

Оптимизация эффективности эрбиевого волоконного световода-конуса

М.М.Худяков, А.Е.Левченко, В.В.Вельмискин, К.К.Бобков, С.С.Алёшкина, М.М.Бубнов, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов, Л.В.Котов, М.Е.Лихачёв

Разработан конусный эрбиевый световод с накачкой по оболочке с рекордно большим для эрбиевых световодов диаметром сердцевины (100 мкм) и близким к дифракционно-ограниченному качеством формируемого пучка ($M^2 \sim 1.3$). Оптимизация параметров световода-конуса обеспечила высокую (18%) эффективность преобразования излучения накачки с длиной волны 976 нм в излучение сигнала на длине волны 1560 нм.

Ключевые слова: световод-конус, эрбиевый волоконный световод, большое поле моды.

1. Введение

Эрбиевые волоконные лазеры, излучающие в спектральной области вблизи 1.55 мкм, являются безопасными для глаз [1]. По этой причине они нашли широкое применение в задачах, требующих передачи излучения через атмосферу, например: определение скорости ветра с помощью доплеровского лидара (LIDAR, Light Detection and Ranging – обнаружение и определение дальности с помощью света) [2, 3], дифференциальное определение концентрации газов в атмосфере из космоса [4], космическая [5] и атмосферная связи. Для большинства описанных выше применений требуется высокое качество лазерного пучка и большая интенсивность излучения. Волоконные лазеры способны обеспечить дифракционно-ограниченное качество пучка выходного излучения, что в совокупности с широко развитой компонентной базой из-за высокой распространённости эрбиевых волоконных лазеров в телекоммуникации делает их одним из наиболее перспективных источников излучения для решения таких задач.

Однако достижение высокой интенсивности при хорошем качестве пучка – сложная техническая задача. Одним из наиболее распространённых способов её решения является использование волоконных световодов (ВС) с большим диаметром моды и двойной отражающей оболочкой [6, 7]. В таких ВС сердцевина имеет диаметр 30–35 мкм и является маломодовой (поддерживает малое число высших мод). Одномодовый режим работы в таких световодах достигается за счёт большего усиления фундаментальной моды и создания потерь для высших мод за счёт изгиба световода [8]. Важно отметить, что увеличение диаметра сердцевины световода приводит к росту нормированной частоты и уменьшению необходимого

для сохранения одномодовости диаметра изгиба. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению поля моды световода. Таким образом, применимость такого подхода ограничена [9].

Существует ряд методик, основанных на внесении в оболочку световода дополнительных элементов для резонансной перекачки высших мод из сердцевины световода [10–12]. Недостатком этих методов является резонансная природа взаимодействия высших мод сердцевины и мод включений. Это приводит к тому, что они оказываются эффективными для узкого диапазона длин волн. Накачка по сердцевине световода позволяет проводить селективное возбуждение и усиление только фундаментальной моды многомодового световода за счёт уменьшения перекрытия моды накачки с высшими модами сигнала [13]. Однако такие схемы лазеров и усилителей оказываются гораздо более громоздкими и имеют меньшую эффективность, чем схемы с накачкой по оболочке [14].

В спектральной области вблизи 1 мкм рекордные пиковые мощности в полностью волоконных усилителях при дифракционно-ограниченном качестве пучка выходного излучения были продемонстрированы с использованием конической геометрии световода [15]. Идея световода-конуса заключается в плавном увеличении диаметров сердцевины и оболочки по длине световода до величины, в несколько раз превышающей начальную. В тонком одномодовом конце происходит возбуждение фундаментальной моды, которая адиабатически распространяется в сторону толстого многомодового конца без перекачки энергии в высшие моды. Эрбиевые световоды-конусы также продемонстрировали рекордные или близкие к рекордным результаты пиковых мощностей для импульсов различной длительности [16–18], однако из-за высокой кластеризации дифференциальная эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение в таких световодах не превышала 3%–4%. Цель настоящей работы – оптимизация параметров эрбиевого световода-конуса для получения высокой эффективности.

2. Оптимизация конструкции конусного световода

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность эрбиевых световодов с накачкой по оболоч-

М.М.Худяков, А.Е.Левченко, В.В.Вельмискин, К.К.Бобков, С.С.Алёшкина, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачёв. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: DAngel.74@gmail.com

М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49
Л.В.Котов. James C. Wyant College of Optical Sciences, University of Arizona, 1630 E. University Blvd, AZ 85721-0094 Tucson, USA

является соотношением диаметра сердцевинки и диаметра первой отражающей оболочки. Чем больше данное соотношение, тем выше скорость поглощения накачки из оболочки и тем короче можно сделать активный световод, что приводит к снижению влияния концентрационных эффектов на полную эффективность. Максимальный размер сердцевинки световода ограничен требованием одномодового режима распространения света на тонком конце конусного световода. В рамках настоящей работы с целью снижения чувствительности к изгибу конусного световода (являлось проблемой при использовании предыдущей версии конусного световода [16–18]) была выбрана конструкция световода с апертурой 0.09. При такой апертуре, а также использовании W-профиля (депрессированное кольцо снаружи сердцевинки) возможна реализация одномодового режима работы вплоть до диаметра сердцевинки около 15–16 мкм. В то же время использование техники намотки тонкого конца световода на катушку малого диаметра [8] позволяет несколько увеличить максимальный диаметр сердцевинки световода, при которой возможно обеспечить одномодовый режим работы. Нами был выбран диаметр сердцевинки, равный приблизительно 18 мкм.

Вторым ограничением на максимальное соотношение диаметров сердцевинки и оболочки является требование обеспечить диаметр оболочки не менее 80 мкм, что необходимо для совместимости разрабатываемых световодов со стандартным оборудованием. Использование фторированной отражающей оболочки позволяет несколько уменьшить диаметр первой отражающей оболочки, состоящей из нелегированного кварцевого стекла. Для достижения минимально возможного диаметра первой оболочки нами разработана техника нанесения толстого слоя из фторированного кварцевого стекла на заготовку из нелегированного кварцевого стекла (отношение диаметров превышало 1.4). Это позволяет уменьшить диаметр первой оболочки до 57 мкм при внешнем диаметре фторированной оболочки, равном 80 мкм. Подобная оптимизация дала отношение диаметров сердцевинки и первой отражающей оболочки, равное 0.316.

Для выбора оптимальной концентрации ионов эрбия в сердцевине нами были проведены численные расчёты эффективности преобразования накачки в сигнал. При проведении расчётов была взята характерная зависимость диаметра конусного световода от его длины, полученная в предварительных экспериментах (минимальный диаметр равен 70 мкм, максимальный – 420 мкм, длина конусного световода – 3.6 м). Стоит отметить, что при накачке эрбиевого конусного световода через толстый конец необходимо учитывать эффект виньетирования. Данный эффект заключается в том, что при распространении накачки по сужающемуся световоду апертура пучка накачки растёт. Как следствие, эта апертура может превысить максимально допустимую апертуру, которую поддерживает первая отражающая оболочка световода, после чего накачка, имеющая углы распространения больше угла полного внутреннего отражения, высвечивается через боковой торец световода. В этом случае мы исходили из предположения, что накачка вводится по оси световода, а угловое распределение интенсивности излучения диода с номинальной апертурой 0.15 соответствует измеренному нами ранее в работе [19].

В настоящей работе в качестве стеклянной матрицы для легирования ионами эрбия использовалось алюмоси-

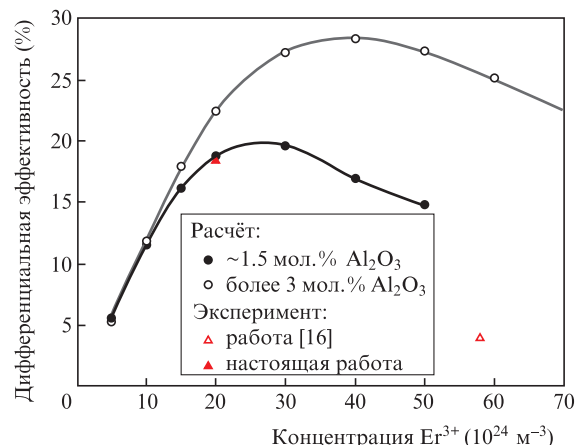


Рис. 1. Расчётная дифференциальная эффективность световода-конуса в зависимости от концентрации ионов Er^{3+} для алюмосиликатной матрицы с низкой и высокой концентрацией ионов эрбия и результаты измерения эффективности конусных световодов.

ликатное стекло с высокой концентрацией фтора [7]. Для такой матрицы зависимость кластеризации ионов эрбия от их концентрации не исследовалась, однако логично предположить, что данная зависимость будет находиться между зависимостями, полученными ранее для слаболегированных и высоколегированных оксидом алюминия стекол [14]. Обе зависимости были использованы в расчётах, результаты которых представлены на рис. 1.

Важно отметить, что эффективность преобразования накачки в сигнал в световоде, описанном в работах [16–18], составляла всего 3%–4%, при этом концентрация ионов эрбия соответствовала приблизительно $60 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Несмотря на то что этот световод имел фосфоалюмосиликатную матрицу сердцевинки, исходя из результатов работы [7] можно было ожидать, что его эффективность будет сравнима с эффективностью алюмосиликатных световодов, высоколегированных фтором. С учётом наших более ранних исследований разумно ожидать, что эффективность такого световода будет также в диапазоне эффективностей от слаболегированных до высоколегированных оксидом алюминия световодов. В то же время видно, что эффективность такого световода оказалась в несколько раз меньше расчётной. Мы полагаем, что в данном случае играет роль какой-то дополнительный фактор, снижающий эффективность работы световода. Например, это может быть существенно более высокая апертура излучения накачки, которая получается при вводе накачки через торец световода, отполированный под углом (в данном случае достаточно сложно точно проконтролировать соосность). В любом случае реализация такой же (либо большей) концентрации ионов эрбия в сердцевине кажется нецелесообразной с учётом низкой эффективности, которая наблюдалась в таком световоде. Исходя из результатов проведённых расчётов и измерений, оптимум концентрации ионов эрбия имеет смысл искать в области $(20–30) \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Действительно, при меньших концентрациях ионов эрбия само поглощение из оболочки становится достаточно малым, и эффективность относительно введённой накачки неизбежно снижается. Кроме того, увеличивающаяся доля непоглощённой накачки в данном случае может приводить к повреждению конусного перехода в месте высвечивания излучения накачки [20].

3. Изготовление эрбиевых конусных световодов

Заготовка световода-конуса была создана при помощи MCVD-метода, модифицированного для внесения всех легирующих добавок из газовой фазы. Сердцевина имела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-F-SiO}_2$ -матрицу с содержанием алюминия и фтора, аналогичным реализованному в работе [7]. Световод был легирован ионами Er^{3+} с концентрацией $20 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Сердцевина имела апертуру около 0.09. Для улучшения перекрытия оболочечных мод излучения накачки с модами сердцевины заготовка была отполирована до формы, близкой к квадратной, а затем покрыта слоем фторированного кварцевого стекла. Средние диаметры сердцевины, первой отражающей оболочки и внешнего диаметра составляли 17.8/56.9/80 мкм. Из заготовок был вытянут конусный световод длиной около 3.5 м с внешним диаметром от 67 до 420 мкм. Типичная зависимость внешнего диаметра от позиции вдоль световода показана на рис.2. Фотография торца световода со стороны толстого конца, а также оценочный профиль показателя преломления (полученный на основании измерения профиля в световоде диаметром 125 мкм и масштабированный для случая толстого конца) приведены на рис.3.

Согласно расчётам при внешнем диаметре 67 мкм длина волны отсечки первой высшей моды составляет 1540 нм,

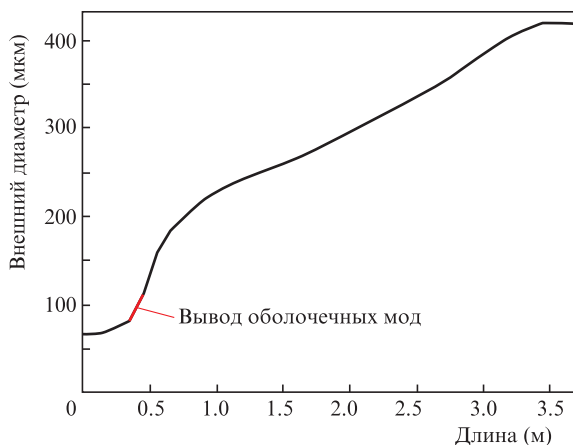


Рис.2. Распределение внешнего диаметра световода-конуса по его длине. Красным отмечен участок световода, на котором создано устройство вывода оболочечных мод.

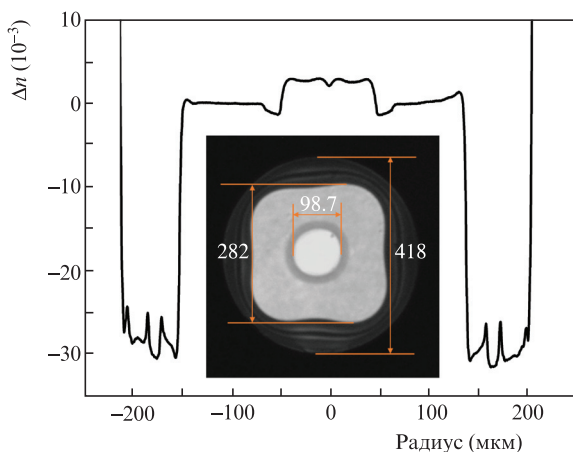


Рис.3. Профиль изменения показателя преломления и фотография торца толстого конца изготовленного конусного световода.

а расчётный диаметр поля моды — около 14.5 мкм. Со стороны толстого конца диаметр поля моды, рассчитанный по профилю показателя преломления, равен 56 мкм.

4. Результаты и их обсуждение

Созданный конусный световод был исследован в схеме усилителя со встречной накачкой, показанной на рис.4. Излучение от источника с центральной длиной волны 1560 нм вводилось в тонкий конец исследуемого конусного волоконного световода. Излучение накачки, стабилизированное при помощи объёмных брэгговских решёток на длине волны 976 нм, вводилось через толстый конец конусного световода навстречу сигналу. Усиленный сигнал на выходе из толстого конца конусного световода отделялся от излучения накачки посредством дихроичного зеркала (ДЗ) и затем анализировался.

В первую очередь при помощи инфракрасной камеры наблюдалось изображение выходного пучка. Следует отметить, что качество выходного излучения оставалось относительно низким (содержало высшие моды) до тех пор, пока на расстоянии около 40 см от входного конца (положение показано красным отрезком на рис.2) не был добавлен фильтр оболочечных мод (в данной области фторированное покрытие было удалено и заменено полимерным покрытием с показателем преломления выше такового для кварцевого стекла, УВОМ на рис.4). Мы полагаем, что из-за большого отношения диаметров сердцевины и первой отражающей оболочки оболочечные моды, возбуждаемые при сварке подводящего излучения световода и тонкого конца конусного световода, имели высокое перекрытие с сердцевиной световода и при увеличении диаметра сердцевины возбуждали высшие моды (когда диаметр сердцевины становился достаточным для их распространения именно в сердцеvine). Созданный фильтр оболочечных мод удалял нежелательное излучение из оболочки и обеспечивал существенное улучшение качества выходного излучения в конусном световоде (см. вставку на рис.5,а).

Эффективность преобразования накачки в сигнал для исследуемого конусного световода составила приблизительно 18% (рис.5,а), что примерно в пять раз превышает эффективность, полученную в эрбиевом конусном световоде [16–18]. Максимальная эффективность была достигнута при входном сигнале около 250 мВт (рис.5,б). Величина эффективности и зависимость выходной мощности от входной хорошо согласуются с расчётами, выполненными для случая алюмосиликатной стеклянной матрицы с низким содержанием оксида алюминия.

Следует отметить, что оценённый по изображению на камере (см. вставку на рис.5,а) диаметр поля моды со стороны толстого конца составил около 40 мкм. Мы полагаем, что в данном случае наблюдается эффект уменьшения площади моды, возникающий при изгибе световода и существенно усиленный наличием центрального провала в

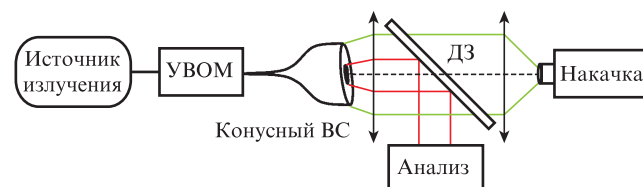


Рис.4. Схема волоконного усилителя на основе световода-конуса.

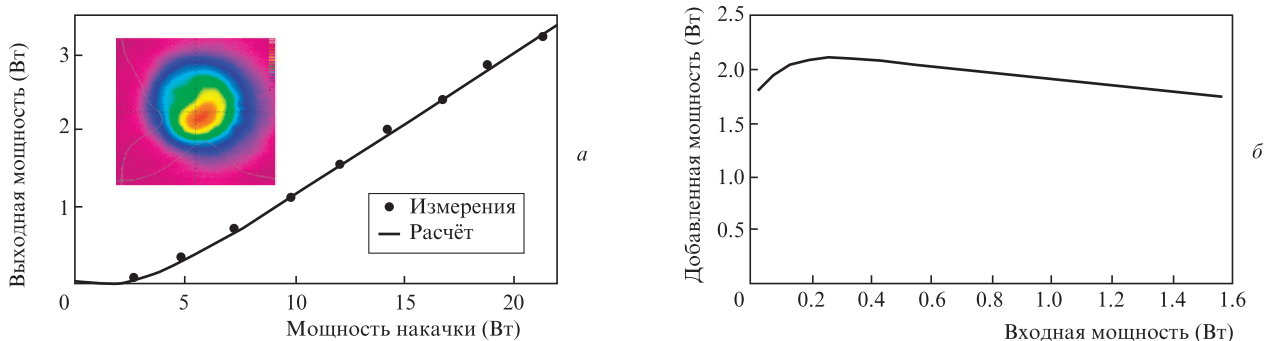


Рис.5. Зависимость выходной мощности сигнала от входной мощности накачки при входной мощности сигнала 0.36 Вт (а) (на вставке – изображение моды на выходе конусного световода, полученное при помощи инфракрасной камеры) и зависимость добавленной мощности сигнала (выходная мощность за вычетом входной) от входной мощности сигнала (б).

профиле показателя преломления (при изгибе центральный провал «выдавливает» излучение из центра к краю световода). В пользу этого предположения говорит искажение моды, которая как будто смещена к одному из краев сердцевинки. Стоит также подчеркнуть, что данное искажение не является следствием присутствия высших мод. Так, измерение качества выходного пучка показало, что величина M^2 равна 1.31–1.34 (см. рис.6,а), что с учётом отличия формы фундаментальной моды от гауссово

служит признаком одномодового режима распространения излучения.

Более точным способом определения модового состава световода является так называемый метод S^2 [21], который позволяет восстановить пространственные распределения фазы и интенсивности мод, распространяющихся в световоде, а также определить их долю мощности (рис.6,б–г). Результаты этих измерений показали наличие качественного одномодового режима распространения

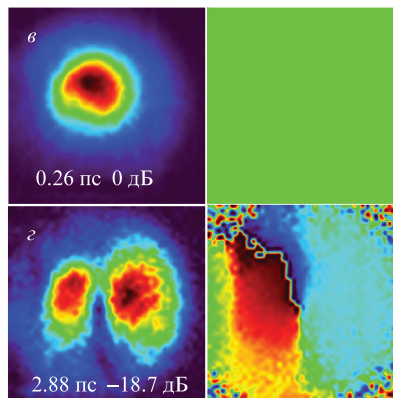
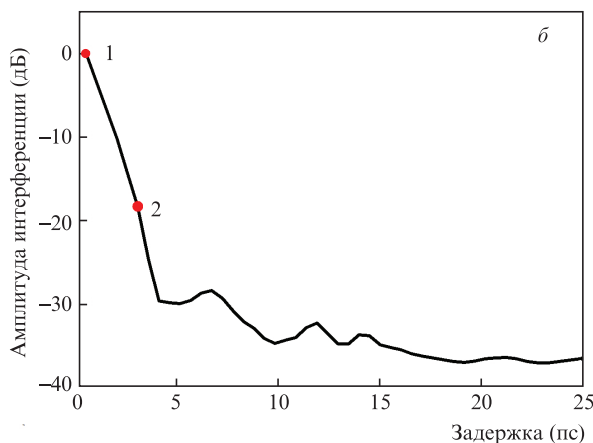
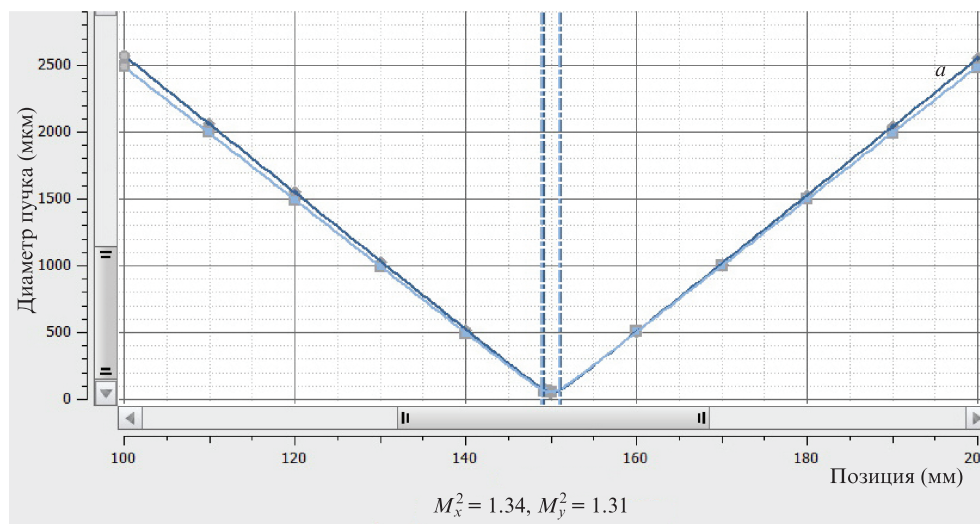


Рис.6. Результаты измерения параметра качества пучка M^2 при максимальной выходной мощности излучения (а) и S^2 -измерения [21] в конусном световоде (б), а также распределения амплитуды (слева, шкала от 0 до 1) и фазы (справа, шкала от $-\pi$ до π) для точек 1 (в) и 2 (г) на S^2 -графике.

излучения в конусном световоде, а также позволили установить, что примесь высших мод не превышает 2%, – видно, что пик, характерный для первой высшей моды (то, что это мода LP₁₁, следует из распределений амплитуды и фазы на рис.6,з), не превышает 18 дБ от уровня мощности фундаментальной моды.

5. Заключение

Проведённые исследования впервые показали возможность достижения высокой эффективности преобразования накачки в сигнал (около 18%) в эрбиевых конусных световодах, не содержащих иттербий. Достичь такой эффективности удалось благодаря оптимизации геометрии самого световода (в первую очередь отношения диаметров сердцевин и оболочек), а также за счёт выбора оптимальной концентрации ионов эрбия в сердцевине световода. Помимо этого, в рамках настоящей работы впервые удалось реализовать эрбиевый конусный световод с рекордно большим диаметром сердцевин (около 100 мкм) и высоким, ограниченным только дифракцией, качеством пучка. Стоит отметить, что итоговый диаметр поля моды оказался несколько меньше расчётного, что мы связываем с наличием на оси световода центрального провала, который при изгибах конусного световода существенно искажает форму выходной моды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в форме гранта № 075-15-2020-912 на создание и развитие научного центра мирового уровня «Центр фотоники» (проект № 13/50).

- Jelínková H., Pašta J., Šulc J., Němec M., Koranda P. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 603 (2005).
- Pichugina Y.L., Banta R.M., Brewer W.A., Sandberg S.P., Hardesty R.M. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **51**, 327 (2012).
- Kotov L.V., Töws A., Kurtz A., Bobkov K.K., Aleshkina S.S., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M.E. *Proc. SPIE*, **9728**, 97282U (2016).
- Abshire J.B., Riris H., Allan G.R., Weaver C.J., Mao J., Sun X., Hasselbrack W.E., Yu A., Amediek A., Choi Y., Browell E.V. *Proc. SPIE*, **7832**, 78320D (2010).
- Cornwell D. *Opt. Photonics News*, **27**, 24 (2016).
- Котов Л.В., Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., Муравьев С.В., Андрианов А.В., Бубнов М.М., Игнатъев А.Д., Липатов Д.С., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е., Ким А.В. *Квантовая электроника*, **44**, 458 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 458 (2014)].
- Khudyakov M.M., Yashkov M.V., Lipatov D.S., Abramov A.N., Vechkanov N.N., Bubnov M.M., Bobkov K.K., Guryanov A.N., Likhachev M.E. *Laser Phys. Lett.*, **17**, 015101 (2020).
- Koplow J.P., Kliner D.A.V., Goldberg L. *Opt. Photonics News*, **11**, 21 (2000).
- Fini J.M. *Opt. Express*, **14**, 69 (2006).
- Aleshkina S.S., Kochergina T.A., Velmiskin V.V., Bobkov K.K., Bubnov M.M., Yashkov M.V., Lipatov D.S., Salganskii M.Y., Guryanov A.N., Likhachev M.E. *Sci. Rep.*, **10**, 1 (2020).
- Jain D., Alam S., Jung Y., Barua P., Velazquez M.N., Sahu J.K. *Opt. Express*, **23**, 28282 (2015).
- Dong L., Wu T.W., McKay H.A., Fu L., Li J., Winful H.G. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 47 (2009).
- Jasapara J.C., Andrejco M.J., Desantolo A., Yablon A.D., Várallyay Z., Nicholson J.W., Fini J.M., Digiovanni D.J., Headley C., Monberg E., Dimarcello F.V. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 3 (2009).
- Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Lhermite J., Février S., Cormier E. *Opt. Lett.*, **38**, 2230 (2013).
- Bobkov K., Andrianov A., Koptev M., Muravyev S., Levchenko A., Velmiskin V., Aleshkina S., Semjonov S., Lipatov D., Guryanov A., Kim A., Likhachev M. *Opt. Express*, **25**, 26958 (2017).
- Андрианов А.В., Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., Муравьев С.В., Ким А.В., Липатов Д.С., Вельмискин В.В., Левченко А.Е., Бубнов М.М., Лихачев М.Е. *Квантовая электроника*, **49**, 1093 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1093 (2019)].
- Khudyakov M.M., Levchenko A.E., Velmiskin V.V., Bobkov K.K., Lipatov D.S. *Proc. Photoptics (Funchal, Madeira, Portugal, 2018)*, pp 105–109. DOI:10.5220/0006715701050109.
- Khudyakov M.M., Levchenko A.E., Velmiskin V.V., Bobkov K.K., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Bubnov M.M., Likhachev M.E. *Proc. Int. Conf. Laser Optics (St.Petersburg, Russia, 2018)*, p. 13. DOI:10.1109/LO.2018.8435243.
- Kotov L.V., Aleshkina S.S., Khudyakov M.M., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Gur'yanov A.N., Likhachev M.M. *J. Lightwave Technol.*, **35**, 4540 (2017).
- Bobkov K., Levchenko A., Kashaykina T., Aleshkina S., Bubnov M., Lipatov D., Laptev A., Guryanov A., Leventoux Y., Granger G., Coudere V., Février S., Likhachev M. *Opt. Express*, **29**, 1722 (2021).
- Nicholson J.W., Yablon A.D., Fini J.M., Mermelstein M.D. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 61 (2009).