

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
Лазерной Физики Сибирского
отделения Российской академии
наук,

член-корреспондент РАН

А.В. Тайченачев

2017 г



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Донцовой Екатерины Игоревны «Непрерывная генерация излучения с длиной волны менее 1 мкм с использованием основной и второй гармоники волоконного ВКР-лазера» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Актуальность темы диссертации.

Лазеры на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), в резонаторе которых происходит рассеяние излучения накачки на оптических фонах среды с уменьшением частоты генерируемого излучения, являются перспективными волоконными лазерными источниками с генерацией в ближнем инфракрасном диапазоне. Спектр ВКР-усиления в волокнах достаточно широкий, что открывает возможности перестройки частоты. При этом величина частотного сдвига зависит от состава используемого волокна. ВКР - лазеры могут найти применение в оптических телекоммуникационных системах, сенсорных системах, в биомедицинских исследованиях, в лазерной спектроскопии и других областях науки и техники.

Существует два перспективных метода, которые позволяют использовать мощные 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. Вторым методом является использование волокна с двойной оболочкой в волоконном резонаторе.

Расширение диапазона генерации волоконных ВКР-лазеров из ближнего ИК в коротковолновую область возможно так же путём нелинейное преобразование частоты лазерного излучения, например, генерация второй гармоники (ГВГ).

Диссертационная работа Е.И. Донцовой посвящена экспериментальным исследованиям и разработке непрерывных источников с длиной волны генерации менее 1 мкм на основе волоконных ВКР-лазеров, а также исследование особенностей генерации второй гармоники ВКР-лазеров со случайно распределённой обратной связью. Таким образом, работа представляет собой несомненный интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и с практической, а представленная в диссертации тема является, безусловно, актуальной.

Структура и содержание диссертации.

Диссертационная работа содержит 105 страниц, включая 43 рисунка, и состоит из Введения, 3 Глав, Заключения и Списка литературы (96 наименований).

Во введении описывается область проведения исследований. Представлено состояние работ в этой области к моменту начала диссертационной работы, определена актуальность и практическая значимость работы. Сформулированы цели и задачи работы, 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.

Глава 1 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. Приводятся 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. 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 ВКР-лазеров с случайно распределённой обратной связью (СРОС) 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.

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. Продемонстрированные схемы открывают новые возможности в развитии простых лазерных источников широкого диапазона длин волн - от ближнего ИК до видимого, как для научных, так и для практических применений.

Глава 3 представляет результаты по генерации второй гармоники (ГВГ) в видимом диапазоне спектра непрерывных волоконных лазеров в качестве одного из методов продвижения в коротковолновую область спектра. Рассматривается ГВГ ВКР-лазеров с накачкой иттербиевым волоконным лазером. Удвоение частоты осуществляется в однопроходной схеме в периодически ориентированном кристалле MgO:PPLN с длиной доменной структуры 8 мм и периодом доменной структуры ~12.7 мкм.

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 волоконной брэгговской решёткой.

Возможность удвоения частоты волоконных лазеров в видимой области спектра демонстрируется также с образцами волокна с периодически наведённой квадратичной нелинейностью (ВПНКН), в частности, в сине-зелёном диапазоне, что сделано впервые. Для повышения эффективности преобразования частоты образец ВПНКН помещался во внешний волоконный резонатор

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

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы Е.И. Донцовой, представляющими практический и научный интерес, являются следующие: 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.

Новизна исследования.

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми. 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 СРОС 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.

В новой перспективной области исследований по удвоению частоты в полностью волоконной схеме с использованием ВПНКН впервые получена и исследована генерация непрерывного излучения сине-зелёного диапазона.

Научная ценность и значимость полученных результатов.

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 ВПНКН 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.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в научно-технической деятельности ИОФАН (г. Москва), ФИАН (г. Москва), ИСАН (г. Троицк), МГУ (г. Москва), НГУ (г. Новосибирск), ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск), ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск), ИФП СО РАН (г. Новосибирск) и других научных организациях.

По диссертации имеются следующие замечания:

Первое защищаемое положение: "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." не вполне коррелирует с темой диссертационной работы «Непрерывная генерация излучения с длиной волны менее 1 мкм с использованием основной и второй гармоники волоконного ВКР-лазера». Более корректной была бы такая формулировка: «Непрерывная генерация излучения с длиной волны менее 1 мкм с использованием основной и второй гармоники волоконного ВКР-лазера, может быть получена с использованием современных многомодовых лазерных диодов в градиентных многомодовых волокнах", поскольку работа направлена не на улучшение характеристик лазерных диодов, а на их использование в разрабатываемых волоконных лазерах и оптических системах накачки.

Так же можно отметить отдельные недочеты в оформлении работы, например на многих экспериментальных графиках не показана ошибка измерений. На рисунках 15, 31, 34 используется термин плотность мощности, измеряемый в единицах Вт/нм, на самом деле речь идёт о спектральной плотности мощности лазерного излучения. На рисунке 16, 29 спектральная ширина на полувысоте приводится в безразмерных единицах. Сделанные замечания не носят принципиального характера, не снижают общего положительного впечатления от диссертации.

Положения диссертации Донцовой Е.И., выносимые на защиту, обладают несомненной научной новизной. Работа выполнена на высоком научно-исследовательском уровне и является существенным вкладом в лазерную физику. Результаты работы опубликованы в 6 рецензируемых научных изданиях, 5 из которых входят в список рекомендованных ВАК. Материалы диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Донцовой Е.И. является завершенной научно-исследовательской работой, соответствующей специальности 01.04.05 «Оптика», полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Отзыв составлен доктором физико-математических наук М.Н. Скворцовым на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре Института лазерной физики СО РАН, который состоялся 8 сентября 2017 г.

Главный научный сотрудник
Отдела лазерной физики ИЛФ СО РАН,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.21 - лазерная физика
Россия, 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д. 15Б
тел. (383) 333-21-27
e-mail: skv@laser.nsc.ru

М.Н. Скворцов