускания резонатора, т.е. зависимости мощности накачки и второй гармоники от длины резонатора, линейно изменяющейся во времени (увеличение мощности во внешнем резонаторе). Полученные экспериментальные данные (рис.7 сплошная линия) хорошо аппроксимируются теоретической зависимостью (рис.7 пунктирная линия), соответствующей формуле Эйри:

$$\eta = P_{\text{внутрирез.}}/P_{\text{вх.}} = \frac{T_1}{(1-\sqrt{T_1 T_2})^2 + 4\sqrt{T_1 T_2} \sin^2(\delta/2)}$$
, где η – коэффициент увеличения мощности основного излучения во внешнем резонаторе; $P_{\text{внутрирез.}}$ и $P_{\text{вх.}}$ – мощность основного излучения внутри резонатора и на входе в резонатор, соответственно; T_1 – коэффициент пропускания входного ответвителя; T_2 – эффективный коэффициент пропускания выходного ответвителя, учитывающий суммарные потери на всех элементах резонатора за исключением потерь на входном ответвителе; δ – набег фазы за обход резонатора.

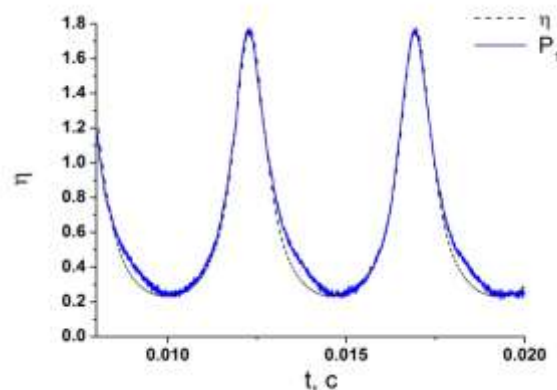


Рисунок 7. Увеличение мощности во внешнем волоконном резонаторе - теория и эксперимент для основного излучения.

Для излучения второй гармоники измеренный коэффициент увеличения мощности во внешнем резонаторе (~ 2) несколько меньше оценочного ($\eta^2 = 1.8^2 \approx 3.2$). На коэффициент увеличения мощности второй гармоники в эксперименте может влиять тот факт, что не всё накопленное в резонаторе излучение накачки линейно поляризовано вдоль одной оси образца ВПНКН. В дальнейшем, используя в лазере волокна с сохранением поляризации и снизив потери в резонаторе до уровня 0.5 дБ, можно достичь увеличения мощности основного излучения в резонаторе $\eta \sim 10$ раз. В соответствии с этим можно достичь мощности ГВГ уровнем в несколько милливольт при накачке ~ 1 Вт с квадратичным масштабированием при увеличении мощности накачки.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и выражены благодарности коллективу.

Основные результаты:

1. Получена непрерывная генерация на длине волны 980 нм волоконных ВКР-лазеров с прямой многомодовой диодной накачкой в конфигурациях с локальными отражательными элементами и со случайно распределённой обратной связью (СРОС) на рэлеевском рассеянии.
2. Показано, что эффект уменьшения расходимости генерируемого излучения ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью проявляется сильнее, чем для ВКР-лазера с двумя локальными отражательными элементами. Достигнуто уменьшение расходимости генерируемого излучения в 3 и в 4.5 раза соответственно по сравнению с расходимостью излучения накачки.
3. Впервые реализовано удвоение частоты одномодового волоконного ВКР-лазера со случайно распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии в кристалле PPLN. Проведено сравнение генерационных характеристик на основной и удвоенной частоте для волоконного ВКР-лазера со СРОС и с локальными отражателями с резонатором той же длины. Показано, что более высокий порог генерации высших стоксовых порядков и более узкий спектр генерации СРОС ВКР-лазера позволяет получить большую мощность излучения второй гармоники. Максимальная мощность второй гармоники с длиной волны 654 нм составила >110 мВт.
4. Впервые проведено исследование ГВГ в ВПНКН, помещённом во внешний волоконный резонатор, что привело к увеличению мощности второй гармоники в ~ 2 раза по сравнению с однопроходной схемой. Показано, что коэффициент увеличения мощности в резонаторе ограничен высоким уровнем потерь ВПНКН для основного излучения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1.** Донцова Е.И., Каблуков С.И., Бабин С.А. Волоконный иттербиевый лазер с перестройкой длины волны в диапазоне 1017 – 1040 нм и генерацией второй гармоники // Квантовая электроника. – 2013. - Т.43. - №.5. - С.467.
- A2.** Kablukov S.I., Dontsova E. I., Zlobina E.A., Nemov I.N., Vlasov A.A. and Babin S.A. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm // Laser Physics Letters. – 2013. – V.10. – №.8. – P.085103.

A3. Babin S.A., Kablukov S.I., Dontsova E. I. Random fiber laser directly pumped by a high-power laser diode // Optics Letters. – 2013. – V.38. – №.17. – P.3301.

A4. Донцова Е.И., Лобач И.А., Достовалов А.В., Каблуков С.И. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведённой квадратичной нелинейностью // Прикладная фотоника. – 2015. – Т.2. – №.4. – С.342.

A5. Dontsova E. I., Kablukov S. I., Vatnik I.D., Babin S.A. Frequency doubling of Raman fiber lasers with random distributed feedback // Optics Letters. – 2016. – V.41 – №.7 – P.1439-1442.

A6. Донцова Е.И., Каблуков С.И., Лобач И.А., Достовалов А.В., Бабин С.А., Гладышев А.В., Дианов Е.М., Corbari C., Ibsen M., Kazansky P.G. Генерация второй гармоники в волоконном световоде во внерезонаторной и внутрирезонаторной схемах // Квантовая электроника. – 2016. - Т.46. - №.11. - С.989-994.

Список цитируемых работ

1. Ландсберг Г.С. Оптика // М.:Физматлит. – 2003. – 6-е изд. – С.848.
2. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т.34. – №.10. – С.881-900.
3. Baek S.H., Roh W.B. Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber // Optics Letters. – 2004. – V.29. – №.2. – P.153-155.
4. Codemard C.A, Dupriez P., Jeong Y., Sahu J. K., Ibsen M., Nilsson J. High-power continuous-wave cladding-pumped Raman fiber laser // Optics Letters. – 2006. - V. 31. - №.15. – P.2290-2292.
5. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher, P. Harper, D.V. Churkin, S.I. Kablukov, J.D. Ania-Castanon, V. Karalekas, E.V. Podivilov A.E. Random distributed feedback fibre laser // Nature Photonics. – 2010. - №.4. - P.231-235.
6. Babin S.A., Vatnik I.D., Laptev A.Yu., Bubnov M.M., Dianov E.M. High-efficiency cascaded Raman fiber laser with random distributed feedback // Optics Express. – 2014. – V.22. – №.21. – P.24929-24934.
7. Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Podivilov E.V., Turitsyn S.K. Tunable random fiber laser // Physical Review. – 2011. – V.84. - №.2. – P.021805.
8. Feng Y., Huang S., Shirakawa A., Ken-ichi Ueda. Multiple-color cw visible lasers by frequency sum-mixing in a cascading Raman fiber laser // Optics Express. – 2004. – V.12 - №.9. - P.1843-1847.
9. Georgiev D., Gapontsev V.P., Dronov A.G., Vyatkin M.Y., Rulkov A.B., Popov S.V., Taylor J.R. Watts-level frequency doubling of a narrow line

linearly polarized Raman Fiber laser to 589 nm // Optics Express. – 2005. – V.13. – №.18. – P.6772-6776.

10. Canagasabey A., Corbari C., Gladyshev A.V., Liegeois F., Guillemet S., Hernandez Y., Yashkov M., Kosolapov A., Dianov E.M., Ibsen M., Kazansky P.G. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers // Opt. Lett. – 2009. – V.34 – №.16. – P.2483–2485.

11. Corbari C., Gladyshev A.V., Lago L., Ibsen M., Hernandez Y., Kazansky P.G. All-fiber frequency-doubled visible laser // Opt. Lett. – 2014. – V.39– №.22. – P.6505–6508.

12. Dvoyrin V.V., Gladyshev A.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Canagasabey A., Corbari C., Ibsen M., Kazansky P.G. Yellow All-Fiber Bi Laser // in IEEE ECOC – 2008. – V.2-5.