

ности, с различными видами погрешности, и идеальной поверхности линз.

Каждый образ формируем в виде графического файла в 8 битном черно-белом формате с разрешением 128×128 пикселей. После чего создают и обучают нейронную сеть. Затем приступают к запуску тестирования работы нейросети.

Таким образом, обучив нейросеть распознавать интерференционные картины можно оптимизировать работу систем в несколько десятков раз. А также предоставив для обучения большую базу данных, можно научить нейросеть находить малейшие отклонения, которые могут быть упущены при интерференционном методе [5].

Литература

1. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехник, 2004. – 679 с.
2. Афанасьев, В. А. Оптические измерения. – М.: Высшая школа, 1981. – 232 с.
3. ГОСТ 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта.
4. ГОСТ Р 70462.1-2022/ISO/IEC TR 24029-1-2021. Информационные технологии. Интеллект искусственный. Оценка робастности нейронных сетей. Часть 1.
5. Луис, С. Грокам машинное обучение. – СПб.: Питер, 2024. – 512с.

УДК 681.7.068

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Поляков А. В.¹, Ксенофонов М. А.²

¹Белорусский государственный университет

²НИУ «Институт прикладной физической проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана квазираспределенная система измерения температуры с использованием мультиплексирования однородных волоконных брэгговских решеток с различными параметрами в качестве чувствительных элементов. На основе разработанной математической модели с помощью численного моделирования проведена оценка способов увеличения чувствительности и точности измерений для волоконных решеток Брэгга с металлизированным покрытием в диапазоне температур от –140 °С до +200 °С.

Ключевые слова: измеритель температуры, волоконная решетка Брэгга, металлическое покрытие, чувствительность.

QUASI-DISTRIBUTED FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR BASED ON METALLIZED FIBER BRAGG GRATINGS

Polyakov A.¹, Ksenofontov M.²

¹Belarusian State University

²A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A quasi-distributed temperature measurement system using multiplexing of homogeneous fiber Bragg gratings with different parameters as sensitive elements is described. Based on the developed mathematical model, numerical simulation is used to evaluate methods for increasing the sensitivity and measurement accuracy for fiber Bragg gratings with a metallized cladding in the temperature range from –140 °C to +200 °C.

Key words: Temperature meter, fiber Bragg grating, metal cladding, sensitivity.

Адрес для переписки: Поляков А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

В последние три десятилетия с развитием оптоэлектроники и волоконной оптики волоконно-оптические датчики (ВОД) прочно заняли свою нишу среди измерительных устройств благодаря таким уникальным свойствам как: пожаро-, взрыво-, искро-безопасность; устойчивость к химическим, механическим, коррозионным воздействиям; нечувствительность к влиянию электромагнитных помех; большая протяженность при небольшой массе; обеспечение мультиплексирования отдельных датчиков в сложные измерительные системы; возможность легкого сопряже-

ния с существующими волоконно-оптическими сетями и как следствие, передача информации на большие расстояния. На сегодняшний день разработаны ВОД измерения широкой номенклатуры физических величин, при этом наиболее массовое применение в различных областях находят ВОД температуры (ВОДТ).

Благодаря своим свойствам, ВОДТ находят применение в аэрокосмической отрасли, в том числе рассматриваются варианты установки на космические аппараты. В этой связи разработка и исследование способов улучшения характеристик

прецизионных температурных ВОД является актуальной задачей. Одним из оптимальных вариантов по сочетанию метрологических характеристик, а также простоты и надежности являются измерительные системы на основе квазираспределенных датчиков, представляющих собой массив точечных сенсорных элементов в виде волоконных брэгговских решеток (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого физического воздействия в спектральный сдвиг отраженной брэгговской длины волны, объединенных одним общим световодом [1, 2]. Волоконная решетка Брэгга представляет собой дифракционную решетку, локализованную в сердцевине оптического волокна, которая образована за счет периодического изменения показателя преломления кварцевого стекла под воздействием лазерного излучения. Основными характеристиками решетки являются распределения амплитуды и периода модуляции показателя преломления (ПП), а также среднего значения наведенного ПП вдоль оси световода. Эти параметры задают спектральные, дисперсионные и энергетические свойства решеток и, таким образом, определяют их использование в различных приложениях волоконной оптики.

Коэффициент отражения от ВБР зависит от глубины модуляции показателя преломления, а центральная длина волны отраженного излучения определяется условием Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – длина волны брэгговского резонанса, n_e – эффективный ПП сердцевины волокна для центральной длины волны, Λ – период брэгговской решетки.

При этом излучение на других длинах волн проходит через ВБР практически без потерь. Характеристики отражения зависят от параметров решетки. Принцип работы ВОДТ с использованием ВБР основан на зависимости изменения спектральных свойств отраженного излучения под воздействием температуры. Используя ВБР с различными параметрами, можно мультиплексировать большое число датчиков, проводя одновременные измерения в различных точках волокна на разных брэгговских длинах волн.

В роли температурного датчика, брэгговская решетка подвергается либо расширению, либо сжатию при изменении температуры. Это приводит к изменению периода решетки и эффективного показателя преломления. В результате, длина волны оптического сигнала, отражаемого от решетки, смещается согласно (1). Измеряя спектральное смещение отраженной длины волны, можно определить значение воздействующей на датчик температуры. Погрешность измерений ограничивается шириной спектральной линии отражения ВБР, чувствительностью спектроанализатора. Количество используемых ВБР определяется спектральной шириной источника

излучения, чувствительностью ВБР и требуемым диапазоном измерения температуры.

Сдвиг центральной длины волны отражения ВБР в зависимости от изменения температуры задается выражением [3]:

$$\delta\lambda_B = (\alpha + \xi)\lambda_B (T - T_n), \quad (2)$$

где α – результирующий температурный коэффициент линейного расширения структуры металл-волоконный световод; ξ – термо-оптический коэффициент; λ_B – брэгговская длина волны отражения при начальной комнатной температуре, $\lambda_B=1550$ нм; T_n – комнатная температура, $T_n = 20$ °С.

Термо-оптический коэффициент описывается формулой:

$$\xi = \frac{1}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial T}, \quad (3)$$

Температурную зависимость показателя преломления ВБР, сформированной в кварцевом оптоволокне с сердцевиной, легированной оксидом германия, аппроксимировали в виде:

$$n_e = 0,00194 \cdot \exp(T / 205,885 \text{ К}) + 1,46396. \quad (4)$$

В формуле (4) текущую температуру необходимо подставлять в Кельвинах.

Поскольку волоконно-оптические датчики температуры могут использоваться в космических аппаратах, важным фактором являются массогабаритные параметры. Показано, что толщина металлического покрытия не должна превышать 200 мкм, поскольку дальнейшее увеличение толщины не приводит к значительному возрастанию чувствительности датчика, однако увеличивает его массу, что учитывалось при дальнейших расчетах. В результате численного моделирования смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от 0 °С до +200 °С установлено, что наибольшей чувствительностью обладают решетки с алюминиевым покрытием. Зависимость сдвига брэгговской длины волны от температуры носит нелинейный характер и для алюминиевого покрытия чувствительность составляет 37 пм/°С в диапазоне температур 0–100 °С, что в 4,6 раз превосходит чувствительность ВБР с полимерным покрытием (8 пм/°С) и 58,8 пм/°С в диапазоне +120–200 °С, что в 3,4 раза превосходит ВБР с полимерным покрытием. При моделировании смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от –140 °С до 0 °С показано, что для указанного диапазона максимальная чувствительность увеличивается в 4 раза при использовании алюминиевого покрытия.

Из полученных зависимостей следует, что металлизирование ВБР приводит к увеличению чув-

ствительности температурного датчика, что снижает требования к ширине спектра отражения ВБР и разрешающей способности спектроанализаторов при сохранении требуемой точности измерения. С другой стороны, расширение интервала сдвига брэгговской длины волны излучения в зависимости от изменения температуры приводит к уменьшению количества решеток, которые можно мультиплексировать в пределах ширины спектра излучения оптического источника в 3,5 раза при выполнении условия отсутствия наложения спектров соседних ВБР при их смещении во всем измеряемом интервале температур.

Литература

1. On-line temperature measurement of fiber Bragg gratings inside a fiber laser / Z. Zhoua [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2018. – V. 45, № 7. – P. 137–140.
2. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки / Д. А. Коннов [и др.] // *Оптический журнал*. – 2024. – Т. 91. – № 5. – С. 66–71.
3. Li, Y. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process / Y. Li, K Yang., X. Li // *Optical Fiber Technology*. – 2018. – V. 45, № 9. – P. 368–375.

УДК 621.327

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СПЛОШНОГО СПЕКТРА

Потапенко А. О.

*ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Работа посвящена экспериментальным исследованиям излучательных характеристик в бактерицидной области спектра открытых короткодуговых сильнотоочных разрядов в ксеноне. Экспериментальные исследования радиационных характеристик разряда выполнены в диапазонах давления ксенона от 2 до 6 атм, электрических энергий от 0,2 до 2,0 Дж при рабочих напряжениях на электродах от 0,9 до 3,3 кВ, межэлектродных зазорах 4 и 6 мм. Определены режимы разряда, обеспечивающие выход излучения в спектральной области 200 – 300 нм, до 14% от вложенной в разряд энергии.

Ключевые слова: сильнотоочный разряд, ксенон, короткодуговая лампа, бактерицидное УФ излучение, плазменный канал.

A HIGHLY EFFICIENT PULSED GAS-DISCHARGE SOURCE OF CONTINUOUS-SPECTRUM ULTRAVIOLET RADIATION

Potapenko A.

*Scientific and Industrial Enterprise Melitta, Ltd.
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The paper is devoted to experimental studies of the radiative characteristics in the bactericidal range of the spectrum of unlimited short-arc high-current discharges in xenon. Experimental studies of the radiation characteristics of the discharge were performed in the ranges of xenon pressure from 2 to 6 atm, electrical energies from 0.2 to 2.0 J at operating voltages at electrodes from 0.9 to 3.3 kV, interelectrode gaps of 4 and 6 mm. Discharge modes that provide radiation output in the spectral range of 200-300 nm, up to 14% of the energy invested in the discharge have been determined.

Keywords: high-current discharge, xenon, short-arc flashlamp, biocidal UV-radiation, plasma channel.

Адрес для переписки: Потапенко А. О., ул. Миклухо-Маклая, д. 16, г. Москва 10117997, Российская Федерация, e-mail: alexeu1999pt@gmail.com

В настоящее время ультрафиолетовые источники сплошного спектра (импульсные ксеноновые лампы и ртутные лампы среднего давления) широко применяются для обеззараживания различных объектов и деструкции органических загрязнителей в воде и воздухе [1, 2]. Наибольшее распространение получили лампы трубчатой геометрии с различной конфигурацией плазменного канала. Основным недостатком такого типа ламп является ограничение удельной мощности плазменного канала, которая определяет его радиационные характеристики, связанное с ускоренной

деградацией кварцевой оболочки и ее преждевременным разрушением.

Свободно расширяющийся плазменный канал позволяет многократно увеличить удельную мощность, что должно обеспечить формирование импульсной дуги с оптимальными значениями плотности и температуры плазмы, для генерации УФ-излучения в требуем спектральном интервале, определяемом фотохимическими прикладными задачами.

Методика и аппаратура. Исследования проводились с экспериментальными образцами ко-