УДК 681.7.068

Ю.А. Конин, А.И. Гаранин, А.В. Перминов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рассматривается метод голографической интерферометрии как средство для анализа оптических свойств и внутренней структуры оптических волокон и заготовок для их производства. Приводятся характеристики используемого оборудования и описывается методика проведения эксперимента. На основании экспериментальных данных изучены возможности метода и обоснована возможность его применения.

Ключевые слова: голография, неразрушающий контроль, оптические волокна, преформы, голографическая интерферометрия, «Панда».

Iu.A. Konin, A.I. Garanin, A.V. Perminov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEFECTOSCOPY OF OPTICAL FIBERS AND PREFORMS BY METHOD HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

In this article describes a method of holographic interferometry, as a means of analysis of optical fibers and preforms, provides an overview of literature sources. Describes the experimental setup and the equipment used. Presents the results of the experiment and the possibilities of this method.

Keywords: holography, non-destructive testing, optical fibers, preforms, holographic interferometry, Panda.

Развитие технологии изготовления оптических волокон вызвало необходимость создания аппаратуры и разработки методик для контроля качества световодов в процессе их изготовления и эксплуатации. Основными параметрами, подлежащими контролю, являются: диаметр волокон, натяжение при вытягивании волокон, температура в зоне формирования волокна, распределения показателя преломления в готовых волокнах.

Проблема контроля качества оптических волокон является актуальной. Существующие методики позволяют определять дефекты

сердцевины и оболочки. Но мелкие дефекты оболочки и флуктуации показателя преломления с помощью традиционных методов определить очень проблематично. Данные дефекты могут проявиться при прокладке кабеля и оказать негативный эффект на распространяющееся излучение.

Эффективными методами в дефектоскопии прозрачных объектов являются когерентно-оптические методы. В данных методах для анализа объекта используются два волновых фронта – объектный и опорный. Один из пучков пропускается через объект, а другой идет без изменений, далее пучки интерферируют на экране. Среди когерентно-оптических методов наиболее известен метод голографической интерферометрии. Данный метод предполагает сравнение эталонной голограммы объекта с голограммой нагруженного объекта, что позволяет визуализировать напряжения, области сжатия или расширения и структуру нагруженного объекта.

В работе [1] анализируются основные принципы голографической микроскопии, которые возможно применять, например, для изучения живых клеток или поверхностей твердых тел. Важным преимуществом голографической микроскопии является возможность регистрировать объекты размером до $\lambda/100$.

Цифровая обработка голограмм объектов позволяет получить дополнительную информацию об изменениях их внутренней структуры и оптических характеристик. Об основных положениях, методах и математических приемах цифровой голографии говорится в работе [2]. Источником информации о профиле показателя преломления и скрытых дефектах в образце могут служить спекл-интерферограммы, которые по сути своей являются специфическими голографическими изображениями объектов. В диссертации Т.В. Мироновой [3] рассматриваются возможности цифровой обработки данных таких голограмм. В работе [4] описываются различные оптические голографические схемы, применяемые в дефектоскопии твердых тел.

В статьях японских авторов [5, 6] приводится простая схема портативного голографического микроскопа и программное обеспечение, позволяющие проводить исследования методами голографической интерферометрии в реальном времени. Кроме того, в этих работах обосновывается экономическая эффективность голографической микроскопии по сравнению с обычными оптическими методами.

В отличие от классической интерферометрии в методе голографической интерферометрии осуществляется интерференция волн, прошедших по одному пути, но в разные моменты времени. Изменения в объекте, произведенные между экспозициями, обуславливают характер интерференционной картины. Данный метод нечувствителен к оптическим дефектам и несовершенствам установки, что позволяет использовать дешевые оптические элементы в ее составе и изучать как микро-, так и макрообъекты.

В работе изучалась возможность применения методов голографической интерферометрии для исследования дефектов, возникающих при прокладке, эксплуатации и производстве оптических волокон. Проводился анализ голограмм области сварного соединения двух волокон. Для создания голографических интерферограмм применялись пропускающие оптические схемы.

1. Описание экспериментальной установки и оптической схемы

Исследование проводилось на лабораторной голографической установке, в комплект которой входят плоское зеркало, светоделительная пластина, GeNe-лазер мощностью 1 мВт и излучением с длиной волны 633 нм, сферические линзы для расширения световых пучков, держатели образцов и фотоматериалов. Для исключения влияния механических воздействий на процесс голографирования оптическая схема собиралась на мраморной плите размером 60×40 см и весом 80 кг, которая помещалась на накачанную воздухом резиновую камеру. Для исключения влияния конвективных потоков воздуха и поддержания постоянной температуры рабочая область накрывалась деревянным кожухом. В качестве регистрирующей среды использовались прозрачные галогенидосеребряные фотопластинки с чувствительностью 5000 линий/мм. При химической обработке фотоматериалов применялись химические реактивы: проявитель PAPER Developer, закрепитель SuperFix Plus, а также нитрат железа и бромистый калий, которые использовались для приготовления осветлителя. Во всех экспериментах регистрировалась фазовая голограмма объекта.

Для реализации метода голографической интерферометрии была выбрана оптическая схема Лейта [4], показанная на рис. 1. Луч лазера 1, проходя через светоделительную пластину 2, разделялся на два луча: объектный (предметный) и опорный (референтный). Объектный луч

расширялся сферической линзой 3, проходил через прозрачный исследуемый объект 4 и падал на регистрирующую среду (РС). Опорный луч посредством зеркала 5 и сферической линзы 6 также направлялся на регистрирующую среду (РС). Характерные расстояния между элементами оптической схемы указаны на рис. 1.

Рис. 1. Оптические схемы записи (а) и восстановления (б) голограммы объекта: 1 – лазер; 2 – светоделительная пластинка; 3 – собирающая линза; 4 – образец; 5 – зеркало

Испытанию подвергались образцы одномодового оптического волокна типа «Панда» и заготовки для вытягивания оптических волокон указанного типа. Экспозиция исследуемых объектов производилась без светофильтра. Характерные временные режимы различных этапов изготовления голограммы приведены ниже:

Этап	экспозиция	проявление	осветление	закрепление
Временной интервал	2–3 с	20–25 с	не более 2 с	120 с

3. Исследование сварного соединения оптических волокон

Первым объектом для исследований в нашей работе послужило одномодовое оптическое волокно типа «Панда». При прокладке оптоволоконных линий неизбежно приходится соединять (сваривать)

отдельные куски оптических волокон. Места сварки волокон являются источником неоднородностей, например показателя преломления, влияющих на качество передачи сигнала по линии. Поэтому актуальной проблемой является неразрушающий контроль качества места сварки.

Сварное соединение двух однотипных волокон перед голографированием было сфотографировано при 20-кратном увеличении через оптический микроскоп. Фотография сварного соединения приведена на рис. 2.

Рис. 2. Фотография сварного соединения при 20-кратном увеличении

На рис. 2 в области соединения волокон видно слабо различимое размытое темное пятно диаметром примерно 20 мкм, которое указывает на возникшие в результате сварки неоднородности среды. Однако обычные оптические наблюдения, даже при многократном увеличении, не дают четкой информации, например, об истинных размерах возникающей при сварке волокна области оптической деформации.

На следующем этапе эксперимента производилось голографирование сварного соединения с использованием оптической схемы, представленной на рис. 1. Времена экспозиции и постэкспозиционной обработки голограммы выбирались согласно вышеприведенной таблице временных интервалов этапов изготовления голограмм.

После экспозиции и обработки фотопластинка с записанной на ней интерференционной картиной исследовалась при 4-кратном увеличении с помощью оптического микроскопа. Вид интерференционной картины, зафиксированной на регистрирующей среде, представлен на рис. 3, а. Также изучалась восстановленная в белом свете голограмма сварного соединения, фотография которой представлена на рис. 3, б. Оптическая схема восстановления голограммы представлена на рис. 1, б.

Рис. 3. Интерферограмма (а) и восстановленная в белом свете голограмма (б) сварного соединения при 4-кратном увеличении; границы волокна выделены штрихом

Рабочее сечение волокна на рис. 3, а имеет более светлый вид и ограничено толстыми черными полосами. На рис. 3, б рабочее сечение имеет вид черной горизонтальной полосы. Интерферограмма и голограмма дают четкое изображение сварного соединения, которое проявляется в виде искажения продольных относительно оси волокна интерференционных полос. Наличие на рис. 3 крупномасштабных поперечных к волокну интерференционных полос связано с различными помехами, присутствующими в эксперименте. Видно, что в области сварного соединения существенно нарушена однородность оптических свойств волоконной линии (в случае фазовой голограммы фиксируется неоднородность показателя преломления). Размер области деформации оптических свойств в продольном и поперечном сечениях волокна сравним с его диаметром.

Таким образом, голографический метод позволяет быстро и точно определять положение, размеры и характер дефектов в оптическом волокне, толщина которого не превышает 100 мкм, и не требует использования оптических приборов (микроскопов) с высокой степенью разрешения.

3. Механическое воздействие на заготовку для вытяжки оптических волокон

Следующим объектом для изучения послужила заготовка для производства волокна типа «Панда». Размеры исследуемой заготовки (рис. 4): диаметр 26,5 мм, высота 135 мм, диаметр технологического отверстия 6,9 мм, размер области 4 – 3,1 мм, диаметр сердцевины 2 мм.

На рис. 4, *а* показан вырезанный из заготовки цилиндрический образец, состоящий из кварцевого стекла с двумя просверленными параллельно друг другу технологическими каналами. В центре образца имеется сердцевина из легированного кремния, которая на рис. 4, *а* обведена эллипсом и обозначена 4.

После вытяжки оптического волокна из данной преформы (заготовки) излучение в нем будет распространяться по рабочей области, которая получается из легированной кремнием сердцевины. Именно сердцевина является предметом наших исследований. Для избегания оптических потерь в готовом волокне очень важно контролировать параллельность осей технологических каналов и сердцевины.

Рис. 4. Заготовка для вытяжки оптического волокна: *а* – внешний вид экспериментального образца: 1 – лучи, ограничивающие объектный пучок, 2 – технологическое отверстие, 3 – место крепления анкерного болта, 4 – исследуемая область (обведена эллипсом); *б* – интерферограмма области 4: 1 – промежуток между сердцевиной и технологическими каналами, 2 – сердцевина, 3 – технологические отверстия

При производстве волокна типа «Панда» в технологические каналы преформы помещают так называемые нагружающие стержни или сердечники из стекла. Затем заготовку отправляют на вытяжку. В процессе вытяжки нагружающие стержни создают постоянное напряжение в сердцевине, необходимое для получения анизотропии оптических свойств рабочей области волокна. Излучение, идущее по такому волокну, сохраняет заданное состояние поляризации.

В эксперименте изучалось влияние механической нагрузки на сердцевину преформы, создаваемой с помощью анкерного болта диаметром 6,5 мм. Болт вводился на глубину до 1 см в один из каналов преформы и затягивался на два оборота (см. рис. 4, а). Численное значение величины созданных напряжений не фиксировалось.

Рис. 5. Результаты голографирования преформы для вытяжки оптического волокна типа «Панда»: 1 – промежуток между сердцевинной и технологическими каналами, 2 – сердцевина, 3 – технологические отверстия; а – ненагруженная заготовка; б – заготовка при наличии механической нагрузки; в – заготовка через 15 мин после снятия нагрузки

Просвечивание заготовки производилось рассеянным лазерным излучением через ее боковую поверхность. Направление падающих на преформу лучей света показано на рис. 4, *а*. Диаметр объектного луча в месте крепления исследуемой преформы не превышал суммарный диаметр технологических отверстий и ширину сердцевины (см. рис. 4, *а*). При выбранном ракурсе тень от технологических отверстий для нагружающих стержней не перекрывает интерференционную картину, кроме того, обеспечивается возможность контроля параллельности осей технологических отверстий и сердцевины заготовки.

Прозрачная преформа преломляет свет аналогично цилиндрической линзе с фокусом 3 см, поэтому на экране мы наблюдаем перевернутое и увеличенное изображение сердцевины на фоне геометрической тени, которую дают слабо пропускающие свет технологические каналы. На рис. 4, *б* показан вид интерферограммы, которая зафиксирована на регистрирующей среде после голографирования заготовки. Запись и восстановление голограммы производится на основании оптических схем, приведенных на рис. 1.

На начальной стадии эксперимента проводилось голографирование сердцевины заготовки при отсутствии анкерного болта в технологическом отверстии, т.е. нагрузка на преформу отсутствовала. Фотографии интерферограмм ненагруженного состояния исследуемого образца показаны на рис. 4, *б* и рис. 5, *а*. Они представляют собой систему интерференционных полос, которые параллельны осям технологических каналов и сердцевины преформы. Крайние, самые светлые участки итерферограмм, отмеченные на рис. 4, *б* и рис. 5 цифрой 1, представляют собой изображения технологических отверстий. Далее, ближе к центру, расположены темные области 2, которые являются интерференционными изображениями промежутков между сердцевиной и технологическими отверстиями. В центре интерферограмм располагается сердцевина 3.

Результат голографической съемки нагруженного образца представлен на рис. 5, *б*. На фотографии четко видно нарушение параллельной структуры интерференционных полос в области, примыкающей к эпицентру нагрузки. Изменения в интерференционной картине распространяются от края технологического отверстия, где приложена механическая нагрузка, внутрь сердцевины практически на всю ее толщину. При механической деформации образца, очевидно, появляется паутинообраз-

ная система микротрещин, приводящая к изменению показателя преломления среды, что и фиксируется фазовой голограммой.

На третьем этапе эксперимента анкерный болт удалялся из нагруженного образца. Из интерферограммы, приведенной на рис. 5, в, следует, что после снятия нагрузки происходит релаксация распределения показателя преломления в образце к исходному состоянию. Система интерференционных полос вновь становится параллельной. Такая релаксация, очевидно, возможна только в случае небольших нагрузок, не приводящих к необратимым изменениям в образце.

Заключение

В настоящее время для проверки качества волокна и геометрии преформ используются приборы, принцип действия которых аналогичен работе томографа. Такие приборы, где заготовка послойно сканируется лазерным лучом, можно встретить, например, на производственных линиях Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК). Время сканирования каждой заготовки, согласно данным ПНППК, составляет около 2 ч.

Главное отличие и преимущество предложенного в данной работе голографического метода состоит в его простоте и гибкости применения. В ходе съемки можно достаточно легко изменять параметры оптической схемы, что позволит производить сканирование различных частей образца или всего образца целиком. Также преимуществом является быстрое время сканирования. При реализации голографического метода дефектоскопии нет необходимости использовать дорогостоящие приборы и материалы. При помощи цифровой обработки голограммы можно получить данные о профиле показателя преломления исследуемой заготовки.

К недостаткам метода можно отнести то, что процесс голографической съемки объектов чувствителен к внешним воздействиям, таким как вибрации установки, конвективные движения воздуха и т.д. Однако большая часть внешних помех является достаточно легко устранимой.

В данной работе показано, что голографический метод позволяет визуализировать плохо различимые дефекты волокна и может быть применен в дефектоскопии оптических изделий. С помощью этого метода можно фиксировать даже незначительные изменения показателя преломления, т.е. более точно строить профиль показателя преломле-

ния в рабочей области оптического волокна. Изучение голограмм прозрачных объектов позволяет увидеть свили, механические напряжения, волны сжатия и расширения. Применение метода для контроля качества прозрачных объектов является инновационным и поможет вывести промышленную дефектоскопию на более качественный уровень. Данный метод планируется апробировать на базе Пермской научно-производственной приборостроительной компании. В будущем этот метод поможет сократить время проверочных процедур и повлиять на количество брака в готовой продукции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта № 14-42-08009 p_офи_м.

Список литературы

1. Kemper B., Langehanenberg P., Bally von G. Digital Holographic Microscopy. A New Method for Surface Analysis and Marker-Free Dynamic Life Cell Imaging // *Optic & Photonic*. – 2007. – № 2. – P. 41–44.
2. Schnars U., Jupter W. Digital holography. – Berlin: Springer-Verlag, 2005.
3. Миронова Т.В. Анализ деформаций, оптических неоднородностей и дисторсионных искажений с помощью искусственных спеклов в цифровой фотографии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2012.
4. Цифровая голографическая интерферометрия микродеформаций рассеивающих объектов / О.В. Диков, С.А. Савонин, В.И. Качула, О.А. Перепелицина, В.П. Рябухо // *Известия Саратовского университета*. – 2012. – Т. 12. – Сер.: Физика, вып. 1. – С. 12–17.
5. Handheld and low-cost digital holographic microscopy / A. Shiraki, Y. Taniguchi, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito // *Physics & Optics*. – 2012.
6. Shimobaba T., Masuda N., Ito T. Multi-view and multi-resolution real-time digital holographic microscopy // *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. – 2010.

References

1. Kemper B., Langehanenberg P., Bally von G. Digital Holographic Microscopy. A New Method for Surface Analysis and Marker-Free Dynamic Life Cell Imaging. *Optic & Photonic*, 2007, no. 2, pp. 41-44.

2. Schnars U., Jupter W. Digital holography. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

3. Mironova T.V. Analiz deformatsii, opticheskikh neodnorodnostei i distorsionnykh iskazhenii s pomoshch'iu iskusstvennykh speklov v tsifrovoi fotografii [Analysis of deformation of optical inhomogeneities and distortion distortion using artificial speckle in digital photography]. Thesis of Ph.D.'s degree dissertation, Moscow, 2012.

4. Dikov O.V., Savonin S.A., Kachula V.I., Perepelitsina O.A., Riabukho V.P. Tsifrovaia golograficheskaya interferometriya mikrodeformatsii rasseivaiushchikh ob"ektov [Digital holographic interferometry of microdeformations of the scattering objects]. *Izvestiia Saratovskogo universiteta*, 2012, vol. 12, *Seriia "Fizika"*, iss. 1, pp. 12-17.

5. Shiraki A., Taniguchi Y., Shimobaba T., Masuda N., Ito T. Hand-held and low-cost digital holographic microscopy. *Physics & Optics*. 2012.

6. Shimobaba T., Masuda N., Ito T. Multi-view and multi-resolution real-time digital holographic microscopy. *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. 2010.

Получено 4.06.2015