

Оптические волокна и волоконные тейперы с массивом брэгговских решеток

С.М.Попов, О.В.Бутов, А.О.Колосовский, В.В.Волошин, И.Л.Воробьёв, В.А.Исаев, М.Ю.Вяткин, А.А.Фотиади, Ю.К.Чаморовский

Рассмотрены свойства оптических волокон с массивом волоконных брэгговских решеток, записанных непосредственно во время вытяжки волоконного световода. Такие оптические волокна открывают новые возможности для создания новых типов активных и пассивных волоконных элементов за счет увеличенного обратноотраженного сигнала так называемого искусственного рассеяния Рэлея, а также представляют интерес для моделирования физических явлений, связанных со статистикой отражающих центров в оптических волокнах, таких, например, как локализация фотонов. Были исследованы волокна с массивом брэгговских решеток, записанным в фоточувствительных световодах (обычное одномодовое оптическое волокно типа SMF-28), и в волокне с сердцевинной, легированной ионами эрбия. Для управления шириной спектра отраженного сигнала использовались чирпированные фазовые маски, а также запись массивов решеток в тейперных оптических волокнах.

Ключевые слова: тейперные оптические волокна, активные оптические волокна, массивы волоконных брэгговских решеток, оптические сенсоры, волоконные лазеры.

1. Введение

Оптические волокна (ОВ) находят широкое применение в качестве пассивных и активных элементов для линий передачи, сенсорных систем и волоконных лазеров. Особый интерес представляют сенсорные системы, работающие по принципу когерентной рефлектометрии [1, 2]. В таких системах чувствительность и динамический диапазон ограничиваются величиной обратного сигнала, определяемой рассеянием Рэлея. В этом случае для создания распределенных сенсорных систем требуются перспективные ОВ с обратным сигналом, значительно превышающим сигнал обратного рассеяния Рэлея [3, 4]. Обычно для его увеличения применяются волоконные брэгговские решетки (ВБР). Их запись, как правило, выполняется последовательно, шаг за шагом, и состоит из таких этапов, как снятие покрытия, запись решетки, восстановление покрытия и переход к следующему участку ОВ с повтором всей процедуры [5, 6]. Такой метод записи приводит к значительному увеличению обратного сигнала, но в то же время к уменьшению механической прочности массива ВБР. Это значительно сужает область применения таких массивов ВБР. Кроме того, количество ВБР в таком в массиве ограничено. Существует также способ фемтосекундной записи массивов ВБР [7], достоинством

которого является возможность записи через покрытие ОВ (как полимерное, так и полиамидное). К недостаткам такого способа можно отнести некоторое ухудшение прочности ОВ с ВБР при записи массива, а также, как и в предыдущем способе, ограниченное количество ВБР в массиве.

Существует альтернативное решение – запись массива ВБР непосредственно в процессе вытяжки ОВ [8–12]. Формирование массива ВБР в таком ОВ выполняется излучением УФ лазера через фазовую маску. Число ВБР на 100 метрах такого ОВ может достигать 10000, а длина образцов доходить до 1 км. Увеличение обратного сигнала по сравнению с сигналом рассеяния Рэлея составляет примерно 50 дБ на $\lambda = 1550$ нм. Типичная ширина спектра отражения массива ВБР равна 0.3 нм [11]. Ранее были продемонстрированы ОВ с покрытием из алюминия, способные работать при температурах до 500 °С [12]. Также был записан массив ВБР в многосердцевинных ОВ во время процесса вытяжки [11], что необходимо для пространственных датчиков изгиба [13, 14].

Оптические волокна с массивом ВБР обычно эксплуатируются при температурах окружающей среды, которые могут меняться в широких пределах (от –60 °С до 125 °С). Это может приводить к сдвигу длины волны максимума коэффициента отражения массива ВБР до 2 нм. По этой причине актуальна задача расширения спектра отражения массива ВБР, что необходимо также для возможности работы с оптическими источниками когерентных рефлектометров, излучающими на различных длинах волн С-диапазона. Самым простым решением этой проблемы является использование для записи массивов ВБР чирпированных фазовых масок.

Вариантом создания протяженного чирпированного отражателя может быть запись массива ВБР на тейперном ОВ. Известно, что длина волны максимума коэффициента отражения ВБР $\lambda = n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{pm}}$ [15], где Λ_{pm} – период фазовой маски, n_{eff} – эффективный показатель преломле-

С.М.Попов, А.О.Колосовский, В.В.Волошин, И.Л.Воробьёв, В.А.Исаев, М.Ю.Вяткин, Ю.К.Чаморовский. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Моск. обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: sergei@popov.eu.org

О.В.Бутов. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11

А.А.Фотиади. Ульяновский государственный университет, Россия, 432700 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; Faculte Polytechnique, Mons University, 31 Boulevard Dolez, Mons 7000, Belgium

ния. Изменение диаметра ОВ приводит к изменению эффективного показателя преломления и в свою очередь длины волны максимума коэффициента отражения ВБР, записанной в таком ОВ. При этом длина тейперного перехода определяется длиной вытягиваемого ОВ, т.е. может достигать нескольких километров, а коэффициент тейперирования ОВ может достигать 18 [16]. Таким образом, запись массивов ВБР в тейперном ОВ должна привести к расширению спектра отражения массива от различных участков тейперного ОВ. Кроме того, способность такого тейперного волокна отражать сигнал разными участками ОВ может быть использована при создании оптических процессоров для обработки сложных сигналов (для мультиплексирования и демультиплексирования) [17].

Отдельной, крайне интересной областью применения таких массивов является создание резонаторов так называемых случайных лазеров [18–21]. В таких лазерах усиление излучения достигается за счет рассеяния Рамана или ВРМБ, а обратная связь обеспечивается рассеянием Рэлея. Однако из-за низкого уровня обратного сигнала стандартного одномодового телекоммуникационного ОВ типа SMF-28 типичная длина резонатора такого лазера может достигать 25 км [22]. Повышенный уровень обратного сигнала массива ВБР позволяет уменьшить длину резонатора до 100 м [18, 19]. При этом может наблюдаться одночастотная лазерная генерация со спектральной шириной излучения менее 10 кГц на $\lambda = 1550$ нм [19]. Кроме того, известно, что в ОВ с ВБР наблюдался эффект локализации фотонов [23, 24], который интересен тем, что позволяет реализовать сильное и широкополосное отражение, распределенное по длине лазерного резонатора. По этой причине использование массивов ВБР, записанных в активных ОВ, крайне перспективно для создания узкополосных лазерных источников.

В настоящей работе создана технология изготовления и рассмотрена возможность использования ОВ с большим массивом ВБР, записанных непосредственно во время вытяжки ОВ, для ряда практических применений. Так, для систем когерентной рефлектометрии увеличенный обратный сигнал, полученный в таких ОВ, позволяет увеличить чувствительность и динамический диапазон. Изготовленное активное ОВ, легированное ионами Er^{3+} , с массивом ВБР использовалось для резонаторов случайного лазера, работающего в одночастотном непрерывном режиме. Показана возможность расширения спектра отраженного сигнала за счет использования чирпированных фазовых масок и (или) тейперирования ОВ при вытяжке.

2. Материалы и методы

В ходе экспериментов для записи массивов ВБР используется экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.1. На башне для вытяжки волокна (на участке, предшествующем области нанесения полимерного покрытия) установлена система записи брэгговских решеток. Источником излучения на длине волны 248 нм служит стандартный эксимерный УФ лазер Optosystems CL-5100. Плотность энергии импульса составляет 400 мДж/см² при длительности импульса 10 нс. В качестве фазовых масок используются как обычные ($\Lambda = 1070$ нм), так и чирпированные фазовые маски производства Ibsen Photonics с длиной базы ~ 10 мм.

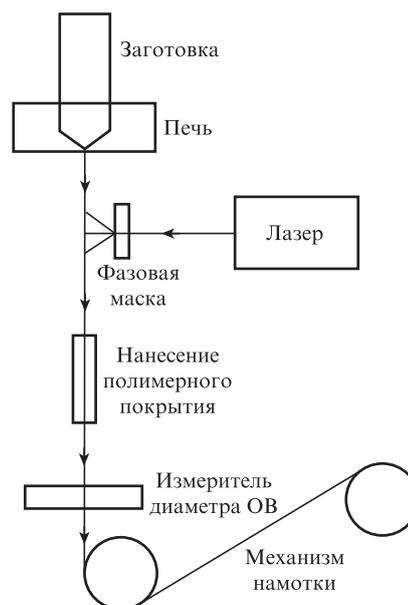


Рис.1. Схема установки для записи массивов ВБР.

Типичная скорость вытяжки ОВ составляет ~ 10 м/мин. В наших экспериментах используются как фоточувствительные силикатные заготовки (с сердцевинной, легированной $\text{V}_2\text{O}_5 + \text{GeO}_2$), так и обычные одномодовые германосиликатные (для вытяжки ОВ типа SMF-28) и даже заготовки активных волокон. Концентрации GeO_2 и V_2O_5 в фоточувствительных заготовках составляют 20 мол. % и 1.5 мол. % соответственно. Разность показателей преломления сердцевинной и оболочки равна ~ 0.025 , длина волны отсечки – 1350 нм, диаметр сердцевинной ОВ составляет 6 мкм. Волноводные параметры одномодовых низколегированных германосиликатных заготовок соответствуют спецификации G.652.

Для записи массивов ВБР в активном ОВ использовался световод с сердцевинной, легированной ионами эрбия. Коэффициент поглощения на длине волны 976 нм составлял 12 дБ. Разность показателей преломления сердцевинной и оболочки была равна 0.0045, длина волны отсечки – 1.06 мкм.

Параметры получаемых ОВ с массивом ВБР измерялись как методом частотной рефлектометрии (OFDR) [25] с помощью прибора Luna 4400, так и спектральным методом с использованием оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370D. Источником излучения для спектральных испытаний служил суперлюминесцентный диод с волоконным выходом или галогенная лампа.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Применение массивов ВБР в системах когерентной рефлектометрии требует от них хорошей совместимости с уже существующими измерительными линиями. В частности, сварка двух ОВ (с массивом и без) должна вносить минимальные оптические потери. По этой причине одной из главных задач была вытяжка одномодового ОВ с массивом ВБР из заготовки для стандартного одномодового волокна типа SMF-28. Частотная рефлектограмма образца одномодового ОВ типа SMF-28 с массивом ВБР, записанным при вытяжке ОВ, представлена на рис.2. Контрастность записи (превышение уровня обратного сигнала)

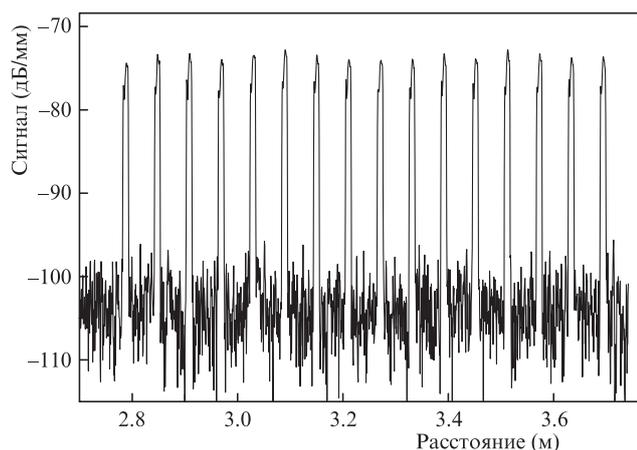


Рис.2. Частотная рефлектограмма ОВ типа SMF-28 с массивом ВБР, записанным при его вытяжке с шагом 6 см.

ла над уровнем сигнала рассеяния Рэля) в таком ОВ с массивом ВБР достигает 30 дБ на длине волны 1546.3 нм. Такое волокно может быть легко интегрировано в уже существующие измерительные системы когерентной рефлектометрии [26], а увеличенный сигнал рассеяния от массива решеток обеспечивает высокое пространственное разрешение и быструю работу системы измерения благодаря минимизации времени накопления сигнала. Ширина пика отражения в таком ОВ составляет ~0.3 нм.

Однако, как было отмечено выше, для работы системы в широком температурном диапазоне необходимо обеспечить расширение пика отражения по меньшей мере до 2 нм. С этой целью была выполнена запись массива ВБР с использованием chirpированной фазовой маски с chirпом 3 нм/см. На рис.3 показаны частотные рефлектограммы образцов с заполнениями 100% и 50%. Некоторая неоднородность коэффициента отражения решеток в массиве ВБР объясняется неоднородностью пучка излучения эксимерного лазера, а также некоторой нестабильностью его выходной мощности.

Поскольку применение chirpированной фазовой маски по сравнению с фазовой маской с постоянным периодом приводит при прочих равных условиях к уменьшению коэффициента отражения массива примерно в 10 раз, для записи массивов ВБР была использована специальная фоточувствительная заготовка с повышенным со-

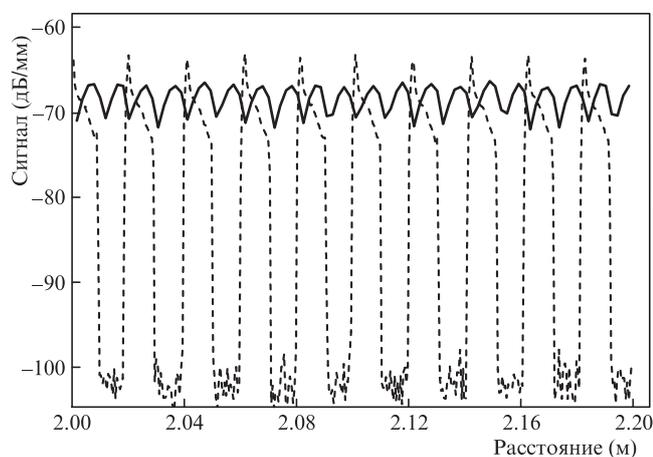


Рис.3. Частотная рефлектограмма массивов ВБР с заполнениями 100% (сплошная кривая) и 50% (штриховая кривая).

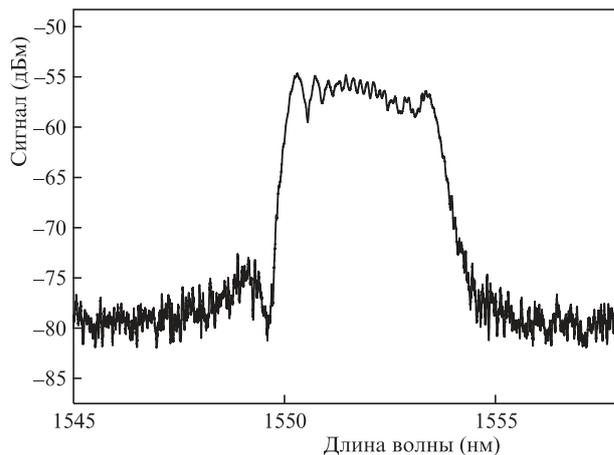


Рис.4. Спектр отражения единичной ВБР в массиве.

держанием германия в сердцевине, дополнительно легированная оксидом бора. Это позволило даже увеличить общий коэффициент отражения примерно на порядок, несмотря на применение chirпированной маски. Спектр отражения единичной решетки показан на рис.4. Его ширина достигает 4 нм, что позволяет использовать решетку при изменении температуры в диапазоне до 350 °С (с учетом температурного коэффициента ОВ 0.011 нм/°С), в частности для создания специальных систем мониторинга, работающих в широком диапазоне температур (охранные системы, нефтяная промышленность, технологический мониторинг и пр.).

Превышение величины обратного сигнала над величиной сигнала рассеянием Рэля достигает 10^5 , что не всегда необходимо. Так, например, при проектировании протяженных систем мониторинга нужно обеспечить сканирование всей длины сенсорного участка волоконного световода, что может оказаться затруднительным при большом коэффициенте отражения массива ВБР. По этой причине возникает необходимость в управлении интегральным коэффициентом отражения. Одним из путей такого управления является изменение плотности записи от 100% (полное заполнение массивом всей поверхности ОВ) до 50%, 20%, 1% и менее. Такое изменение плотности записи приводит к пропорциональному уменьшению коэффициента отражения массива ВБР, что обеспечивает возможность управления данным параметром в широких пределах. При этом не требуется изменения конфигурации модуля записи брэгговских решеток, фоточувствительности заготовки и пр.

Напомним, что контрастность записи решеток при вытяжке волоконного световода может достигать 30 дБ и более. Как было отмечено ранее, наличие ВБР приводит к локализации фотонов [23, 24]. По этой причине представляет интерес использование массивов ВБР (записаны в ОВ, легированных ионами редкоземельных материалов, в частности Er^{3+}) в качестве резонаторов случайного лазера. Мы провели запись массивов ВБР во время вытяжки в ОВ, легированном ионами Er^{3+} . Резонатор случайного лазера формируется на основе отражающих центров – нефазированных между собой брэгговских решеток. Благодаря большому числу решеток в резонаторе обеспечивается высокая равномерность распределения в нем отражающих центров, а увеличенный коэффициент отражения позволяет формировать положительную обратную связь случайного лазера на относительно корот-

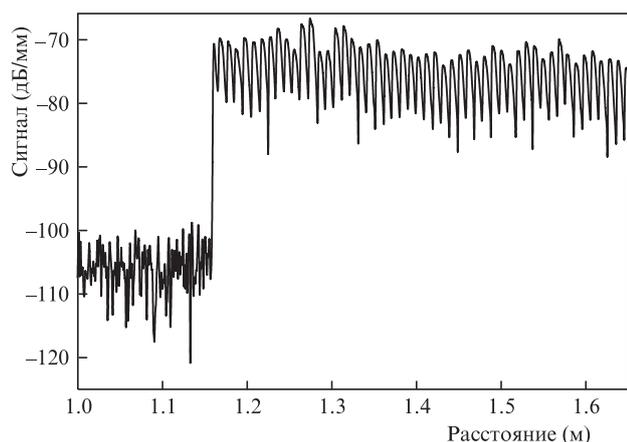


Рис.5. Частотная рефлектограмма легированного Er^{3+} ОВ с массивом ВБР, записанным при его вытяжке с заполнением 100%.

ком участке активного волоконного световода. На рис.5 показана частотная рефлектограмма массива ВБР, измеренного на длине волны 1547.6 нм. Массив ВБР длиной 5 м, записанный в ОВ, легированном ионами Er^{3+} , использовался в качестве резонатора случайного лазера. Накачка осуществлялась излучением лазерного диода Gooch and Housego на длине волны 976 нм (ширина линии менее 1 МГц). Была получена непрерывная узкополосная лазерная генерация (рис.6). Пороговая мощность излучения накачки лазера составляла ~ 100 мВт.

Как было отмечено выше, одним из вариантов расширения спектра отражения массива ВБР является запись массивов в тейперном ОВ. Образцы тейперных волокон изготавливаются во время вытяжки путем управления ее скоростью, что приводит к плавному изменению диаметра ОВ и, в свою очередь, к изменению эффективного показателя преломления ОВ.

Из фоточувствительной заготовки были вытянуты два образца тейперных ОВ с массивом ВБР. При этом диаметр ОВ изменялся в пределах 80–125 мкм (образец №1) и 125–230 мкм (образец №2). На рис.7 представлены профили изменения диаметра и длины волны максимума коэффициента отражения массива ВБР образцов при изменении длины ОВ. Видна полная корреляция между диаметром волокна и длиной волны брэгговского отражения, изменение которой в обоих образцах достигало 4 нм. Коэффициент отражения тейперных ОВ с массивом ВБР

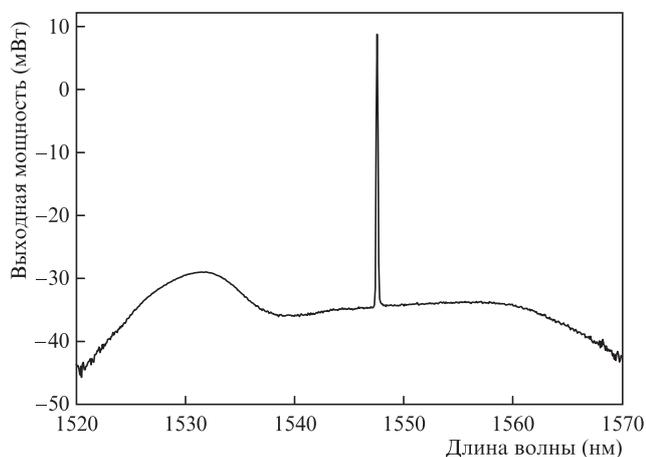


Рис.6. Спектр генерации случайного лазера на ОВ с массивом ВБР при мощности излучения накачки 350 мВт на $\lambda = 976$ нм.

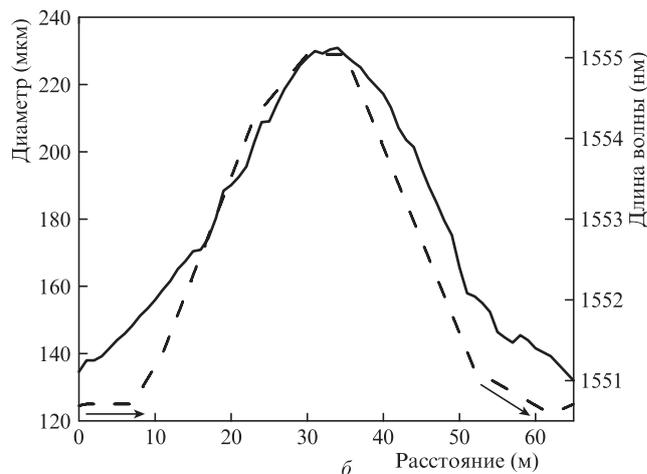
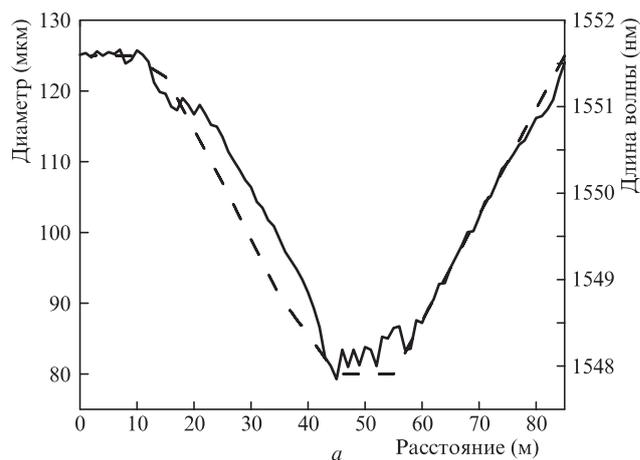


Рис.7. Изменение диаметра ОВ по длине тейперных образцов №1 (а) и №2 (б) (штриховые кривые) Сплошная кривая соответствует изменению длины волны максимума коэффициента отражения массива ВБР.

при измерении спектральным методом на отдельных длинах волн составлял 5% – 6% [20, 21, 27].

4. Заключение

Разработаны образцы ОВ с обратным сигналом, увеличенным в результате отражения излучения от записанных массивов ВБР. В частности, получено одномодовое ОВ с массивом ВБР с обратным сигналом, превышающим сигнал рассеяния Рэлея на величину до 30 дБ на длине волны 1546.3 нм, что необходимо для систем когерентной рефлектометрии. Применение chirpированной фазовой маски позволяет увеличить ширину спектра отражения до 4 нм, что важно для практического применения в условиях изменений температуры и механического натяжения ОВ. Благодаря записи массивов ВБР в ОВ длиной 5 м, легированных ионами Er^{3+} , получена непрерывная узкополосная лазерная генерация на длине волны 1547.6 нм с пороговой мощностью излучения накачки ~ 100 мВт на длине волны 976 нм. Запись массивов ВБР во время вытяжки в тейперном ОВ позволила сдвигать спектр отражения вдоль оси ОВ в диапазоне до 4 нм.

Разработанный тип ОВ с массивом ВБР может найти применение в качестве резонаторов волоконных лазеров и усилителей, в сенсорных системах высокого пространственного разрешения и чувствительности, а также в оптических процессорах.

Работа выполнена в рамках государственного задания. Работа А.А.Фотиади поддержана РФФ (грант № 18-12-00457) и РФФИ (грант № 18-42-732001 Р-МК).

1. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. *Opt. Lett.*, **17**, 1623 (1992).
2. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J. *Appl. Opt.*, **37**, 5600 (1998).
3. Lavrov V.S., Plotnikov M.Y., Aksarin S.M., Efimov M.E., Shulepo V.A., Kulikov A.V., Kireenkov A.U. *Opt. Fiber Technol.*, **34**, 47 (2017).
4. Jason J.J., Popov S.M., Butov O.V., Chamorovskiy Y.K., Golant K.M., Wuilpart M., Fotiadi A.A. *Proc. SPIE Photon. Eur.* (Strasbourg, France, 2018, Vol. 106801B).
5. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 1085 (2005)].
6. Butov O.V. *Results Phys.*, **15**, 102542 (2019).
7. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
8. Askins C.G., Tsai T.-E., Williams G.M., Putnam M.A., Bashkansky M., Friebele E.J. *Opt. Lett.*, **17**, 833 (1992).
9. Dong L., Archambault J.L., Reekie L., Russell P.S.J., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **29** 1577 (1993).
10. Зайцев И.А., Бутов О.В., Волошин В.В., Воробьев И.Л., Вяткин М.Ю., Колосовский А.О., Попов С.М., Чаморовский Ю.К. *Радиотехника и электроника*, **61**, 602 (2016).
11. Popov S.M., Butov O.V., Kolosovski A.O., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vyatkin M.Y., Fotiadi A.A., Chamorovski Y.K. *Proc. PIERS, IEEE Xplore* (St. Petersburg, Russia, 2017, p. 1568).
12. Chamorovskiy Y.K., Butov O.V., Kolosovski A.O., Popov S.M., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vyatkin M.Y. *Opt. Fiber Technol.*, **34**, 30 (2017).
13. Moore J.P., Rogge M.D. *Opt. Express*, **20**, 2967 (2012).
14. Butov O.V., Bazakutsa A.P., Chamorovskiy Y.K., Fedorov A.N., Shevtsov I.A. *Sensors*, **19**, 4228 (2019).
15. Osuch T. *Opt. Commun.*, **366**, 194 (2016).
16. Kerttula J., Filippov V., Ustimchik V., Chamorovskiy Yu., Okhotnikov O. *Opt. Express*, **20**, 25461 (2012).
17. Wang C., Yao J. *Opt. Express*, **21**, 22868 (2013).
18. Popov S.M., Chamorovsky Yu.K., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. *Proc. ECOC, IEEE Xplore* (Valencia, Spain, 2015, p.1).
19. Popov S.M., Butov O.V., Chamorovski Y.K., Isaev V.A., Mégret P., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. *Results Phys.*, **9**, 806 (2018).
20. Popov S.M., Butov O.V., Chamorovski Y.K., Isaev V.A., Kolosovskiy A.O., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vyatkin M.Y., Mégret P., Odnoblyudov M.A., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. *Results Phys.*, **9**, 625 (2018).
21. Popov S.M., Butov O.V., Chamorovski Y.K., Isaev V.A., Kolosovskiy A.O., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vyatkin M.Y., Mégret P., Odnoblyudov M., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A. *Proc. ICLO, IEEE Xplore* (St. Petersburg, Russia, 2018, p. 299).
22. Turitsyn S.K., Babin S.A., Churkin D.V., Vatnik I.D., Nikulin M., Podivilov E.V. *Phys. Reports*, **542**, 133 (2014).
23. Shapira O., Fischer B. *J. Opt. Soc. Am. B*, **22**, 2542 (2005).
24. Lizárraga N., Puente N.P., Chaikina E.I., Leskova T.A., Méndez E.R. *Opt. Express*, **17**, 395 (2009).
25. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. *Opt. Express*, **13**, 666 (2005).
26. Кузьменков А.И., Вяткин М.Ю., Коньшев В.А., Наний О.Е., Никитин С.П., Попов С.М., Трещиков В.Н., Улановский Ф.И., Чаморовский Ю.К. *Фотон-Экспресс*, **134**, 16 (2016).
27. Chamorovskiy Yu.K., Butov O.V., Kolosovskiy A.O., Popov S.M., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vyatkin M.Yu., Odnobludov M.A. *Opt. Fiber Technol.*, **50**, 95 (2019).