ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 78-82

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 535.417.24

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЦЕЛЬНОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЗДАННОГО ПРИ ПОМОЩИ ЭФФЕКТА ПЛАВЛЕНИЯ¹

© 2020 г. Ю. А. Конин^{*a*,*}, М. И. Булатов^{*a*,*b*}, В. А. Щербакова^{*c*}, А. И. Гаранин^{*d*}, Я. Д. Токарева^{*d*}, Е. В. Мошева^{*a*}

^а Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК) Россия, 614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106 ^b Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

^с Пермский государственный национальный исследовательский университет Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^d Университет информационных технологий, механики и оптики Россия, 196135, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49

> *e-mail: yuri-konin@yandex.ru Поступила в редакцию 10.02.2020 г. После доработки 09.03.2020 г. Принята к публикации 10.03.2020 г.

Исследуется температурная чувствительность цельноволоконного датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления. С целью изучения зависимости был разработан и собран специальный макет для проверки чувствительности датчиков к изменению температуры. При проведении экспериментов получены температурные зависимости спектрального сдвига для датчика в диапазонах температур 30–90°С и 20–320°С. В ходе исследования был получен график зависимости спектра от температуры и построен калибровочный график. Таким образом, определена температурная чувствительность датчика, которая составила $\approx 16 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}$ С. Получены результаты прочности световода в акрилатном покрытии до и после испытаний с помощью метода осевого растяжения. Обнаружено, что предельная прочность световода ухудшается более чем в 2 раза при воздействии высокой температуры.

DOI: 10.31857/S003281622004028X

введение

Волоконно-оптические датчики благодаря своим положительным характеристикам находят широкое применение в различных областях производства, науки, медицины и т.д. Так как возрастает потребность в датчиках физических величин (давления, температуры, деформации, показателя преломления), возрастают и требования, которые предъявляются к измеряющему устройству. Датчики должны быть надежны, помехоустойчивы, долговечны, а также иметь простое управление. Исследования, проводимые в агрессивных средах, предъявляют особые требования к датчику, поскольку даже небольшие изменения состояния среды (давления и температуры) могут привести к существенным погрешностям или вывести сам датчик из строя.

Данная работа посвящена исследованию широкодиапазонного датчика температуры. Датчик сформирован в сердцевине оптического световода. Задачами исследования являются: измерение температурной чувствительности датчика и его прочностных свойств.

ЭФФЕКТ ПЛАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Существует негативный эффект, который серьезно ограничивает работу световодов в линиях связи — это разрушение волоконных световодов под действием оптического излучения интенсивностью ≥1 MBт/см² (при условии дополнительного инициирования процесса) [1]. В зарубежной литературе оно обозначается как catastrophic

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).



Рис. 1. Структура датчиков, созданных с помощью эффекта плавления: **a** – датчик температуры, созданный в рамках описанного эксперимента; **б** – датчик гидростатического давления, созданный коллективом из Авейрусского университета (Universidade de Aveiro, Portuguese Republic) [4].

damage (катастрофическое повреждение) или Fuse-effect ("эффект плавления").

Внешне явление выглядит следующим образом: если в одномодовый световод вводится лазерное излучение порядка 1 Вт, то при определенных условиях (при инициировании) в области сердцевины световода (масштаб ~1 мкм) возникает область яркого белого или голубоватого свечения (искра), которая движется навстречу лазерному излучению по световоду со скоростью ~1 м/с. В сердцевине световода после "пробегания" искры в большинстве случаев образуются микрополости (или пузыри, или каверны) размерами несколько микрометров, причем полости иногда могут формировать периодическую структуру вдоль сердцевины световода или сливаться в один длинный капилляр [2]. При этом волноводные свойства световода полностью разрушаются.

Процесс может быть инициирован разными способами, например загрязнением торца световода, контактом торца световода с металлической поверхностью [3], нагреванием участка световода в электрической дуге. В любом случае требуется нагрев участка волокна до температуры порядка 1000 К [4].

Одним из применений данного эффекта является создание различных оптических датчиков, которые могут работать в экстремальных средах. Известно, что волоконная брэгговская решетка разрушается при температуре ~550°C, следовательно, для измерения высоких температур не подходят датчики на основе решеток. Существуют оптические датчики на основе интерферометра Фабри-Перо, которые получают методами механической или химической обработки и далее склеиванием чувствительного элемента и оптического волокна [5, 6]. Такие датчики не отвечают требованиям компактности и требуют дополнительной защиты от внешних воздействий. Для получения компактного датчика, который сможет работать при высоких температурах, но при этом иметь химическую стойкость и малые размеры, можно воспользоваться эффектом плавления волокна. Подробный способ создания датчиков в сердцевине волокна был рассмотрен авторами в предыдущих публикациях [7, 8]. Датчики, созданные с помощью этого эффекта, показаны на рис. 1.

Структура такого датчика представляет собой микропустоты, расположенные вдоль сердцевины волокна. Эти микропустоты являются интерферометрами Фабри–Перо, и на их основе можно создавать датчики различной конфигурации [9]. Температурная чувствительность датчиков на основе микропустот составляет 10 млн⁻¹/°C [10].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения температурной чувствительности был собран экспериментальный стенд. Термочувствительная часть волоконного световода помещена в термокамеру ШС-80-01. Микрополость сформирована в одномодовом радиационно-стойком световоде и представляет собой термочувствительный интерферометр Фабри-Перо. Световод помещен на резиновую подложку и зафиксирован скотчем в свободной укладке, без натяжения.

Температура менялась от 30 до 90°С с шагом 10° С в первом эксперименте и от 20 до 320° С с шагом 30° С – во втором. Чтобы снять отраженный сигнал от термочувствительного датчика, была собрана схема лабораторного интеррогатора, которая состоит из волоконного объединителя 2×2 с коэффициентом деления 80/20%, широкополосного источника излучения EXFO FLS-5800, спектроанализатора Yokogawa AQ6319. Схема экспериментального стенда для измерения термочувствительности датчика представлена на рис. 2.

В дальнейшем отраженный спектр анализируется в пакете Matlab, спектральный сдвиг определяется по минимумам.

Эксперимент проводился на волокне с акрилатным покрытием. Так как при температуре вы-



Рис. 2. Схема установки по измерению термочувствительности. Термокамера – ШС-80-01, волоконный объединитель 2 × 2 – с коэффициентом деления 80/20%, источник излучения – EXFO FLS-5800, спектроанализатор – Yokogawa AQ6319.

ше 90°С происходит повреждение защитного покрытия, то необходима оценка его прочностных характеристик. Для проверки предельной прочности световода использовали разрывную машину Instron 5960, принцип работы которой объясняет рис. 3. Образец световода удерживался вертикально и наматывался на кабестаны с обоих концов, для уменьшения проскальзывания применялся широкий скотч. Расстояние между кабестанами составляло 500 мм, световод вытягивался вертикально с постоянной скоростью (100 мм/мин). Разрушающее напряжение регистрировалось во время разрыва световода. В работах [11, 12] приведены результаты зависимости предельной прочности световодов от влажности помещения, поэтому вся установка располагалась в контролируемой окружающей среде (относительная влажность $50 \pm 5\%$, температура $23 \pm 2^{\circ}$ С).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство медицинских волоконных зондов для измерения температуры имеет диапазон измерения от 20 до 90°С, кроме того используемые в эксперименте волокна имели акрилатное покрытие, которое разрушается при температуре >90°С. Поэтому в первом эксперименте было решено измерить поведение термочувствительного волокна в диапазоне 30-90°С с шагом 10°С.

На рис. 4 продемонстрирован спектр отражения интерферометра Фабри–Перо, анализ смещения спектра будем проводить по минимумам спектра, которые выделены ромбовидным маркером. На рисунке исходный спектр отражения отмечен штриховой линией, после нагрева до 40°С спектр сместился на 140 пм, и он отмечен сплошной линией. Из этого можно сделать вывод, что с повышением температуры происходит смещение спектральной картины в инфракрасную область.



Рис. 3. Схематическое изображение осевого растяжения.

При нагреве еще на 10°С наблюдается дальнейшее смещение спектра в инфракрасную область. Как видно из рис. 5, весь спектр претерпевает смещение, кроме того наблюдаются небольшие колебания мощности сигнала, это может быть связано с тем, что спектр источника излучения имеет параболическую форму, и огибающая отраженного сигнала также представляет собой параболу.

При дальнейшем нагреве спектр сдвигается уже на период от первоначального, на рис. 6 отраженный спектр при 60°С обозначен графиком с пунктирной линией.

При дальнейшем увеличении количества графиков увеличивается сложность обработки ин-



Рис. 4. График отражения интерферометра Фабри– Перо при нагреве от 32 до 40°С. Маркером отмечен спектральный минимум.



Рис. 5. График отражения интерферометра Фабри– Перо при нагреве от 32 до 50°С. Маркером отмечен спектральный минимум.

формации из-за наложения большого количества графиков друг на друга, поэтому удобнее строить графики в виде тепловой карты, где по оси абсцисс отложены значения температур, а по оси ординат значения длины волны (рис. 7).

Сдвиг спектра микрополости определяется по минимуму в диапазоне длин волн 1537—1539 нм. Зависимость сдвига спектра носит характер, близкий к линейному. Расчетная чувствительность датчика в этом случае составила 15.7 ± 0.7 млн⁻¹/°С.



Рис. 6. График отражения интерферометра Фабри– Перо при нагреве от 32 до 60°С. Маркером отмечен спектральный минимум.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 4 2020



Рис. 7. Тепловая карта отраженного спектра интерферометра Фабри–Перо при нагреве от 30 до 90°С. Светлые области – значения минимумов, темные – максимумов.

Далее была проверена возможность датчика температуры регистрировать изменения спектра в гораздо более широком диапазоне температур. График отражения излучения интерферометра Фабри–Перо при нагреве от 30 до 80°С представлен на рис. 8.

Сдвиг спектра микрополости определяется по минимуму в диапазоне длин волн 1537—1541 нм. Зависимость сдвига спектра носит характер, близкий к линейному [13, 14]. Чувствительность датчи-



Рис. 8. График отражения интерферометра Фабри– Перо при нагреве от 30 до 80°С. Маркером отмечен спектральный минимум.

КОНИН и др.

ка в этом случае составила 13.6 ± 0.7 млн⁻¹/°С. В случае с большим шагом в измерениях при анализе отраженных спектров возникают сложности в определении максимумов и минимумов отраженного спектра, поэтому рекомендуется строить двумерные теплограммы, в которых визуально проще определять сдвиг спектра, или пользовать-ся фурье-преобразованиями при его анализе.

После выдержки световода при температуре 320° С его защитное покрытие изменило цвет и стало "черным". Это связано с деструкцией акрилата, так как его рабочая температура находится в диапазоне от -40 до $+85^{\circ}$ С. Поэтому световоды для применения в экстремальных средах часто покрываются материалами, способными выдерживать высокие рабочие температуры. Одним из таких материалов является полиимид, его превосходные свойства термостойкости [15], высокой адгезии к кварцу и твердости позволяют использовать световоды при температуре $300-350^{\circ}$ С.

До испытаний световод имел предельную прочность ~5.84 ГПа, а после ~270 ГПа. Предельная прочность до испытаний отлично коррелирует с литературными данными ~5.40 ГПа [16] и ~5.10 ГПа [17]. Таким образом, акрилатное покрытие не подходит под такие задачи, целесообразно акцентировать внимание между полиимидным и металлическим защитно-упрочняющим покрытиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования создан макет для проверки чувствительности датчиков к изменению температуры. При проведении экспериментов были получены температурные зависимости спектрального сдвига для датчика в диапазонах температур 30–90°С и 20–320°С.

В результате исследования характеристик одномодового радиационно-стойкого рассеивателя получены калибровочные графики зависимости спектра от температуры и определена температурная чувствительность, которая составила 15.7 ± 0.7 млн⁻¹/°С в сравнении с решетками Брэгга, имеющими чувствительность ~12 млн⁻¹/°С.

Предельная прочность световода в акрилатном покрытии после испытаний уменьшилась, поэтому для долговечности датчика необходимо использовать в качестве покрытия полиимид или металлы. В дальнейшем планируется изучить датчик на основе волокна, покрытого полиимидным и металлическим покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Буфетов И.А., Дианов Е.М.//УФН. 2005. Т. 175. С. 100. https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200501g.0100
- 2. *Kashyap R.* // Proc. Xth Inter. Conf. on Lasers. 7–11 Dec. 1987. Lake Tahoe, Nevada, USA. 1987. P. 859.
- Kashyap R., Blow K.J. // Electronics Lett. 1988. V. 24 (1). P. 47.
- 4. Дианов Е.М. // УФН. 2004. Т. 174. С. 1139. https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200410m.1139
- Hand D.P., Russell P.S.J. // Opt. Lett. 1988. V. 13 (9). P. 767.
- Pinet É. // J. Sensors. 2009. Article ID 720980. https://doi.org/10.1155/2009/720980
- Domingues M.F., Paixão T.B., Mesquita E.F.T., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S., Varum H., Antunes P.F.C. // IEEE Sensors J. 2015. V 15. P. 5654. https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2446534
- Dominguesa M.F., Paixãob T., Mesquitac E., Albertoa N., Antunesa P., Varumc H., Andréf P.S. // Proc. of SPIE. 2015. V. 9634. P. 96345M. https://doi.org/10.1117/12.2195066
- Liao C.R., Hu T.Y., Wang D.N. // Opt. Express. 2012. V. 20. Issue 20. P. 22813. https://doi.org/10.1364/OE.20.022813
- De-Wen Duan, Yun-jiang Rao, Yu-Song Hou, Tao Zhu // Appl. Optics. 2012. V. 51(8). P. 1033. https://doi.org/10.1364/AO.51.001033
- 11. *Mrotek J.L., Matthewson M.J., Kurkjian C.R.* // J. Lightwave Technology. 2001. V. 19. № 7. P. 988.
- 12. Semjonov S.L., Glaesemann G. S., Clark D.A., Bubnov M.M. // Proc. SPIE. 2004. V. 5465. P. 61.
- Shcherbakova V.A., Starikov S.S., Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I. // Proceedings of the 2019 – IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2019. P. 914. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657220
- Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I., Turin S.F., Shcherbakova V.A. // Proceedings of the 2019 – IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2019. P. 897. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656714
- Biswas D.R. // Opt. Engineering. 1992. V. 31. № 7. P. 1400. https://doi.org/10.1117/12.60246
- Stolov A.A., Simoff D.A., Jie Li // J. Lightwave Technology. 2008. V. 26. № 20. P. 3443.
- Delobelle B., Placet V., Chapelle D., Thiebaud F., Perreux D., Ferriere R. // J. Lightwave Technology. 1989. P. 1360.