

ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

на диссертационную работу Каблукова Сергея Ивановича “Нелинейное преобразование спектра генерации перестраиваемых волоконных лазеров”, представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

01.04.05 – оптика

Диссертация Каблукова С.И. посвящена исследованию возможностей нелинейного преобразования излучения волоконных лазеров в новые спектральные диапазоны. Данное направление исследований является актуальным в связи с тем, что волоконные лазеры (ВЛ) получили в последнее время широкое распространение благодаря своим уникальным выходным характеристикам, но только в ограниченном диапазоне длин волн в ближней ИК области спектра (1-2 мкм). Расширение диапазона, в первую очередь в коротковолновую область (<1 мкм), открывает новые возможности их практического использования, в первую очередь, в биомедицине. Для достижения прикладного результата необходимо решить ряд задач фундаментального характера: построить модель, адекватно описывающую спектр генерации многомодового ВЛ и его уширение с ростом мощности из-за нелинейного взаимодействия мод, разработать методы перестройки частоты генерации внутри линии усиления, исследовать различные способы преобразования частоты перестраиваемых ВЛ за пределы линии усиления, используя нелинейные явления (ВКР, генерация гармоник, параметрическая генерация). Диссертационная работа Каблукова С.И. представляет собой комплексное теоретическое и экспериментальное исследование основных нелинейных процессов, происходящих при генерации и преобразовании излучения ВЛ, которое позволило сделать прорыв в данном научном направлении и впервые получить на основе ВЛ эффективную перестраиваемую генерацию лазерного излучения на разных длинах волн коротковолнового диапазона (0,5-1 мкм).

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 263 страницы, включая 2 таблицы и 100 рисунков. Список цитируемой литературы составляет 297 наименований.

Во введении описана исследуемая область науки и выполнен обзор публикаций по теме, на основе которого сформулированы цели и задачи работы. В конце введения приведены защищаемые положения и краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава является обзорно-методической: она посвящена описанию как общих основ физики и техники волоконных лазеров, так и конкретных методов и схем, используемых в работе. В частности, здесь рассмотрены схемы оптической накачки

активных световодов и варианты лазерных резонаторов ВЛ. Приведена балансная модель для расчёта мощности генерации с учетом однородного характера насыщения усиления. Если в активных световодах, легированных иттербием, насыщение усиления достаточно хорошо изучено, то для ВКР-усиления в пассивных световодах потребовались собственные измерения спектра насыщенного усиления методом активной спектроскопии комбинационного рассеяния. Поскольку характеристики ВЛ с линейным резонатором зависят от параметров используемых зеркал, в последнем параграфе главы подробно описаны используемые в этом качестве волоконные брэгговские решётки (ВБР).

Во второй главе рассмотрена модель уширения спектра генерации многомодового иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ) и возможности управления спектром для повышения эффективности нелинейного преобразования. Показано, что для адекватного описания достаточно учета эффекта фазовой самомодуляции (ФСМ), а дисперсией групповых скоростей разных мод можно пренебречь. В этом приближении форма линии генерации описывается функцией гиперболического секанса, что подтверждается экспериментом. Ширина спектра генерации пропорциональна ширине спектра отражения ВБР, нелинейности световода, длине резонатора и мощности лазера. Показано, что вблизи порога генерации ИВЛ существенную роль играют эффекты выжигания пространственных дыр инверсии, которые приводят к самосканированию (пассивной перестройке) частоты в пределах спектра отражения ВБР, сопровождающемуся незатухающими пульсациями. Дано объяснение эффекта с учётом продольной модуляции усиления и показателя преломления. Реализована активная перестройка частоты с помощью синхронного сжатия ВБР, образующих резонатор, что позволило создать ИВЛ в полностью волоконном исполнении, работающие практически во всём диапазоне усиления (от 1,02 до 1,11 мкм), с интервалом непрерывной перестройки более 45 нм.

Третья глава посвящена генерации второй гармоники (ГВГ) с учётом специфики ИВЛ: много продольных мод со случайной фазой, случайная поляризация, возможность перестройки в широком диапазоне. В частности, экспериментально продемонстрировано увеличение эффективности ГВГ за счёт статистических флуктуаций интенсивности многомодового ИВЛ. Коэффициент увеличения ($\sim 1,6$) оказался одинаков для кристаллов с синхронизмом 1 и 2 типа. Во втором случае возможно эффективно преобразовать излучение со случайной поляризацией и перестраивать частоту второй гармоники в широком диапазоне за счёт изменения угла падения излучения ИВЛ на кристалл. Проведенный анализ различных вариантов синхронизма кристалла КТР показал, что выбор оптимального угла среза позволяет скомпенсировать снос необыкновенной волны и получить эффективную ГВГ в широком диапазоне длин волн. Для синхронизма в

плоскости XZ получена перестройка в диапазоне 540-560 нм с одним кристаллом, для плоскости XY - перестройка 510-540 нм с двумя кристаллами, а для плоскости YZ продемонстрирована возможность перестройки практически во всём диапазоне генерации ИВЛ при использовании только одного кристалла, однако эффективность ГВГ при этом на порядок ниже. Для повышения эффективности ГВГ предложена и реализована схема с удвоением частоты внутри резонатора ИВЛ. Мощность второй гармоники во внутриврезонаторной схеме достигает уровня 400 мВт, что в 4-8 раз (в зависимости от спектрального диапазона) выше, чем во внерезонаторной схеме при той же мощности диодной накачки ИВЛ (19 Вт в максимуме). Показано, что коэффициент увеличения ограничен эффектом уширения спектра ИВЛ, который приводит к росту потерь основного излучения на брэгговской решётке, используемой для перестройки длины волны лазера. При перестройке частоты ИВЛ с внутриврезонаторным удвоением обнаружена сильная модуляция интенсивности из-за фазовых эффектов, которая была успешно устранена с помощью фазовой пластинкой, компенсирующей внутриврезонаторную дисперсию основного излучения и второй гармоникой. В конце главы приведены результаты по ГВГ в периодически полингванном световоде, эффективность которой для непрерывного ИВЛ оказалась относительно низкой из-за значительных потерь в образце как для основного излучения, так и второй гармоники.

Четвёртая глава посвящена исследованию спектральных характеристик волоконных ВКР-лазеров и особенностей ГВГ в этом случае. Сравнение ВКР-лазера с ИВЛ показало, что форма спектра генерации описывается в обоих случаях функцией гиперболического секанса, но характер уширения с ростом мощности разный: линейный и корневой, соответственно. Накачка фосфосиликатного ВКР-лазера перестраиваемым ИВЛ позволила реализовать синхронную перестройку его длины волны на 50 нм при уровне выходной мощности 3 Вт в области 1,3 мкм. Далее была получена и исследована ГВГ излучения ВКР-лазера с преобразованием в красную область (655 нм) в кристалле PPLN. Поскольку ширина спектра генерации ВКР-лазера при больших мощностях превышает ширину синхронизма кристалла, эффективность ГВГ насыщается с ростом мощности. Построена модель с учетом процессов как прямого удвоения, так и суммирования разных частот (мод) внутри спектра ВКР-лазера, которая хорошо описывает эксперимент. При этом для малых мощностей (до ~1 Вт), когда ширина спектра генерации меньше ширины синхронизма кристалла, наблюдается статистический выигрыш в эффективности ГВГ многочастотного ВКР-лазера по сравнению со случаем одночастотного излучения.

Пятая глава посвящена вопросам параметрического преобразования частоты перестраиваемого ИВЛ в двулучепреломляющих одномодовых световодах. На примере

коммерчески доступного световода LMA-PM-5 рассчитаны и измерены кривые синхронизма в скалярном и векторном вариантах. Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения перестраиваемого ИВЛ в коротковолновый диапазон длин волн (0,75-1 мкм). Реализована однорезонаторная схема волоконного параметрического генератора, в которой получены рекордные для непрерывного режима частотные отстройки генерируемой антистоксовой волны (до 38 ТГц). Продемонстрирована перестройка генерируемого излучения на ~80 нм при перестройке длины волны накачки (ИВЛ) менее чем на 4 нанометра (1047,5–1051,4 нм). Уровень выходной мощности при этом достигает 400 мВт, а эффективность преобразования - 18%. В конце главы обсуждается влияние конкурирующих нелинейных процессов на параметрическую генерацию, а именно вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), которое проявляется при малой ширине линии ИВЛ.

В заключении перечислены результаты и выводы, полученные автором диссертации. В качестве наиболее значимых результатов следует отметить следующие:

- Всесторонне исследованы спектральные характеристики иттербиевого и ВКР волоконных лазеров и возможности управления спектром генерации. Установлена связь ширины спектра с параметрами резонатора и мощностью генерации лазера.
- Продемонстрирована плавная перестройка частоты генерации волоконных лазеров в широком диапазоне (50 нм) в полностью волоконной конфигурации.
- Определены условия, при которых возможно эффективное удвоение частоты волоконных лазеров, перестраиваемых в широком диапазоне. Получена вторая гармоника перестраиваемого иттербиевого волоконного лазера с уровнем мощности 400 мВт в диапазоне 510-560 нм.
- Рассчитаны и измерены кривые синхронизма двулучепреломляющего фотонно-кристаллического волоконного световода в области 0,75–1,6 мкм. Экспериментально реализован полностью волоконный оптический параметрический генератор (ВОПГ) с накачкой перестраиваемым ИВЛ, перестраиваемый в диапазоне 0,92–1 мкм с дифференциальной эффективностью преобразования до 18%.

Научная значимость работы заключается в изучении и обобщении широкого класса вопросов, касающихся исследования нелинейных явлений при формировании спектра, генерации гармоник и параметрического преобразования излучения перестраиваемых волоконных лазеров. В работе сделан серьезный вклад в формирование фундаментальных основ физики волоконных лазеров, а полученные режимы генерации представляют большой практический интерес для биомедицинских применений волоконных лазеров.

Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности, а автореферат полностью отражает ее содержание. По материалам диссертации автором опубликована 21 статья в ведущих профильных российских и зарубежных рецензируемых журналах. Результаты докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и получили хорошее цитирование в работах других авторов.

Таким образом, диссертация Каблукова Сергея Ивановича является законченной научной работой, в которой проведено всестороннее исследование и обобщение вопросов нелинейного преобразования излучения волоконных лазеров. По объему и уровню проведенных исследований, научной новизне результатов, их научной и практической значимости диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Каблуков С. И. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Заместитель директора ИАиЭ СО РАН,
чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н.

С.А.Бабин

Подпись чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н. С.А.Бабина заверяю:

Заместитель директора ИАиЭ СО РАН
д.т.н.



В.С.Киричук