

07;12
©1995 г.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОДНОЖИЛЬНЫХ СВЕТОВОДОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВЫТЯЖКЕ

В. Н. Ильин

Институт электроники АН Беларуси,
220841, Минск, Беларусь
(Поступило в Редакцию 18 февраля 1994 г.
В окончательной редакции 28 июня 1994 г.)

Рассмотрен интерференционный способ контроля протяженных цилиндрических объектов, заключающийся в измерении кривизны поверхности объекта с локальностью, равной единицам или десяткам микрометров и соответствующей периоду предметной интерференционной полосы, сформированной сходящимися на объекте когерентными пучками. Способ позволяет определять любые отклонения формы объекта в поперечном сечении от круглости. Приведены основные аналитические выражения для расчета радиуса кривизны локального участка поверхности объекта.

Действительные размеры протяженных цилиндрических объектов (ПЦО), какими являются одножильные световоды (ОС), оптические волокна (ОВ), оптические капилляры (ОК), могут быть более полно охарактеризованы, если будут известны не только диаметр, измеренный по одному направлению, но и погрешность формы (нецилиндричность, некруглость), найденные путем сканирования объекта по многим направлениям. В частности, отклонение от круглости находится как наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей окружности в поперечном сечении объекта.

Известные устройства для контроля диаметра и погрешностей формы ПЦО имеют либо вращающуюся вокруг объекта фотоэлектрическую головку, либо две ортогонально установленные проекционные системы [1-3].

Первые имеют подвижные детали, подверженные износу, требуют периодической регулировки и беспроводной передачи информации, обладая невысокими точностью и производительностью, сложны и громоздки. Вторые традиционно строятся путем простого умножения измерительных каналов с полным копированием всех узлов и элементов. Поэтому значительная сложность и высокая стоимость не способствовали широкому распространению многоканальных (более двух)

измерительных устройств. Кроме того, такое построение правомочно для контроля объектов, предварительно ориентированных на измерительной позиции относительно оптических осей датчиков. Для поточного производства, в частности, при непрерывной вытяжке ОВ, ОЖС или ОК вышеописанные устройства неэффективны, так как объект измерения, находясь в динамическом состоянии меняет свою ориентацию случайным образом.

Анализ размеров готовых ПЦО показал наличие различных сочетаний элементарных видов отклонений их формы в поперечном и продольном сечениях, включающих конусообразность, винтообразность, волнообразность в продольном направлении с некруглостью, овальностью и огранкой в поперечном сечении. Дать более достоверный результат в этом случае может только многоканальный (два, три и более каналов) метод измерения.

Нами предложен новый подход к контролю геометрических параметров ПЦО в процессе вытяжки, заключающийся не в измерении диаметра объекта, как это выполняется традиционно, а в измерении кривизны поверхности ПЦО с заданной или варьируемой локальностью. Основная идея способа заключается в том, что в передней фокальной плоскости ПЦО, рассматриваемого как цилиндрическая линза, формируется с помощью двух когерентных пучков света предметная интерференционная картина (ИК). Последняя передается им в плоскость анализа в прямом или отраженном излучении. ИК рассматривается как совокупность элементарных пучков света, которые, зондируя объект по индивидуальному пути, проецируются в определенной области цилиндрического экрана, установленного за ПЦО, т. е. каждый период предметной ИК преобразуется только той частью поверхности объекта, на которую он падает и через которую он преломляется, приобретая при этом новое значение периода.

Например, если предметная ИК имеет период $T = 2$ мкм, а диаметр световода $2b = 800$ мкм, то число полос, сформированных на цилиндрическом экране, будет около $N = 400 (2b/T)$. Каждый период ИК, как элементарный пучок, формируется своей двухмикронной областью поверхности ОС, поэтому, осуществляя сплошную или выборочную регистрацию интерференционных полос, можно с дискретностью 2 мкм исследовать кривизну поверхности контролируемого объекта. Изменения периода T возможны в пределах $\lambda/2 < T < b$, за счет корректировки угла сходимости освещающих пучков.

Рассматриваемый в работе способ позволяет без существенного изменения оптической схемы базового устройства [4,5], за счет введения дополнительных пар фотоприемников (или путем непрерывного сканирования всей ИК одной парой), иметь три и более измерительных каналов, при этом стоимость устройства, его сложность возрастают незначительно.

При оценке разрешающей способности способа необходимо дополнительно учитывать место положения фотоприемников и номер считываемой интерференционной полосы (считая от оси освещающего ОС пучка). Это связано с тем, что угол рассеяния излучения непостоянен и увеличивается по мере удаления падающего на ОС луча от центральной оптической оси.

Рассчитаем угол отклонения θ рассеянного луча в зависимости от места падения начального пучка на световод (рис. 1). Примем, что

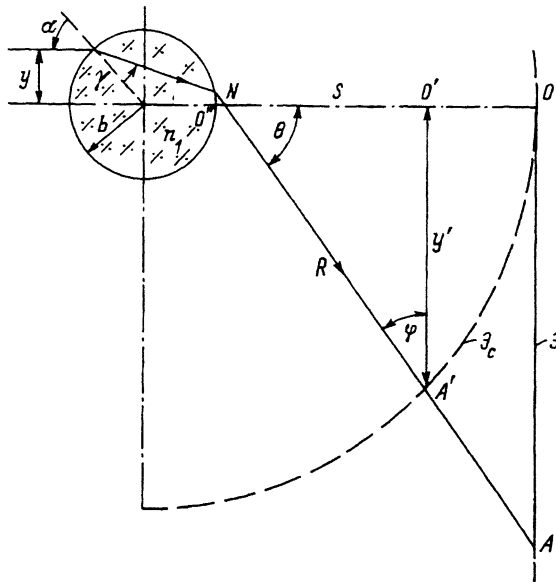


Рис. 1. Схема прохождения луча через одножильный световод.

$b \ll S = NO$ (на рис. 1 масштаб не выдержан), $Y = NE$, где E — цена интерференционных полос и N — число этих полос в предметной плоскости OC , рассматриваемой как цилиндрическая линза. Из рис. 1 находим

$$\theta/2 = \alpha - \gamma.$$

Из теоремы синусов

$$bn_1 \sin \gamma = b \sin \alpha = Y, \quad (1)$$

откуда

$$\alpha = \arcsin(Y/b); \quad \gamma = \arcsin(Y/bn_1),$$

тогда

$$\theta = 2[\arcsin(Y/b) - \arcsin(Y/bn_1)]. \quad (2)$$

Коэффициент увеличения OC как линзы

$$\beta = Y'/Y. \quad (3)$$

С другой стороны, при допущении, что $O''N \ll NO$ для плоского экрана

$$\theta = \text{arctg}(Y'/S), \quad (4)$$

т.е. подставляя (4) в (2) и проводя упрощения, находим

$$Y' = S \text{tg} 2[\arcsin(Y/b) - \arcsin(Y/bn_1)], \quad (5)$$

учитывая, что $Y = NE$, получаем

$$Y' = S \text{tg} 2[\arcsin(NE/b) - \arcsin(NE/bn_1)]. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что $E = \lambda/2 \sin(\delta/2)$, где δ — угол, под которым пересекаются освещающие OC пучки, и задавая число

$N = 1, 2, 3, \dots, k$ — ряд действительных чисел, по (6) находим место положения считываемой полосы, а по (3) — коэффициент увеличения β . Например, при $b = 400$ мкм, $n = 1.5$, $E = 2$ мкм (при $\lambda = 0.63$, $\delta = 18^\circ$) и $N = N_1 = 5$ $\beta_1 = 167X$, при $N = N_2 = 125$ $\beta_2 = 214X$, при $N = N_3 = 160$ $\beta_3 = 280X$. Очевидно, что считывание полосы за номером 160 обеспечивает чувствительность в 1.5 раза выше, чем считывание полосы с номером 5.

Описанное выше позволяет уточнить аналитическое выражение [5,6], используемое для расчета текущего диаметра одножильного световода

$$2b = 2b_0(1 + (\pm\varphi)k/360^\circ), \quad (7)$$

где $k = \beta_k/\beta_0$, β_0 — коэффициент увеличения для первой полосы, β_k — коэффициент увеличения для k -й полосы.

Расчет проведен для плоского экрана, за которым располагаются фотоприемники. Видно, что чем больше угол отклонения рассеянного пучка θ , тем меньше угол φ и считывающий фотоприемник необходимо постоянно переориентировать так, чтобы луч падал нормально к плоскости фотокатода.

При автоматическом контроле диаметра ОС целесообразным является размещение фотоприемников за цилиндрическим экраном. В этом случае при смещении фотоприемника его ориентация по отношению к падающему пучку всегда постоянна.

Так как $b \ll S$, то можно с большой достоверностью принять допущение $S = R$, где R — радиус цилиндрического экрана.

Необходимо определить условия выполнения равенства для коэффициента увеличения концентрической линзы

$$\beta' = 2S[(n-1)/n]/b \quad (8)$$

и для коэффициента увеличения β'' , найденного из расчета рассеивающего угла θ . Для цилиндрического экрана

$$\theta = \arcsin(Y'/R). \quad (9)$$

С учетом (3) и (5), обозначая для упрощения написания слагаемое в квадратных скобках через M , находим

$$\beta'' = R \operatorname{tg} 2[M]/Y. \quad (10)$$

Соответствие между формулами (8) и (10) сохраняется с погрешностью не хуже 1% при отношении $Y/b < 0.125$. На цилиндрическом экране коэффициент увеличения получается несколько меньше, чем на плоском, однако при построении первичного преобразователя контроля формы ОС выигрыш в конструкции очевиден из-за существенно меньших габаритных размеров.

Рассмотрим трехточечную схему устройства, апробированную на действующей аппаратуре [7]. Рассеянное ОС излучение распространяется в угловом интервале от -90 до $+90^\circ$, поэтому фотоприемники устанавливаются в трех секторах: первая пара — в секторе с углами рассеяния ($-75 \dots -85^\circ$), вторая — ($+5 \dots -5^\circ$) и третья — ($75 \dots 85^\circ$).

На рис. 2 представлена принципиальная схема первичного преобразователя контроля ПЦО, работающая следующим образом. Осветительной системой, состоящей из малогабаритного лазера 1 (например,

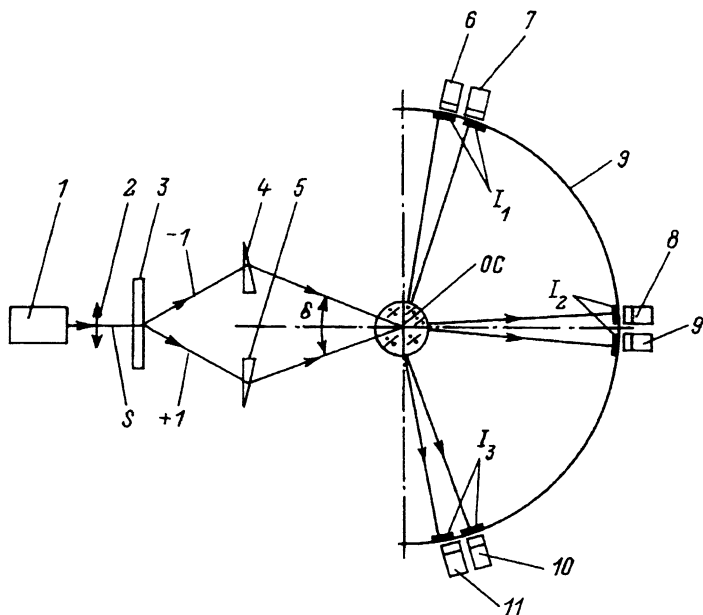


Рис. 2. Оптическая схема первичного преобразователя для контроля формы поперечного сечения одножильных световодов.

ЛГН-207А) и фокусирующей линзы 2 создается сходящийся световой пучок S , освещающий дифракционную линейку 3 (линейную или радиальную).

Посредством оптических клиньев 4 и 5 выделяют и корректируют в пространстве +1 порядки дифракции, которые пересекаются друг с другом под углом δ в измерительной зоне, где установлен или протягивается одножильный световод OC . В зоне пересечения пучков формируется интерференционная картина, имеющая пелу полосы E . OC , как цилиндрическая линза, передает интерференционную картину в плоскость изображения, в качестве которой служит цилиндрический экран Θ . Как описывалось выше, интерференционная картина считается в трех секторах, соответственно I_1 — фотоприемниками 6 и 7, I_2 — фотоприемниками 8 и 9, I_3 — фотоприемниками 10 и 11. При юстировке схемы на эталонный световод каждая пара фотоприемников выставлялась по ширине интерференционной полосы, соответствующей данному углу рассеяния. В рабочем режиме, когда через измерительную позицию протягивается контролируемый световод, осуществляется считывание текущего периода интерференционного сигнала, изменение которого выражается в появлении фазового сдвига, пересчитываемого далее в изменение диаметра OC .

Основные принципы метода были проверены на технологической установке [7], в состав которой входили первичный преобразователь по рис. 2; система обработки измерительной информации (СОИИ), включающая персональную ЭВМ и сервисные устройства ввода-вывода информации; электропривод вытяжки, состоящий из бесколлекторного двигателя постоянного тока на аэростатических опорах, приводящий

в движении ориентированный в направлении оси ОС резиновый транспортер с механическими захватами. При вращении электродвигателя захваты транспортера, поочередно фиксируясь на световоде, осуществляют его вытяжку.

Контрольные измерения вытягиваемого ОС осуществлялись при скорости движения транспортера 3.6 м/мин. При этом номинальный диаметр световода устанавливался равным 875 мкм. Угол сходимости интерферирующих пучков $\delta = 2 \arcsin \lambda/2T$ устанавливался из расчета получения периода предметной интерференционной полосы $T = 50$ мкм и составлял при $\lambda = 0.63$ мкм 1.44° . В первичном преобразователе применен радиальный растр с числом штрихов $G = 18000$. Растр вращался с постоянной угловой скоростью $n = 1.0$ об./с. При этом частота измерительного интерференционного сигнала с каждого из трех каналов составила $F = Gn = 18000$ Гц. Так как каждый период интерференционного сигнала является носителем измерительной информации, то число измерений по каждому из трех каналов составило 18000 за секунду. Таким образом, на участке световода, равном 1.0 мм, осуществлялось 300 измерений.

Вследствие достаточно большой инерционности процесса вытяжки диаметр световода на указанном участке можно считать постоянным. Поэтому формировался массив $M[F1, F2, F3]$ измерительной информации объемом N , который состоял из трех равных по объему подмассивов: $M1[F1]$, $M2[F2]$ и $M3[F3]$, причем i -му элементу первого (фаза $F1$) подмассива соответствовал i -й элемент второго (фаза $F2$) и третьего (фаза $F3$) подмассивов, измеренные в один и тот же момент времени.

В предположении, что результаты измерения фазы подчиняются нормальному закону распределения, максимальное отклонение каждого измерения от среднего значения с доверительной вероятностью 0.955 не должно превышать удвоенного среднеквадратичного отклонения. Поэтому все измерения, выходящие за пределы указанного диапазона, можно считать сбоями и не учитывать при обработке измерительной информации.

Для каждого из сформированных подмассивов вычислялись среднеквадратические отклонения $S1$, $S2$ и $S3$, после чего каждый элемент проверялся на соответствующее условие

$$|M1[F1i] - \bar{F}1| > 2 * S1, \quad (11)$$

$$|M2[F2i] - \bar{F}2| > 2 * S2, \quad (12)$$

$$|M3[F3i] - \bar{F}3| > 2 * S3, \quad (13)$$

где $\bar{F}1$, $\bar{F}2$ и $\bar{F}3$ — средние значения измерений фаз $F1$, $F2$ и $F3$ для соответствующих подмассивов.

Пусть для первого подмассива условие (11) выполняется для $p1$ -элементов, для второго подмассива условие (12) выполняется для $p2$ -элементов, а для третьего подмассива условие (13) — для $p3$ -элементов, причем порядковые номера их могут быть разными. Классифицируя такие элементы как сбои, исключим их из соответствующих подмассивов измерительной информации. При этом при удалении i -го элемента из $M1[F1]$ элемент с таким же номером исключается и из двух других подмассивов, даже если для него не выполняется условие

(12) и (13), а при удалении j -го элемента из $M2[F2]$ или $M3[F3]$ элемент с таким же номером удаляется из $M1[F1]$, даже если для него не выполняется условие (11). В результате формируем три подмассива $M1'[F1]$, $M2'[F2]$ и $M3'[F3]$ объемами n

$$n = N/3 - (p1 + p2 + p3 - q), \quad (14)$$

где q — число элементов подмассивов $M1$, $M2$ и $M3$ с одним и тем же номером, для которых одновременно выполняются (11)–(13).

Для каждого m -го элемента вновь сформированных подмассивов фаз рассчитывается текущий диаметр Dm вытягиваемого световода по каждому из трех направлений по формулам (7) и (10) и сформируется массив $M[Dm]$ объемом n . Средний диаметр D участка по каждому направлению, на длине которого формировался массив фаз, вычисляется из выражения

$$Di = (\sum M[Dmi]) / ni, \quad (15)$$

который и принимается за окончательный результат измерения. Измерения и обработка результатов по данному алгоритму в процессе вытяжки показали наличие устойчивой овальности поперечного сечения вытягиваемого световода. Так, значения диаметров по первому, второму и третьему направлениям на длине световода 1700 мм распределились в диапазонах $D1 = 878 \dots 885$ мкм, $D2 = 870 \dots 880$ мкм, $D3 = 885 \dots 893$ мкм.

Овальность находилась как разность диаметров между $D1$ и $D2$, $D1$ и $D3$, $D2$ и $D3$. Выравнивание чувствительности первого и третьего каналов по отношению ко второму осуществлялось программными средствами путем выбора коэффициента k в (7).

Таким образом, разработанный способ контроля ПЦО обеспечивает определение кривизны его поверхности с дискретностью равной цене интерференционной полосы, сформированной в передней фокальной плоскости ПЦО и в диапазоне углов рассеяния $+90 \dots -90^\circ$. В заключение следует отметить, что контроль формы ПЦО можно осуществлять также и по отраженному от боковой поверхности излучению. При этом точность измерения может быть несколько выше ввиду исключения влияния на ход зондирующих пучков внутренней структуры ПЦО.

Список литературы

- [1] Александров В.К., Биенко Ю.Н., Ильин В.Н. Оптико-электронные средства размерного контроля технологических микрообъектов. Минск: Наука и техника, 1988. 240 с.
- [2] Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. М.: Радио и связь, 1988. 280 с.
- [3] Presbi H.M. Appl. Opt. 1976. Vol. 15. N 2. P. 492–494.
- [4] Ильин В.Н. // Измерительная техника. 1991. № 12. С. 35–37.
- [5] Ильин В.Н., Рубцов А.Ф. А.С. 1768962 (СССР). Устройство контроля диаметра световодов и оптических волокон. 1992. № 38.
- [6] Дорошевич О.А., Ильин В.Н. // ЖПС. 1993. Т. 58. № 3–4. С. 329–341.
- [7] Бузов Ю.Г., Ильин В.Н. // Измерительная техника. 1993. № 3. С. 22–24.