

Влияние диаметра световода на характеристики сенсоров на основе наклонных волоконных брэгговских решеток

К.А.Томышев, Е.И.Долженко, О.В.Бутов

Настоящая работа посвящена изучению влияния диаметра световода на точность и разрешение волоконных сенсоров показателя преломления на основе наклонных брэгговских решеток – ключевого элемента, с использованием которого разрабатываются высокоточные волоконные сенсоры параметров внешней среды. Для сравнительного анализа использовался один из универсальных алгоритмов обработки, основанный на анализе спектральных огибающих. Показано, что точность работы датчиков падает с уменьшением диаметра оболочки световода. В то же время увеличение диаметра ведет к уменьшению контраста спектральной картины, что осложняет создание высокоэффективных сенсорных элементов.

Ключевые слова: наклонные волоконные брэгговские решетки, волоконные сенсоры, математическая обработка.

1. Введение

Современный мир производит и обрабатывает значительные объемы информации. От них зависит работоспособность буквально всех сфер жизни: будь то промышленное предприятие, медицинская лаборатория или жилое помещение. Чем выше качество этих данных, тем больше точность прогнозов и тем эффективнее управление. Для улучшения эффективности сбора данных ведется постоянная разработка новых высокоточных сенсоров.

Волоконно-оптические сенсоры – относительно молодое самостоятельное направление в современной сенсорике. В большинстве своем волоконные сенсоры обладают рядом принципиальных преимуществ по сравнению с классическими электронными датчиками, среди которых помехоустойчивость, высокие чувствительность и разрешение, большой динамический диапазон [1–4]. К отдельной группе волоконных сенсоров относятся датчики, основным чувствительным элементом которых являются волоконные брэгговские решетки (ВБР). Такая решетка представляет собой структуру в виде периодической модуляции показателя преломления, сформированную в сердцевине световода (так называемые штрихи). Особенностью данной структуры является способность отражать свет только на определенной (брэгговской) длине волны, зависящей от периода решетки и показателя преломления материала световода. На основе ВБР существует и разрабатывается множество различных сенсоров, таких как датчики температуры, деформации, давления, ускорения и др. [5–10], способные работать в том числе в сложных условиях эксплуатации [11–14].

Следует отметить, что область применения датчиков на основе «классических» ВБР ограничена их чувствительностью только к изменениям, происходящим непосред-

ственно с самим волокном, будь то изменение температуры или механическая деформация. Однако для ряда задач требуется проведение измерений и контроля параметров внешней среды, таких как состав, показатель преломления, влажность, наличие химических или биологических примесей. В этом случае оптический сигнал волоконного сенсора прямо или косвенно должен взаимодействовать с внешней средой, что обеспечивается изменением геометрии волоконного световода [15, 16] или использованием оболочечных мод, контактирующих с внешней средой, примыкающей к поверхности оптического волокна [17, 18]. Одним из вариантов обеспечения такого взаимодействия является создание наклонных волоконных брэгговских решеток (НВБР), т. е. решеток, плоскость штрихов которых расположена под углом к сечению волоконного световода [19–22]. НВБР рассеивает часть распространяемого световодом излучения в оболочку волокна, формируя оболочечные моды. Характерный спектр пропускания наклонной решетки представляет собой последовательность пиков и провалов, каждый экстремум которой соответствует определенным модам оболочки. Параметры этих мод, в свою очередь, зависят от показателя преломления окружающей сенсор среды, что позволяет использовать НВБР для измерения ее параметров [23] (рис.1). Характерным параметром, отражающим реакцию сенсора на изменение показателя преломления внешней среды, является длина волны, называемая длиной волны отсеки. При длинах волн, меньших длины волны отсеки, наблюдается вытекание оболочечных мод, что отражается в спектре пропускания НВБР.

Волоконные сенсоры на основе НВБР активно разрабатываются и исследуются применительно к широкому кругу задач, таких как определение показателя преломления окружающей среды, атмосферной влажности, определение различного рода примесей в жидких средах и газовой атмосфере [20–22, 24–29]. Высокое разрешение сенсоров на основе НВБР, их компактность и интегрируемость в микрофлюидные системы делают такие сенсоры перспективными для применения в биологии и медицинской диагностике [30–33]. Следует отметить, что особенности

К.А.Томышев, Е.И.Долженко, О.В.Бутов. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, к. 7; e-mail: scatterdice@gmail.com

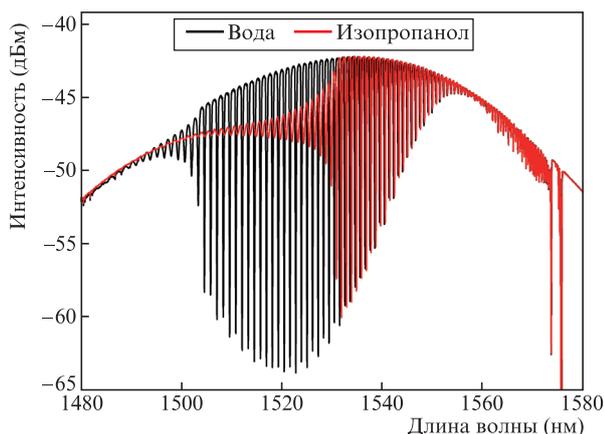


Рис.1. Спектры пропускания НВБР в зависимости от показателя преломления (состава) жидкости.

спектра пропускания таких сенсоров затрудняют точную и однозначную интерпретацию их показаний. Поэтому важной задачей является разработка методов и алгоритмов обработки сигнала сенсоров на основе НВБР, что напрямую влияет на точность проводимых измерений. В настоящее время в различных работах описываются методы, основанные на измерениях амплитуды и/или длины волны отдельных спектральных экстремумов или их групп [34, 35], на построении и исследовании огибающих спектра [23, 36, 37] и изучении их фурье-образов [38].

Спектр пропускания НВБР формируется с учетом физических параметров световода. Так, частота следования экстремумов, соответствующих связи мод оболочки с модой сердцевинки, напрямую зависит от диаметра оболочки. Кроме того, последний может оказывать влияние на контраст спектральной картины НВБР, т. е. на глубину и форму спектральных минимумов и максимумов. В свою очередь точность методов обработки сигнала непосредственно связана с особенностями спектра пропускания решетки. Вопрос взаимосвязи диаметра оболочки световода и параметров сенсоров на основе НВБР интересовал исследователей и ранее [39–44]. Так, в работе [39] был проведен сравнительный анализ чувствительности НВБР, записанных в волокнах различного диаметра, к изменениям температуры и механическому растяжению. В работе [40] исследовался вопрос изменения эффективности возбуждения мод оболочки НВБР с небольшими углами наклона (2° и 5°) при химическом травлении оболочки световода и с учетом различных показателей преломления внешней среды. В работе [41], напротив, НВБР была записана под большим углом (81°) и показано, что чувствительность сенсора, определяемая по сдвигу отдельного спектрального минимума, возрастает при уменьшении диаметра оболочки световода. В работе [42] изучались изменения в спектре решеток, записанных в многомодовых световодах, при уменьшении диаметра оболочки. В работах [43, 44] продемонстрировано, что в волокнах с более тонкой оболочкой возрастает спектральный сдвиг отдельных экстремумов в спектре НВБР, тем самым увеличивая чувствительность таких сенсоров.

Представленная нами работа еще раз поднимает этот вопрос, т. к. с учетом новых методов обработки данных, основанных на комплексном анализе спектральной картины, влияние диаметра оболочки световода на разрешение сенсора может оказаться весьма значительным. Вы-

сокая точность и разрешение, которые обеспечивают новые методы обработки спектров, предъявляют особые требования к качеству и содержанию спектральной картины и к свойствам НВБР. Как следствие, характер влияния диаметра световода может быть диаметрально противоположным тому, что наблюдалось при отслеживании изменений отдельного спектрального пика, которое применялось, например, в работах [43, 44].

2. Эксперимент

При исследованиях параметров НВБР-сенсора с различными диаметрами оболочки образец решетки для проведения экспериментов был записан в сердцевине стандартного телекоммуникационного волокна SMF-28e. Запись решетки проводилась путем экспонирования на боковую поверхность световода излучения эксимерного ArF- лазера через фазовую маску с периодом 1088 нм. Период фазовой маски был выбран из доступного набора длин волн исходя из удобства анализа спектра НВБР, основная часть которого попадала в диапазон излучения суперлюминесцентного источника, используемого при сканировании спектра решетки (1500–1570 нм). Световод вместе с маской был установлен под углом 17° к фронту лазерного излучения. С учетом показателя преломления материала волокна штрихи решетки были сформированы под углом 11.6° к поперечному сечению световода. Угол наклона штрихов влияет и на форму спектра пропускания НВБР, и на диапазон работы датчика показателя преломления на ее основе. Выбор угла в наших экспериментах был обусловлен необходимостью наблюдения четко различимого эффекта отсечки на спектре пропускания решетки во всем диапазоне значений показателей преломления используемых в экспериментах растворов. Для повышения эффективности записи решетки световод был предварительно насыщен водородом при давлении 100 атм и температуре 100° в течение 24 ч [30].

Чтобы оценить чувствительность и точность измерений, сенсор погружали в водные растворы изопропилового спирта, объемная концентрация которого изменялась от 0 (чистая вода) до 100% (чистый спирт), что соответствовало диапазону изменения показателя преломления примерно от 1.32 до 1.36. Для удобства проведения сравнительного анализа чувствительность сенсора в настоящей работе будет определяться как величина сдвига длины волны отсечки с ростом объемной концентрации раствора изопропилового спирта, выраженной в процентах (нм/%). Раствор изопропанола удобно использовать в качестве модельной жидкости, поскольку в нем не наблюдаются процессы, способные исказить результаты эксперимента, такие как выпадение растворенного вещества в осадок, изменение температуры раствора с изменением его концентрации и др., что может быть характерно, например, для растворов солей. Прошедший через сенсор сигнал измерялся оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370D с фактическим разрешением 0.017 нм. После проведения серии измерений диаметр световода в месте расположения НВБР изменялся, для чего образец помещали в 10%-ный раствор плавиковой кислоты на 30 мин. Для оценки диаметра внешней оболочки после травления использовался идентичный отрезок световода SMF-28e без решетки, который подвергался травлению вместе с сенсором, после чего диаметр этого кон-

трольного световода измерялся микрометром Vogel 231061 с точностью 1 мкм. По результатам измерений уменьшение диаметра, стравливаемого за одну итерацию, составило ~ 6 мкм. После травления в кислоте образец тщательно промывался дистиллированной водой и высушивался, а затем вновь выполнялась серия измерений в водных растворах изопропанола со снятием спектральных характеристик сенсора.

В результате серии экспериментов были измерены параметры сенсора при различных диаметрах оболочки световода. Спектральные характеристики обрабатывались при помощи математического алгоритма, подробно описанного в работе [23], суть которого заключается в построении верхней и нижней огибающих спектра после его фурье-фильтрации. Огибающие представляют собой гладкие кривые, аппроксимируемые эмпирической зависимостью вида $A + B \arctan[C(\lambda - \lambda_0)]$ по множеству локальных экстремумов спектра – минимумов и максимумов соответственно. Средние значения спектральных координат точек перегиба, т. е. нулей вторых производных функций этих огибающих, принимаются в качестве оценки длины волны отсечки.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис.2 представлены спектры сенсоров, погруженных в воду, при двух различных диаметрах световода. Следует обратить внимание на то, что с уменьшением диаметра оболочки наблюдается рост амплитуды спектральных пиков, что можно объяснить увеличением перекрытия поля мод оболочки с полем моды сердцевинки для более тонкого световода. Это обстоятельство говорит о предпочтительном использовании более тонких волокон для методов обработки, основанных на измерении амплитуд отдельных пиков, поскольку масштаб их изменений заметно возрастает. Действительно, эффективность подобных методов напрямую зависит от ширины диапазона изменения амплитуды отдельно взятого экстремума. В то же время с ростом диаметра оболочки волокна увеличивается число экстремумов в спектре НВБР, что, в свою очередь, должно положительно сказываться на точности работы алгоритмов, использующих анализ по множеству спектральных пиков, таких как методы спектральных огибающих [36, 37]. Чем больше пиков в составе спек-

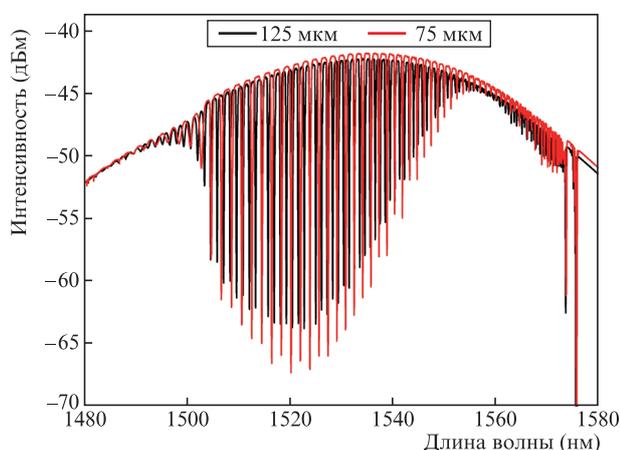


Рис.2. Спектры пропускания НВБР в воде для волокон с диаметрами 75 и 125 мкм.

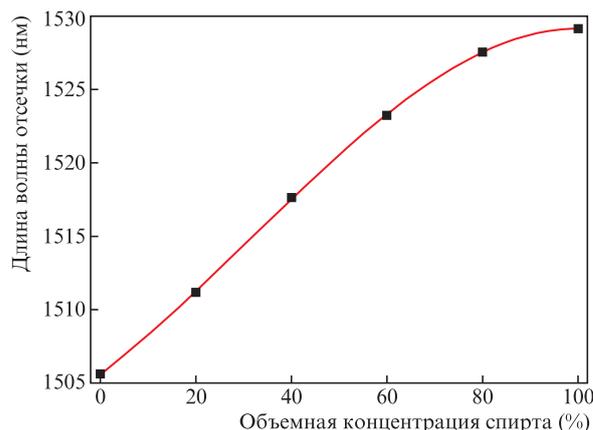


Рис.3. Длина волны отсечки при различных концентрациях изопропанола для волокна диаметром 125 мкм.

тральной картины, тем выше точность построения огибающих за счет снижения статистического веса координаты каждого отдельного спектрального пика. В свою очередь это уменьшает влияние неоднородностей и шумов, искажающих участки спектра, на общий результат обработки.

Результаты обработки спектральных данных, полученных при использовании растворов с различной концентрацией изопропилового спирта, на примере сенсора диаметром 125 мкм продемонстрированы на рис.3. Видно, что представленная зависимость носит ярко выраженный нелинейный характер. Такое поведение кривой объясняется нелинейной зависимостью показателя преломления раствора изопропилового спирта от его концентрации [45, 46]. В первом приближении подобную зависимость можно аппроксимировать полиномом третьего порядка вида

$$\lambda_c = \lambda_0 + AC^3 + BC^2 + DC,$$

где λ_c – длина волны отсечки; λ_0 , A , B , D – коэффициенты полинома.

Аналогичные результаты были получены и для всех остальных диаметров световода. Очевидно, что такие параметры как точность и разрешение сенсора связаны между собой через калибровочные коэффициенты. Под разрешением и, соответственно, потенциальной точностью, как правило, подразумевается величина тройного среднеквадратичного отклонения показаний сенсора от реального значения измеряемой величины. В нашем случае пара-

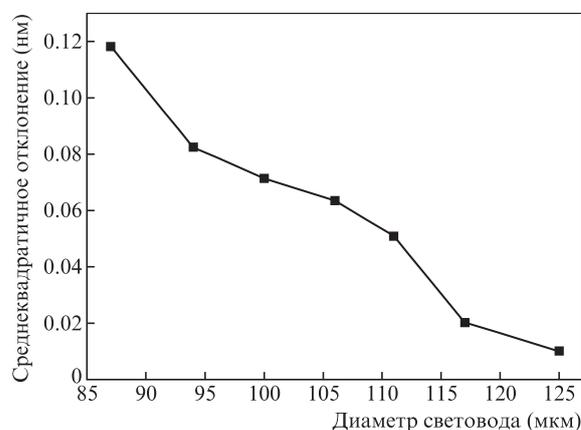


Рис.4. Изменение среднеекватичного отклонения экспериментальных точек от аппроксимационной кривой с ростом диаметра световода.

Табл.1. Средняя чувствительность сенсоров χ на различных участках аппроксимационной кривой и среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальных точек от кривой при различных диаметрах световодов d .

| d (мкм) | χ (нм/%) в диапазоне концентраций | | СКО (нм) |
|-----------|--|---------|----------|
| | 0–10% | 40%–60% | |
| 125 | 0.251 | 0.291 | 0.010 |
| 117 | 0.290 | 0.285 | 0.020 |
| 111 | 0.275 | 0.292 | 0.051 |
| 106 | 0.272 | 0.283 | 0.063 |
| 100 | 0.285 | 0.290 | 0.071 |
| 94 | 0.247 | 0.292 | 0.083 |
| 87 | 0.238 | 0.287 | 0.118 |

метром, позволяющим осуществить относительную оценку точности сенсора, будет принята величина среднеквадратичного отклонения измеряемых длин волны отсечки от кривой аппроксимации. Чем меньше данный параметр, тем выше разрешение и потенциальная точность сенсора.

Сравнение результатов обработки данных не выявило явного изменения чувствительности сенсора при изменении диаметра волокна (табл.1). При этом наблюдается однозначная корреляция между точностью аппроксимации и, как следствие, между величиной среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек и диаметром оболочки. По результатам расчета построена зависимость среднеквадратичного отклонения от диаметра сенсора (рис.4). Из рисунка видно, что с уменьшением диаметра волокна среднеквадратичное отклонение растет, что свидетельствует о снижении разрешения сенсора. Как было отмечено выше, результаты этого эксперимента не лишены физического смысла. Действительно, при уменьшении диаметра оболочки сокращается количество пиков в спектре НВБР, что увеличивает статистический вес ошибки определения спектральной координаты каждого пика в отдельности, а это и приводит к снижению разрешения сенсора в целом. И наоборот, рост диаметра оболочки естественным образом увеличивает точность методов, основанных на построении огибающих, что позволяет увеличить точность работы сенсоров на основе НВБР.

Следует отметить, что при всех преимуществах создания сенсоров на основе НВБР в волокнах с утолщенной оболочкой не следует забывать об уменьшении амплитуды спектральных пиков с ростом диаметра оболочки световода. Это может приводить к технологическим сложностям при записи эффективных наклонных брэгговских решеток и их применении в качестве высокоточных сенсоров. Амплитуда спектральных пиков такой решетки может оказаться существенно ниже желаемой, что может сказаться на точности обработки.

Таким образом, для каждой измерительной системы на основе НВБР может быть найдено оптимальное значение диаметра сенсора, при котором будет обеспечиваться достаточная для проведения корректных измерений амплитуда спектральных пиков и достаточно высокая их спектральная плотность, влияющая на разрешение сенсора. Однако данное оптимальное значение зависит как от структуры системы и применяемой аппаратуры, анализа спектра, так и от технологических возможностей производителя НВБР.

4. Заключение

В работе представлены результаты влияния диаметра световода на характеристики сенсоров показателя преломления на основе НВБР. Для обработки спектральных данных был использован метод огибающих, учитывающий вклад множества спектральных пиков и обеспечивающий высокое разрешение сенсоров такого типа. Согласно полученным данным, при уменьшении диаметра световода точность проводимых измерений неуклонно снижается. Увеличение диаметра оболочки, напротив, должно увеличить разрешение подобных сенсоров при условии, что алгоритмы обработки основаны на комплексном анализе спектра, учитывающем множество спектральных пиков. При этом чувствительность сенсора не испытывает сколько-нибудь заметных изменений. Однако эффективная запись наклонных брэгговских решеток в волокнах с более толстой оболочкой представляется более сложной задачей, что может вызывать затруднения при создании сенсорных элементов на их основе. Очевидно, что можно найти оптимальное значение диаметра оболочки сенсора, зависящее как от возможностей применяемой спектральной аппаратуры в измерительной системе, так и от технологических возможностей производителя НВБР.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-07-00467).

- Zhou W., Zhou Y., Albert J. *Laser Photon. Rev.*, **11** (1), 1600157 (2017).
- Alwis L., Sun T., Grattan K.T.V. *Measurement*. **46** (10), 4052 (2013).
- Ascorbe J. et al. *Sensors*. **17** (4), 893 (2017).
- Lydon M. et al. *IEEE Sens. J.*, **14** (12), 4284 (2014).
- Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (Montreal: Academic Press, 2009).
- Allil R.C.D.A.S.B., Werneck M.M., de Nazaré F.V.B. *Fiber Bragg Gratings: Theory, Fabrication, and Applications* (Bellingham, Washington: SPIE PRESS, 2017).
- Butov O.V., Bazakutsa A.P., Chamorovskiy Y.K., Fedorov A.N., Shevtsov I.A. *Sensors*, **19** (19), 4228 (2019).
- Basumallick N., Chatterjee I., Biswas P., Dasgupta K., Bandyopadhyay S. *Sens. Actuat. A*, **173** (1), 108 (2012).
- Zhuo Z.C., Ham B.S. *Opt. Fiber Technol.*, **15** (5), 442 (2009).
- Butov O.V. et al. *Versatile in-Fiber Bragg Grating Pressure Sensor for Oil and Gas Industry in Optical Fiber Sensors* (Cancun: OSA Techn. Digest, 2006).
- Butov O.V., Dianov E.M., Golant K.M. *Meas. Sci. Technol.*, **17** (5), 975 (2006).
- Mihailov S.J. *Sensors*, **12** (2), 1898 (2012).
- Butov O.V., Chamorovskii Y.K., Golant K.M., Shevtsov I.A., Fedorov A.N. *Proc. SPIE*, **9157**, 91570X (2014).
- Butov O.V., Chamorovskiy Y.K., Bazakutsa A.P., Fedorov A.N., Shevtsov I.A. *Optical Fiber Sensor for Deformation Monitoring of Fuel Channels in Industrial Nuclear Reactors in Optical Fiber Sensors* (Lausanne: OSA Techn. Digest, 2018).
- Korposh S., James S.W., Lee S.W., Tatam R.P. *Sensors*, **19** (10), 2294 (2019).
- Riza M.A., Go Y.I., Harun S.W., Maier R.R.J. *IEEE Sens. J.*, **20** (14), 7614 (2020).
- Иванов О.В., Никитов С.А., Гуляев Ю.В. *УФН*, **176** (2), 175 (2006) [*Phys. Usp.*, **49**, 167 (2006)].
- Erdogan T. *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (8), 1760 (1997).
- Бутов О.В., Томышев К.А., Нечепуренко Л.А., Дорофеев А.В., Никитов С.А. *УФН*, **65** (2022) в печати [*Phys. Usp.*, **65** (2022) in press].
- Guo T., Liu F., Guan B.O., Albert J. *Opt. Laser Technol.*, **78**, 19 (2016).
- Albert J., Shao L.Y., Caucheteur C. *Laser Photon. Rev.*, **7** (1), 83 (2013).
- Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y. *Photon. Sens.*, **1** (1), 6 (2011).

23. Tomyshev K.A., Manuilovich E.S., Tazhetdinova D.K., Dolzhenko E.I., Butov O.V. *Sens. Actuators A*, **308**, 112016 (2020).
24. Zhao Y., Wang Q.I., Huang H.J. *Optoelectron. Adv. Mater.*, **12**, 2343 (2010).
25. Caucheteur C., Mégret P. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (12), 2703 (2005).
26. Voisin V., Caucheteur C., Mégret P., Albert J. *Appl. Opt.*, **50** (22), 4257 (2011).
27. Dolzhenko E.I., Tomyshev K., Butov O.V. *Phys. Status Sol. RRL*, **14** (12), 2000435 (2020).
28. Tomyshev K.A., Tazhetdinova D.K., Manuilovich E.S., Butov O.V. *Phys. Status Sol. A*, **216** (3), 1800541 (2018).
29. Yu J., Wu Z., Yang X., Han X. *Sensors*, **18** (12), 4478 (2018).
30. Tomyshev K.A., Tazhetdinova D.K., Manuilovich E.S., Butov O.V. *J. Appl. Phys.*, **124** (11), 113106 (2018).
31. Rich R.L., Myszka D.G. *J. Mol. Recognit.*, **18** (6), 431 (2005).
32. Han L., Guo T., Xie C., Xu P., Lao J., Zhang X., Xu J., Chen X., Huang Y., Liang X., Mao W., Guan B.O. *J. Lightwave Technol.*, **35** (16), 3360 (2017).
33. Marquez-Cruz V., Albert J. *J. Lightwave Technol.*, **33** (16), 3363 (2015).
34. Pham X., Si J., Chen T., Wang R., Yan L., Cao H., Hou X. *J. Appl. Phys.*, **123** (17), 174501 (2018).
35. Chan C.F., Chen C., Jafari A., Laronche A., Thomson D.J., Albert J. *Appl. Opt.*, **46** (7), 1142 (2007).
36. Manuylovich E., Tomyshev K., Butov O.V. *Sensors*, **19** (19), 4245 (2019).
37. Lobry M., Fasseaux H., Loyez M., Chah K., Goormaghtigh E., Wattiez R., Chiavaioli F., Caucheteur C. *J. Lightwave Technol.*, **1** (2021) in press.
38. Udos W., Lim K.S., Tan C.L., Ismail M.N.S.M., Ooi C.W., Zakaria R., Ahmad H. *Optik*, **219**, 164970 (2020).
39. Chen C., Caucheteur C., Mégret P., Albert J. *Meas. Sci. Technol.*, **18** (10), 3117 (2007).
40. Caucheteur C., Chah K., Lhomme F., Debliqy M., Lahem D., Blondel M., Megret P., in *Proc. of 2005 IEEE/LEOS Workshop on Fibres and Optical Passive Components* (Palermo: IEEE, 2005, p 234).
41. Lu H., Luo B., Shi S., Zhao M., Lu J., Ye L., Zhong N.B., Tang B., Wang X., Wang Y. *Appl. Opt.*, **57** (10), 2590 (2018).
42. Chen X., Zhou K., Zhang L., Bennion I. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (4), 864 (2005).
43. Miao Y., Liu B., Zhao Q. in *Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology* (Shenzhen: Association for Computing Machinery, 2008).
44. Miao Y., Liu B., Tian S., Zhao Q. *Proc. SPIE*, **7134**, 71343W (2008).
45. Chu K.Y., Thompson A.R. *J. Chem. Eng. Data.*, **7** (3), 358 (1962).
46. Edward W.W. *International Critical Tables* (New York: McGraw-Hill, 1933).