УДК 681.7.068.069

Е.И. Донцова, И.А. Лобач, А.В. Достовалов, С.И. КаблуковИнститут автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В СВЕТОВОДАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ НАВЕДЕННОЙ КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Исследована генерация второй гармоники (ГВГ) в полностью волоконной схеме с накачкой непрерывным иттербиевым лазером в много- и одночастотном режимах. В качестве нелинейной среды для преобразования частоты использованы световоды с периодически наведенной квадратичной нелинейностью (СПНКН). Показана зависимость формы кривых синхронизма от поляризации излучения на основной частоте. В однопроходной схеме продемонстрирована ГВГ с полным коэффициентом квадратичной нелинейности $\approx 10^{-3}$ %/Вт на ≈ 515 нм. С помощью волоконного иттербиевого лазера с пассивным сканированием частоты показана зависимость кривых квазисинхронизма от поляризации основного излучения.

Ключевые слова: волоконный лазер, нелинейная волоконная оптика, генерация второй гармоники, волокно с периодически наведенной нелинейностью, квазисинхронизм.

E.I. Dontsova, I.A. Lobach, A.V. Dostovalov, S.I. KablukovInstitute of Automation and Electrometry of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

POLARIZATION FEATURES OF SECOND HARMONIC GENERATION IN PERIODICALLY POLED SILICA FIBERS

Polarization features of second harmonic generation (SHG) are investigated in all-fiber configuration with continuous-wave ytterbium-doped fiber laser operating in multi- and single-mode regimes. Periodically poled silica fibers (PPSF) are used as nonlinear materials for frequency conversion. Quasi-phase matching (QPM) curves shape dependence on fundamental wave polarization is shown. SHG in single-pass configuration is demonstrated with quadratic nonlinear coefficient of $\sim 10^{-3}$ %/W at ~ 515 nm. Dependence of QPM curves on fundamental radiation polarization is demonstrated with a passive frequency sweeping ytterbium fiber laser.

Keywords: fiber laser, nonlinear fiber optics, second harmonic generation, periodically poled silica fiber, quasi-phase-matching.

Введение

Волоконные лазерные системы зарекомендовали себя как стабильные компактные источники лазерного излучения, работающие в различных диапазонах длин волн. Как правило, полностью волоконные лазеры с активной средой на редкоземельных элементах или волоконные лазеры, работающие на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), генерируют излучение инфракрасного диапазона длин волн. Для работы в других областях спектра зачастую используются нелинейные кристаллы, в которых осуществляется преобразование частоты излучения. В частности, генерация второй гармоники позволяет получить излучение видимого диапазона с хорошей эффективностью. Для нелинейного преобразования излучения волоконных лазеров используются как традиционные кристаллы КТР и LBO, так и кристаллы с регулярной доменной структурой (РДС) (с периодически ориентированными доменами), PPLN, PPKTP. При этом эффективность преобразования излучения во вторую гармонику выше для периодически ориентированных кристаллов [1, 2].

Однако оптическая схема для удвоения частоты излучения волоконного лазера в кристалле обладает рядом недостатков. Во-первых, при выходе излучения из волокна и прохождении через объемную оптику часть излучения теряется. Во-вторых, необходимы оптические элементы со специальными просветляющими покрытиями для выбранного диапазона длин волн. В-третьих, объемная оптическая часть требует периодических юстировок элементов для сохранения настройки по углу синхронизма и оптимальной фокусировки в кристалл.

Перечисленных недостатков при ГВГ можно избежать, если использовать полностью волоконную схему, основанную на оптическом световоде с периодически наведенной квадратичной нелинейностью. Квадратичная нелинейность $\chi^{(2)}$ создается в кварцевом световоде методом термического полинга, а условие фазового квазисинхронизма, необходимое для эффективной ГВГ, выполняется благодаря периодической модуляции $\chi^{(2)}(z)$ вдоль длины световода [3]. При этом период пространственной модуляции $\chi^{(2)}$ определяет длину волны накачки, которая эффективно преобразуется во вторую гармонику. Несмотря на низкий коэффициент нелинейности в СПНКН ($\chi^{(2)} \approx 0,1\text{--}0,3$ пм/В) по сравнению с кристаллами, внутриволоконное удвоение частоты является перспективным направлением благодаря большой длине взаимо-

действия и возможности интеграции структуры в волоконную схему [4–6].

Эффективное удвоение частоты волоконных лазерных источников в СПНKH было продемонстрировано в импульсном режиме работы лазера накачки [5–7]. Однако для ряда применений необходимы компактные источники видимого диапазона с небольшой мощностью и непрерывным излучением. Удвоение частоты непрерывного излучения в СПНKH было представлено только в одной работе [8]: исследовался лазер, генерирующий в желтом диапазоне спектра при удвоении частоты излучения висмутового лазера с узким спектром $\approx 0,1$ нм. Максимальная эффективность составляла $1,4 \cdot 10^{-2}$ %. Однако для ряда биомедицинских применений большой интерес представляют компактные и стабильные непрерывные источники сине-зеленого излучения, работающие как в многочастотном, так и одночастотном режимах. Так, зеленые волоконные лазеры с преобразованием частоты в нелинейных кристаллах, например [9], успешно применялись в биомедицинских исследованиях, в частности в проточной цитометрии [10].

Целью данной работы является создание и исследование полностью волоконного источника сине-зеленого излучения на основе ГВГ-излучения непрерывного иттербиевого лазера. Удвоение частоты исследовалось как в многочастотном, так и в одночастотном режимах. Подробно были исследованы поляризационные особенности ГВГ в СПНKH.

1. Изготовление образцов волокон с периодически наведенной квадратичной нелинейностью

Работы по созданию нелинейных световодов для преобразования частоты во вторую гармонику распространяющегося по ним излучения проводились в последние годы в разных группах. В [3] подробно описаны два метода наведения периодической нелинейности в волокне, один из которых – термический полинг – применялся при создании образцов для наших экспериментов. Методика сводится к использованию специально изготовленных германосиликатных световодов с двумя полыми продольными отверстиями в оболочке, в которые могут заводиться металлические электроды. Схема световода приведена на рис. 1. На электроды подается напряжение в ≈ 8 –9 кВ. Подача напряжения сопровождается отдельным нагревом образца до температуры поряд-

ка 200 °С, что способствует увеличению подвижности зарядов в материале. После охлаждения образца и снятия внешнего поля в световоде фиксируется распределение зарядов, создающее в области сердцевины сильное электрическое поле. Таким образом, в световоде создается квадратичная нелинейность $\chi^{(2)}$.

Рис. 1. Световод для создания образца с периодической нелинейной структурой

Посредством ультрафиолетового излучения наведенное поле стирается через равные пространственные промежутки вдоль длины световода [11] с образованием периодической структуры, в которой участки с «записанным» направлением поля и без него (+/0) чередуются аналогично РДС-кристаллу с переменным направлением поля от домена к домену (+/-). Таким образом, получается образец световода с периодически наведенной квадратичной нелинейностью.

Период нелинейной структуры определяет длину волны накачки, при которой эффективность ГВГ максимальна, а длина нелинейной структуры задает спектральную ширину квазисинхронизма. Как и в обычном периодическом кристалле, в таком волокне для ГВГ должны выполняться условия квазисинхронизма для заданной длины волны, при которых обобщенная волновая расстройка Δk равна нулю:

$$\Delta k = k_2 - 2k_1 - K_m = 0,$$

где $k_i = 2\pi n_i / \lambda_i$ – волновой вектор; n_i – показатель преломления; λ_i – длина волны i -й гармоники; $K_m = 2\pi m / \Lambda$ – волновой вектор среды с квадратичной нелинейностью и периодом Λ , где m – порядок квазисинхронизма.

Для наших экспериментов были изготовлены образцы для ГВГ 1030 нм $\rightarrow$ 515 нм с квазисинхронизмом первого порядка, поскольку известно, что в этом случае эффективность преобразования максимальна.

2. ГВГ много- и одночастотного излучения в однопроходной схеме

Для первых экспериментов по ГВГ иттербиевого волоконного лазера был взят образец СПНKH-1 длиной ≈ 21 см, с периодом нелинейной структуры $\Lambda \approx 37,7$ мкм и диаметром сердцевины 8 мкм, изготовленный на основе волокна FORC-6 (диаметры отверстий под электроды ≈ 50 мкм, расстояние между отверстиями для электродов ≈ 30 мкм, расстояние от края сердцевины до края ближайшего отверстия $\approx 5,5$ мкм). Длина волны синхронизма для изготовленного образца составила $\approx 1030,5$ нм. Для накачки использовался перестраиваемый многочастотный волоконный иттербиевый лазер, генерирующий излучение со случайной поляризацией на длине волны ≈ 1030 нм. Многочастотный лазер собран в линейной схеме резонатора. Схема эксперимента по ГВГ приведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема установки для удвоения частоты лазерного излучения в СПНKH и вид сечения СПНKH (вставка)

Излучение лазера заводилось в СПНKH с волоконным контроллером поляризации. Данная схема позволяет менять лазерный источник на основной частоте и в случае необходимости подстраивать поляризацию на входе в образец, поскольку в обычном волокне поляризация при распространении излучения не сохраняется. Подстраивая поляризацию излучения на основной частоте, удастся настроиться на

максимум мощности второй гармоники. Максимальная мощность генерации непрерывного многочастотного иттербиевого лазера составила ≈ 4 Вт. Выходным спектрально-селективным ответвителем излучение первой и второй гармоник разделялось на два канала и направлялось на измерители мощности. На вставке рис. 2 также представлено сечение образца СПНKN и направление осей относительно отверстий в волокне. Отметим, что при записи структуры направление внешнего электрического поля совпадает с осью X . Спектр источника многочастотного излучения на основной частоте измерялся анализатором оптического спектра (АОС) Yokogawa AQ6370. Ширина спектра генерации многочастотного лазера составляла $< 0,025$ нм, величина близка к ширине аппаратной функции АОС.

Образец СПНKN помещается в термостат для стабилизации температуры и настройки на длину волны синхронизма. Длина волны квазисинхронизма связана с температурой образца, причем дисперсионная зависимость от температуры имеет линейный характер. При охлаждении образца СПНKN-1 наблюдается смещение квазисинхронизма в коротковолновую область (рис. 3, *а*). При изменении температуры на 1°C длина волны квазисинхронизма изменяется на $\approx 0,027$ нм. Температурные кривые синхронизма на рис. 3, *б* были получены при перестройке длины волны многочастотного ИК-лазера. Перестройка осуществлялась за счет изменения температуры волоконной брэгговской решетки с малым шагом, обеспечивающим плавную форму кривых синхронизма.

Рис. 3. Связь температуры СПНKN-1 с длиной волны квазисинхронизма (*а*) и нормированные кривые температурного синхронизма при $T_{\text{ВПНН}} = +1, -3^\circ\text{C}$ (круги и треугольники соответственно) (*б*)

В том же образце СПНКТ исследовалась ГВГ с одночастотным поляризованным излучением волоконного иттербиевого лазера, выполненного по схеме «задающий генератор – усилитель мощности». Задающий одночастотный лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер) выполнен на волокне, легированном ионами иттербия, в котором была записана волоконная брэгговская решетка (ВБР) с фазовым сдвигом. Аналогичная схема лазера описана в работе [12]. Мощность одночастотного источника достигала 1 Вт. Сравнение эффективности преобразования частоты одночастотного и многочастотного излучения в исследуемом образце СПНКТ представлено на рис. 4. Отметим, что излучение многочастотного источника имеет случайную поляризацию. Измерения проводились при одном положении контроллера поляризации (см. рис. 1), без подстроек в разных точках измерения. По измеренным данным не наблюдается различия формы кривой синхронизма одночастотного поляризованного и многочастотного неполяризованного излучения, что может быть связано с низким уровнем генерируемой мощности второй гармоники. Кроме того, возможно, излучение многочастотного источника на входе в образец было случайным образом частично поляризовано.

Рис. 4. Полный коэффициент квадратичной нелинейности для одночастотного поляризованного и многочастотного неполяризованного излучения лазеров

Сравнение эффективности ГВГ в нелинейных кристаллах для одно- и многочастотного режимов проводилось еще в 60-х годах XX века. Было показано, что без учета дисперсии удвоение частоты много-

модового излучения со случайными фазами дает двукратное увеличение мощности второй гармоники [13]. Следует отметить, что сравнение с предсказанием теории в данном случае не является простой задачей. Если бы ГВГ осуществлялась в нелинейном кристалле, то можно было бы проделать следующую процедуру: поскольку излучение многочастотного лазера не поляризовано, то для сравнения полного коэффициента квадратичной нелинейности можно учесть два возможных направления поляризации лазера, тогда в соотношении P_2/P_1^2 мощность основного излучения уменьшится в 2 раза и станет $P_2/2$, а кривая, построенная кружками, вырастет в 4 раза. На самом деле такое искусственное увеличение коэффициента квадратичной нелинейности не вполне оправдано, поскольку для излучения иттербиевого лазера со случайной поляризацией возможно выполнение нескольких различных типов квазисинхронизма для ГВГ, зависящих от поляризации. Подробнее вопрос о типах квазисинхронизма будет рассмотрен ниже.

3. Кривые синхронизма и оптимизация ГВГ с линейно-поляризованным излучением

Для повышения эффективности преобразования частоты излучения во вторую гармонику был изготовлен еще один образец СПНКН-2. При этом благодаря оптимизации условий температурного «полинга» удалось повысить квадратичную нелинейную восприимчивость до $\chi^{(2)} \approx 0,06$ пм/В, что примерно в 2 раза выше, чем для образца СПНКН-1. Длина второго образца составила 25 см, диаметр сердцевины волокна равен 6 мкм. Максимум синхронизма при комнатной температуре, в отличие от первого образца, достигается вблизи 1029,1 нм. С СПНКН-2 были детально изучены как поляризационные, так и спектральные свойства ГВГ. Для этого в схему перед контроллером поляризации был добавлен волоконный ответвитель, разделяющий основное излучение в соотношении 50/50 %, и волоконный поляризатор. Кроме того, проводилось сравнение ГВ-лазера с линейно-поляризованным излучением, самосканированием частоты и узкой линией генерации <100 МГц, описанного в работе [14], и одночастотного лазера, упоминавшегося выше.

Сначала ГВГ в СПНКН-2 изучалась с помощью неполяризованного многочастотного волоконного лазера. Зависимость мощности вто-

рой гармоники от мощности излучения на основной частоте имеет квадратичный вид и представлена на рис. 5, а. Затем в схему перед СПНKH-2 был вставлен волоконный поляризатор и также были измерены мощностные и спектральные характеристики. В рабочем диапазоне длин волн положение главного максимума эффективности преобразования во вторую гармонику отличалось. На рис. 5, б представлено сравнение полного коэффициента квадратичной нелинейности, вычисленного как P_2/P_1^2 , при перестройке длины волны основного излучения. Следует отметить, что для сравнения кривых синхронизма для поляризованного и неполяризованного основного излучения выбирались данные при одинаковой мощности на входе в нелинейный образец для удвоения частоты (≈ 1 Вт), однако мощность самого иттербиевого лазера при этом была различна. При переходе к поляризованному режиму (рис. 5, б) левая часть огибающей кривой совпадает со случаем удвоения частоты неполяризованного излучения, однако правый максимум имеет меньшую амплитуду. Для более детального изучения поляризационных особенностей аналогичные измерения в дальнейшем проводились для одночастотного лазера и лазера с самосканированием частоты.

Рис. 5. Мощность второй гармоники в зависимости от мощности накачки на 1029,3 нм (а) и кривые синхронизма с поляризованным и неполяризованным излучением основной частоты (б)

Сложная форма кривой синхронизма по длине волны связана с поляризационными особенностями при удвоении частоты внутри волокна. В работе [15] было показано, что в зависимости от поляризации волн основной и второй гармоники изменяются длина волны синхро-

низма и эффективность генерации. Измерения при разных состояниях поляризации излучения позволили прописать несколько кривых, представленных на рис. 6, *а*, *б*. Точками обозначены данные, полученные с одночастотным РОС-лазером в схеме, как на рис. 2 (круги – с подстройкой поляризации контроллером в каждой точке, треугольники – с одной настройкой), линии – более детальные измерения с помощью самосканирующего лазера (рис. 6, *а*). В качестве детектора использовалась измерительная головка от поляриметра Thorlabs Polarization Analyzing System PAX 5710 с большим динамическим диапазоном. Самосканирующий лазер в оптимальном режиме генерирует последовательность микросекундных импульсов с перескоком частоты при генерации каждого последующего импульса на один межмодовый интервал ≈ 10 МГц [14]. Относительно невысокое быстродействие фотоприемника приводило к тому, что импульсы интегрировались, и наблюдался почти непрерывный сигнал. С учетом скорости работы фотоприемника и скорости самосканирования частоты лазера итоговое спектральное разрешение составило около 0,01 нм. Привязка к длине волны производилась по анализатору лазерных спектров (LSA, HighFines/Angstrom) с точностью $< 0,02$ нм. Кривые квазисинхронизма измерялись при различных состояниях контроллера поляризации, установленного на выходе лазера с самосканированием частоты (см. рис. 2). Кроме того, проводились измерения при заведении излучения с противоположной стороны образца СПНКН-2, но принципиальных различий при этом не было обнаружено. Как видно из рис. 6, *а*, положение точек, измеренных с помощью одночастотного лазера и подстройкой поляризации на максимум мощности второй гармоники в каждой точке, близко к положению огибающей, которую можно провести для серии линий, измеренный с помощью лазера с самосканированием частоты при нескольких фиксированных положениях контроллера поляризации. Таким образом, измерения кривых синхронизма с разными источниками согласуются между собой, и можно отметить существование близких по амплитуде максимумов на длинах волн 1029,15 и 1029,27 нм. Напомним, что с образцом СПНКН-1 с меньшей квадратичной нелинейностью наблюдался лишь один максимум близкой ширины, что свидетельствует о полном перекрытии резонансов для разных типов квазисинхронизма (см. рис. 4).

a

б

Рис. 6. Кривые синхронизма для разных поляризаций, прописанные обычным одно-частотным (точки) и самосканирующим лазерами (линии) (*a*), и аналогичные кривые с большим динамическим диапазоном для самосканирующего лазера (*б*)

Кривые квазисинхронизма, полученные с помощью самосканирующего лазера, представлены на рис. 6, *б* в логарифмическом масштабе. На всех линиях видна модуляция с периодом около 0,085 нм. Наличие нескольких различных кривых квазисинхронизма и разное положение максимумов при ГВГ в нелинейном образце объясняется зависимостью процесса удвоения частоты от поляризации взаимодействующих волн [15]. В процессе ГВГ могут участвовать волны основной частоты с одинаковыми либо различными поляризациями. Кроме

того, волна второй гармоники также имеет два возможных направления поляризации. Существуют два типа квазисинхронизма при удвоении частоты: с различным и одинаковым направлением поляризаций взаимодействующих волн основного излучения. При этом в СПНKH возможны три вида взаимодействий с эффективностью ГВГ, отличной от нуля. Если обозначить поляризационные оси как X и Y (в соответствии со вставкой к рис. 2), то эти взаимодействия можно описать как $Y + Y \rightarrow X$, $X + X \rightarrow X$ и $X + Y \rightarrow Y$. Максимумы синхронизма при разных видах взаимодействия будут отличаться друг от друга по положению из-за двулучепреломления и по амплитуде из-за зависимости тензора $\chi^{(2)}$ от поляризации. В работе [15] показано, что амплитуды при взаимодействиях $Y + Y \rightarrow X : X + X \rightarrow X : X + Y \rightarrow Y$ должны соотноситься как $\approx 1 : 9 : 4$ соответственно.

Двулучепреломление в СПНKH зависит от его геометрии и возникающих напряжений в направлении осей X и Y . В связи с этим для разных образцов положение максимумов второй гармоники и их очередность могут отличаться. В нашем случае основные резонансы кривых квазисинхронизма для разных поляризаций перекрываются друг другом, но достаточно различимы на рис. 6, *а*, *б*. Разница используемых нами и в [15] образцов (диаметр сердцевины, удаленность воздушных отверстий для электродов) обуславливает разное двулучепреломление в них, следовательно, различное положение максимумов квазисинхронизма.

Заключение

В работе проведено исследование удвоения частоты ряда непрерывных волоконных иттербиевых лазеров непосредственно внутри волоконного световода с периодически наведенной квадратичной нелинейностью. Применение лазера с пассивным сканированием частоты позволило наглядно показать зависимость формы и положения кривых квазисинхронизма от поляризации излучения на основной частоте, что является следствием наличия нескольких типов квазисинхронизма в волоконных световодах, выполняющихся на близких длинах волн. Кривые квазисинхронизма могут как перекрываться между собой, так и быть разнесены по частоте. В экспериментах полный коэффициент квадратичной нелинейности с лучшим образцом в максимуме ГВГ на длине волны ≈ 515 нм достигал величины $\approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ %/Вт. Одноре-

менное выполнение квазисинхронизма нескольких типов является отличительной особенностью образцов СПНКН от РДС кристаллов. Поскольку обычные непрерывные волоконные лазеры имеют хаотическую поляризацию, использование световодов с малым двулучепреломлением, в которых реализуются несколько типов взаимодействия одновременно, повышает эффективность удвоения частоты. При проектировании образцов для ГВГ в СПНКН учет поляризационных особенностей может повысить мощность на удвоенной частоте.

Исследования показали, что используемые образцы СПНКН-1,2 имеют большой уровень потерь для основного излучения. Потери определяют относительно низкую эффективность генерации второй гармоники в однопроходной схеме и ограничение абсолютной мощности уровнем $\approx 0,1$ мВт при накачке ≈ 1 Вт. Дальнейшее увеличение мощности второй гармоники возможно за счет использования схемы с внешним резонатором и одночастотной накачкой.

При полученных небольших значениях мощности компактный полностью волоконный источник сине-зеленого диапазона является альтернативой существующим лазерам с объемной оптикой и может найти применение в случаях необходимости селективного воздействия излучением небольшой мощности. Использование в качестве источника излучения основной частоты волоконного иттербиевого лазера и специально изготовленного образца СПНКН для удвоения частоты позволяет выбирать любую желаемую длину волны генерации зеленого диапазона. Кроме того, имеется возможность плавной перестройки частоты с малым шагом. Такие лазерные системы могут быть использованы в научных и биомедицинских исследованиях, спектроскопии и прочих областях.

Авторы выражают благодарность Е.М. Дианову и С.А. Бабину за постоянную поддержку и интерес к работе, М.А. Никулину за предоставленный одночастотный РОС-лазер, Е.А. Злобиной за помощь в характеристике образцов СПНКН, а также А.В. Гладышеву (НЦВО РАН) и К. Корбари, М. Ибсену, П.Г. Казанскому (C. Corbari, M. Ibsen, P.G. Kazansky, Optoelectronics Research Center, University of Southampton) за изготовление образцов и помощь в их характеристике.

Список литературы

1. Акулов В.А., Каблуков С.И., Бабин С.А. Удвоение частоты излучения перестраиваемого иттербиевого волоконного лазера в кристаллах КТР с синхронизмом в плоскостях XY и YZ // Квантовая электроника. – 2012. – Vol. 42, № 2. – С. 120–124.
2. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT, and PPMgLN / E.J. Kontur, J. Dajani, Yalin Lu, R.J. Knize // Opt. Exp. – 2007. – Vol. 15, № 20. – P. 12882–12889.
3. Kazansky P.G., Pruneri V. Electric-field poling of quasi-phase-matched optical fibers // J. Opt. Soc. Am. – 1997. – Vol. 14, № 11. – P. 3170–3178.
4. Broadly tunable second-harmonic generation in periodically poled silica fibers / A. Canagasabey, C. Corbari, Z. Zhang, P.G. Kazansky, M. Ibsen // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, № 13. – P. 1863–1865.
5. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers / A. Canagasabey, C. Corbari, A.V. Gladyshev, F. Liegeois, S. Guillemet, Y. Hernandez, M. Yashkov, A. Kosolapov, E. Dianov, M. Ibsen, P. Kazansky // Opt. Lett. – 2009. – Vol. 34, № 16. – P. 2483–2485.
6. All-fiber frequency-doubled visible laser / C. Corbari, A.V. Gladyshev, L. Lago, M. Ibsen, Y. Hernandez, P.G. Kazansky // Opt. Lett. – 2014. – Vol. 39, № 22. – P. 6505–6508.
7. Multi-watt all-fiber frequency doubled laser / E.L. Lim, C. Corbari, A.V. Gladyshev, S.U. Alam, M. Ibsen, D.J. Richardson, P.G. Kazansky // Top. Meeting Bragg Gratings, Poling Photosensitivity. – 2014. – Paper JTU6A.5.
8. Yellow all-fiber bi laser / V.V. Dvoyrin, A.V. Gladyshev, V.M. Mashinsky, E.M. Dianov, A. Canagasabey, C. Corbari, M. Ibsen, P.G. Kazansky // IEEE ECOC. – 2008. – Vol. 2–5.
9. 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. 467–471.
10. Green fiber lasers: an alternative to traditional DPSS green lasers for flow cytometry / W.G. Telford, S.A. Babin, S.A. Khorev, S.H. Rowe // Cytometry A. – 2009. – Vol. 75A, № 12. – P. 1031–1039.

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

12. Иттербиевый волоконный лазер с распределенной обратной связью с низким уровнем частотных шумов / М.А. Никулин, С.А. Бабин, А.К. Дмитриев, А.С. Дычков, С.И. Каблуков, А.А. Луговой, Ю.Я. Печерский // *Квантовая электроника.* – 2009. – Т. 39, № 10. – С. 906–910.

13. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. – М.: Радио и связь, 1997. – 512 с.

14. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser / I.A. Lobach, S.I. Kablukov, E.V. Podivilov, S.A. Babin // *Opt. Exp.* – 2011. – Vol. 19, № 18. – С. 17632–17640.

15. Measurement of $\chi^{(2)}$ symmetry in a poled fiber / E.Y. Zhu, Li Quan, M. Liscidini, J.E. Sipe, C. Corbari, A. Canagasabey, M. Ibsen, P.G. Kazansky // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35, № 10. – P. 1530–1532.

References

1. Akulov V.A., Kablukov S.A., Babin S.A. Udvoenie chastoty izlucheniia perestraivaemogo itterbievogo volokonного lazera v kristallakh KTP s sinkhronizmom v ploskostiakh XY i YZ [Frequency doubling of a tunable ytterbium-doped fibre laser in KTP crystals phase-matched in the XY and YZ planes]. *Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 2, pp. 120-124.

2. Kontur E.J., Dajani J., Lu Yalin, Knize R.J. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT and PPMgLN. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12882-12889.

3. Kazansky P.G., Pruneri V. Electric-field poling of quasi-phase-matched optical fibers. *Journal Optical Society of America*, 1997, vol. 14, no. 11, pp. 3170-3178.

4. Canagasabey A., Corbari C., Zhang Z., Kazansky P.G., Ibsen M. Broadly tunable second-harmonic generation in periodically poled silica fibers. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, no. 13, pp. 1863-1865.

5. 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. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 16, pp. 2483-2485.

6. Corbari C., Gladyshev A.V., Lago L., Ibsen M., Hernandez Y., Kazansky P.G. All-fiber frequency-doubled visible laser. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 22, pp. 6505-6508.

7. Lim E.L., Corbari C., Gladyshev A.V., Alam S.U., Ibsen M., Richardson D.J., Kazansky P.G. Multi-watt all-fiber frequency doubled laser. *Topical Meeting Bragg Gratings, Poling Photosensitivity*, 2014, paper JTu6A.5.

8. 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. *IEEEECOC*, 2008, vol. 2-5.

9. Dontsova E.I., Kablukov S.I., Babin S.A. Volokonnyi itterbievyyi lazer s perestroikoi dliny volny v diapazone 1017-1040 nm i generatsiei vtoroi garmoniki [Ytterbium-doped fibre laser tunable in the range 1017-1040 nm with second-harmonic generation]. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 5, pp. 467-471.

10. Telford W.G., Babin S.A., Khorev S.A., Rowe S.H. Green fiber lasers: an alternative to traditional DPSS green lasers for flow cytometry. *Cytometry A*, 2009, vol. 75A, no. 12, pp. 1031-1039.

11. Canagasabey A., Corbari C., Gladyshev A.V., Liegeois F., Guillemet S., Hernandez Y., Yashkov M.V., Kosolapov A., Dianov E.M., Ibsen M., Kazansky P.G. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 16, pp. 2483-2485.

12. Nikulin M.A., Babin S.A., Dmitriev A.K., Dychkov A.S., Kablukov S.I., Lugovoi A.A., Pecherskii Iu.Ia. Itterbievyyi volokonnyi lazer s raspredelennoi obratnoi svyaz'iu s nizkim urovnem chastotnykh шумов [Low frequency noise distributed-feedback Ytterbium fibre laser]. *Quantum Electronics*, 2009, vol. 39, no. 10, pp. 906-910.

13. Dmitriev V.G., Tarasov L.V. *Prikladnaia nelineinaia optika* [Applied nonlinear optics]. Moscow, 1997. 512 p.

14. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 18, pp. 17632-17640.

15. Zhu E.Y., Quan Li, Liscidini M., Sipe J.E., Corbari C., Canagasabey A., Ibsen M., Kazansky P.G. Measurement of $\chi^{(2)}$ symmetry in a poled fiber. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 1530-1532.

Получено 15.12.2015