

## Основные результаты работ по гранту РФФИ 14-22-00118 за 2017 г.

В 2017 году проведена оптимизация полностью волоконной схемы ВКР-лазера с прямой накачкой градиентного многомодового световода мощными многомодовыми лазерными диодами (ЛД) в части увеличения коэффициента заведения излучения диодной накачки, эффективности селекции основной поперечной моды волоконными брэгговскими решётками (ВБР) и возвращения в резонатор ВКР-лазера непреобразованного излучения накачки. В частности, коэффициент заведения излучения трех ЛД увеличен до 75% за счёт использования специально изготовленного многомодового объединителя накачки и многомодового градиентного световода увеличенного диаметра (100 мкм). В результате дифференциальная эффективность ВКР-преобразования при длине световода 1,1 км достигла 84%, а максимальная выходная мощность лазера на 954 нм превысила 62 Вт на пороге генерации второй стоксовой компоненты. Для малых мощностей генерации (<13 Вт) наблюдалась нестабильность параметров, причиной которой является конкуренция поперечных мод, существенная вблизи порога генерации. При увеличении мощности наблюдается стабильная генерация устойчивой группы низших мод с параметрами, слабо зависящими от мощности: параметр качества пучка  $M^2=2,5-3,3$ , а ширина спектра генерации 0,2-0,4 нм. Продемонстрирована возможность увеличения эффективности селекции основной поперечной моды внутрирезонаторными ВБР, за счёт чего качество пучка ВКР-лазера было улучшено до 2,2-2,6 при сравнимой мощности и эффективности генерации на 954 нм. Показано, что возможно дальнейшее улучшение селективных свойств ВБР за счёт оптимизации формы ее поперечного профиля при разной фокусировке фемтосекундного излучения в центральной области многомодовой сердцевинки градиентного световода. Разработаны и реализованы внerezонаторные многомодовые ВБР, отражающие назад непреобразованное излучение накачки: установка на выходе лазера массива многомодовых высокоотражающих ВБР позволила уменьшить проходящую мощность накачки на 30-40% и соответственно уменьшить пороговую мощность с 120 до ~90 Вт. При этом мощность генерации (вдали от порога) также увеличивается на 20-40% при небольшом снижении дифференциальной эффективности.

Разработана технология записи волоконных длиннопериодных решёток (ДПР) и наклонных брэгговских решёток методом поперечного сканирования фс импульсами сердцевинки градиентного световода, исследованы их характеристики и влияние на порог генерации 2-го стоксова порядка в схеме волоконного ВКР-лазера с прямой диодной накачкой. Изготовлен образец наклонной ВБР в градиентном световоде (сердцевина 100 мкм) с амплитудой оболочечного резонанса -12 дБ и шириной около 10 нм, что сравнимо с шириной контура ВКР-усиления. Это позволяет получить желаемый эффект увеличения порога второй стоксовой компоненты на 996 нм, однако при этом наблюдается паразитное влияние брэгговских резонансов, отражающих в сердцевину высшие поперечные моды, что требует дальнейшей оптимизации характеристик наклонной ВБР.

Получена генерация на разных длинах волн в схеме полностью волоконного (с сердцевинкой 100 мкм) ВКР-лазера с прямой диодной накачкой, в том числе каскадная генерация 1 и 2 порядка, продемонстрирована возможность перестройки длины волны генерации от ~950 до ~1080 нм. В частности, реализована генерация ВКР-лазера с накачкой на 915 нм и перестройкой вблизи максимума усиления 1-го стоксова порядка в диапазоне 950-958 нм с выходной мощностью 55-65 Вт, а в ВКР-лазере с ВБР резонатором на 950 нм получена эффективная каскадная генерация 2-го стоксова порядка на 990 и 978 нм в открытом резонаторе с распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии

для этих длин волн. Мощность генерации на 978 нм составила около 15 Вт, а параметр качества пучка  $M^2=1,7-2$ , что заметно лучше, чем у первой стоксовой компоненты. Кроме того, получена генерация многомодового градиентного ВКР-лазера в полностью волоконной схеме с тандемной (каскадной) накачкой многомодовыми лазерными диодами на 976 нм и многомодовыми иттербиевыми волоконными лазерами на 1030 нм с выходной мощностью до 135 Вт на 1080 нм при абсолютной оптической эффективности 68%. Измеренный параметр качества пучка при максимальной мощности составил  $M^2=2,5$ , что также достигнуто за счёт применения специальных резонаторных ВБР, сформированных фемтосекундным излучением в центральной области многомодовой сердцевины градиентного световода. Полученная эффективность генерации и яркость пучка являются рекордными для ВКР-лазеров на основе многомодовых градиентных световодов.

Продемонстрирована возможность генерации второй гармоники (ГВГ) разработанного ВКР-лазера с прямой диодной накачкой на разных длинах волн в кристаллах PPLN с выходным излучением в синем диапазоне (477 и 489 нм). Мощность второй гармоники растет примерно квадратично с мощностью ВКР-лазера, т.е. небольшие изменения параметра качества пучка с ростом мощности принципиально не сказываются на режиме фокусировки, а ширина линии лазера не превышает ширины синхронизма кристалла, при этом значение эффективности ГВГ ( $\sim 0,0015$  1/Вт) примерно соответствует расчётному с учетом того, что излучение ВКР-лазера случайно поляризовано.

Разработана технология записи случайных брэгговских решёток и исследовано их влияние на ВКР генерацию на примере одномодового световода, проведено сравнение со случайной обратной связью на рэлеевском рассеянии. Массив из 57 ВБР со случайным набором фаз и амплитуд в пассивном волокне с сохранением поляризации при накачке иттербиевым волоконным лазером (1045 нм) обеспечивает линейно-поляризованную ВКР-генерацию мощностью до 5,7 Вт на длине волны 1092 нм с шириной линии  $< 0,08$  нм. В припороговом режиме ( $\sim 10$  мВт) получена одночастотная генерация с шириной  $< 100$  кГц (0,0004 пм). В отличие от случайного лазера на рэлеевском рассеянии, такой вариант ВКР-лазера позволяет получать линейно-поляризованную одночастотную генерацию, причем в относительно коротком световоде. Кроме того, показано, что в простой схеме случайного рэлеевского ВКР-лазера с одним широкополосным волоконным зеркалом Саньяка можно получать высокоэффективную каскадную ВКР-генерацию до 5 стоксова порядка с перестройкой в широком спектральном диапазоне. В германосиликатном световоде диапазон перестройки ограничен точкой нулевой дисперсии ( $\sim 1400$  нм), а для фосфоросиликатного световода, обладающего в 3 раза большей величиной стоксова сдвига, ее можно «проскочить» – получено до 9 Вт на 1515 нм. Также были исследованы новые схемы селекции продольных мод на основе волоконного отражательного интерферометра (ВОИ) с тонкой металлической пленкой. В волоконном лазере с полупроводниковым оптическим усилителем и ВОИ продемонстрирована одночастотная линейно-поляризованная генерация мощностью  $\sim 1$  мВт с шириной линии 217 кГц. Использование тонкой металлической пленки затрудняет его применение в мощных волоконных лазерах с накачкой многомодовыми лазерными диодами. Для преодоления данного недостатка была предложена и впервые реализована схема полностью дифракционного варианта ВОИ на основе диэлектрического рассеивателя. Результаты данной работы открывают перспективы для применения ВОИ для селекции мод в мощных волоконных лазерах.

Таким образом, все запланированные на данном этапе работы выполнены, при этом обнаружены новые эффекты и режимы генерации непрерывного волоконного ВКР-лазера с прямой диодной накачкой, которые будут исследованы вместе с ранее запланированными на следующий этап работами по исследованию импульсных схем ВКР-генерации, по которым также сделан хороший задел в отчетном году. Полученные за год результаты представлены в 21 докладах (из них 4 приглашенных, 12 устных и 5 стендовых) на ведущих международных конференциях в области оптики, фотоники и лазерной физики, и опубликованы в 1 монографии и 22 статьях, из них 12 - в высокорейтинговых журналах из баз Web of Science и Scopus, результаты проекта отражены в Интернете на странице лаборатории волоконной оптики ИАиЭ: <http://www.iae.nsk.su/index.php/ru/laboratory-sites/117>

## Публикации

1. S. Chekhovskoy, O. S. Sidelnikov, A. A. Reduyk, A. M. Rubenchik, O. V. Shtyrina, M. P. Fedoruk, S. K. Turitsyn, E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, S. A. Babin, K. Krupa, V. Couderc, A. Tonello, A. Barth'el'emy, G. Millot, and S. Wabnitz, "Nonlinear Waves in Multimode Fibers", chapter in book "Handbook of Optical Fibers", ed. by B. Malomed, Springer (in print).
2. S.A. Babin, E.A. Zlobina and S.I. Kablukov. Multimode fiber Raman lasers directly pumped by laser diodes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **24** (3), 1400310 (2018).
3. E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, A. A. Wolf, I. N. Nemov, A. V. Dostovalov, V. A. Tyrtysnyy, D. V. Myasnikov, S. A. Babin. Generating high-quality beam in a multimode LD-pumped all-fiber Raman laser. *Opt. Express* **25** (11), 12581-12587 (2017).
4. I. A. Lobach, S. I. Kablukov, and S. A. Babin. Linearly polarized cascaded Raman fiber laser with random distributed feedback operating beyond 1.5  $\mu\text{m}$ . *Opt. Lett.* **42**(18), 3526-3529 (2017).
5. I. A. Lobach, R. V. Drobyshev, A. A. Fotiadi, E. V. Podivilov, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Open-cavity fiber laser with distributed feedback based on externally or self-induced dynamic gratings. *Opt. Lett.* **42** (20), 4207-4210 (2017).
6. I. D. Vatnik, E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, and S. A. Babin. Multi-peak structure of generation spectrum of random distributed feedback fiber Raman lasers. *Opt. Express* **25** (3), 2703-2708 (2017)
7. M.I. Skvortsov, A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, A.A. Vlasov, V.A. Akulov, S.A. Babin. Distributed feedback fiber laser based on fiber Bragg grating inscribed by femtosecond point-by-point technique. *Las. Phys. Lett.* (in print)
8. A. V. Dostovalov, A. A. Wolf, E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, S. A. Babin. Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings in multimode graded index fiber. *Proc. SPIE*, vol.: 1009: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII, ed. by B. Neuenschwander, C. P. Grigoropoulos, T. Makimura, G. Račiukaitis, paper 100910L, 6 p. (2017).
9. S. A. Babin. Generation of chirped pulses at new wavelengths via Raman and FWM processes in fibers. *Advanced Photonics 2017 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, PS)*, paper IW1A.1, OSA Conf. Papers, 2017 (invited paper, WoS publication)

10. D. S. Kharenko, I. S. Zhdanov, A. E. Bednyakova, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, A. Apolonski, S. K. Turitsyn, S. A. Babin. All-fiber highly-chirped dissipative soliton generation in the telecom range. *Opt. Lett.* **42** (16), 3221-3224 (2017).
11. В.С. Терентьев, В.А. Симонов. Многолучевой волоконный отражательный интерферометр на основе полностью диэлектрической дифракционной структуры. *Квант. электроника* **47** (10), 971–976 (2017).
12. Я.В. Захаров, А.Г. Кузнецов, Е.В. Подивиллов, С.А. Бабин. Расчет и экспериментальная проверка коллиматора с керровской линзой для синхронизации мод волоконного лазера. *Квант. электроника* **47** (10), 882–886 (2017).
13. М.И. Скворцов, С.Р. Абдуллина, А.А. Власов, Е.А. Злобина, И.А. Лобач, В.С. Терентьев и С.А. Бабин. Волоконный ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью на основе массива волоконных брэгговских решеток. *Квант. электроника* **47** (8), 696–700 (2017).
14. Каблуков С.И., Злобина Е.А., Вольф А.А., Достовалов А.В., Немов И.Н., Бабин С.А. Динамика генерации ВКР-лазера на основе многомодового градиентного световода. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 25-26 (2017).
15. Подивиллов Е.В., Каблуков С.И., Бабин С.А., Лобач И.А., Дробышев Р.В., Фотиади А.А. Волоконный лазер с самоорганизующейся распределенной обратной связью на динамических решётках. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 37-38 (2017).
16. Е. В. Подивиллов, Д.С. Харенко, А. Е. Беднякова, М. П. Федорук, С. А. Бабин. Генерация спектрального комба чирпованных импульсов. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 49-50 (2017).
17. Злобина Е.А., Каблуков С.И., Вольф А.А., Немов И.Н., Достовалов А.В., Тыртышный В.А., Мясников Д.В., Бабин С.А. Полностью волоконный ВКР-лазер на основе градиентного световода с многомодовой диодной накачкой. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 51-52 (2017).
18. Скворцов М.И., Абдуллина С.Р., Власов А.А., Злобина Е.А., Ватник И.Д., Подивиллов Е.В., Бабин С.А. Исследование характеристик волоконного ВКР-лазера на основе массива брэгговских решеток. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 65-66 (2017).
19. Лобач И.А., Скворцов М.И., Каблуков С.И., Бабин С.А. Линейно-поляризованный волоконный ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью на основе фосфосиликатного световода *Фотон-экспресс*, № 6(142), 69-70 (2017).
20. А. А. Вольф, А. В. Достовалов, М. Ю. Котюшев, А. В. Парыгин, and С. А. Бабин. Фемтосекундная запись волоконных решеток показателя преломления методом поперечного сканирования сердцевины световода. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 125-127.
21. А. А. Вольф, С. С. Якушин, М. И. Скворцов, А. В. Достовалов, С. А. Бабин. Исследование влияния изгибных деформаций на фемтосекундные поточечные ВБР в многосердцевинном волоконном световоде. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 227-228 (2017).
22. Бударных А.Е., Лобач И.А., Каблуков С.И., Бабин С.А., Вельмискин В.В., Семёнов С.Л. Волоконный ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью на основе двухсердцевинного световода. *Фотон-экспресс*, № 6(142), 299-300 (2017).
23. Р.В. Дробышев, В.С. Терентьев, Ю.А. Тимиртдинов, И.А. Лобач, С.И. Каблуков. Широкополосный итербиевый волоконный лазер с модуляцией усиления. *Прикладная фотоника* **4**(1), 47-60 (2017).