

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 681.786 : 666.223.9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
КОНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ТОРЦЕВОЙ ЛИНЗОЙ****Б. Спектор, А. Норматов***Technion, Israel Institute of Technology, EE department, Haifa, Israel**E-mail: boriss@ee.technion.ac.il**E-mail: alexn@tx.technion.ac.il*

Определение параметров микрообъектов различной природы, особенно их геометрических характеристик, является важным моментом исследований в современном мире высоких технологий. Обсуждаются результаты использования новой методики анализа геометрических параметров конических волокон с торцевой линзой, широко применяемых в устройствах оптической передачи информации и сканирующей микроскопии ближнего поля. Предложенная методика измерений апробирована на реальных образцах различных производителей и ориентирована на ее последующее использование в автоматизированных производственных линиях.

**Введение.** Конические волокна с торцевой линзой (КВТЛ) в настоящее время широко используются в устройствах оптической передачи информации и сканирующих микроскопах ближнего поля (СМБП). Для создания подобных волокон применяют различные технологии (химическое травление, механическую вытяжку и др.) [1, 2]. Качество КВТЛ существенно зависит от совершенства формы конического волокна. Отмечено сильное влияние точности соблюдения требований производственного процесса на получаемую форму КВТЛ [3, 4]. Вследствие этого высокоточный выходной контроль изготовленных КВТЛ является важным моментом в технологической цепочке изготовления высококачественных волокон. В данной работе анализируется методика контроля геометрических параметров КВТЛ, разработанная авторами и успешно апробированная в условиях исследовательской лаборатории для анализа различных КВТЛ, изготовленных разными производителями с использованием разных методов и технологий. Методика создавалась с расчетом для применений в будущем в автоматизированном производстве.

**Описание измерительной системы и методики контроля.** На рис. 1 представлена схема измерительной системы, состоящей из оптического микроскопа 1 с видеокамерой 2, вакуумного держателя волокна 3 с  $V$ -образной канавкой, установленного на 3-координатном прецизионном позиционирующем столике 4, и управляющего компьютера 5. Управляющий компьютер

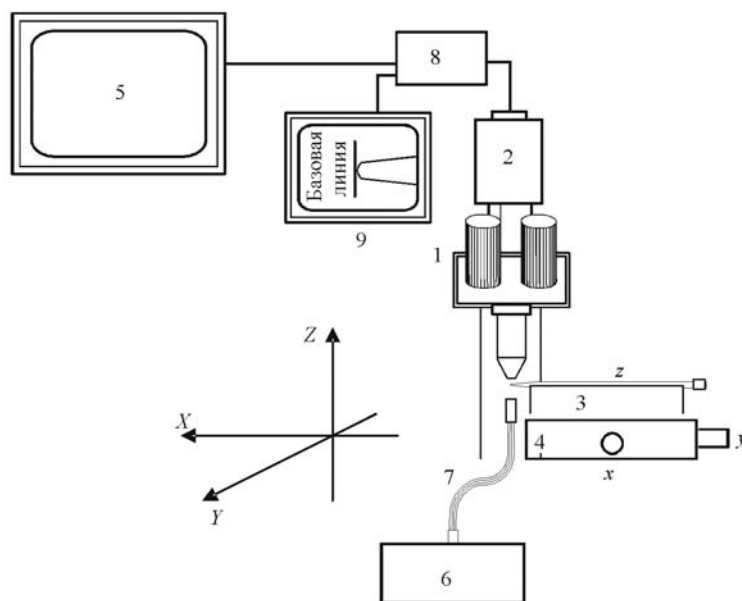


Рис. 1. Функциональная схема измерительной системы

выполняет функции приема и обработки данных с видеокамеры 2, а в последующем – и функции управления всем процессом измерений. Для подсветки объекта используется некогерентный источник света 6, излучение которого передается по оптоволоконному кабелю 7. Схема включает в себя также плату видеозахвата 8 и видеомонитор 9.

Поле зрения микроскопа было выбрано равным  $150 \times 150$  мкм. Получение изображения с этого поля с помощью видеокамер, имеющих разрешение выше чем  $300 \times 300$  пикселей, приводит к тому, что пиксель изображения становится меньше длины волны (собственный размер пикселя видеокамеры равен  $10 \times 10$  мкм, он может меняться в зависимости от выбранной модели).

При использовании подобной измерительной системы процедура контроля геометрии КВТЛ может быть представлена следующими основными этапами:

- 1) калибровка системы;
- 2) установка нового волокна и его фиксация;
- 3) поиск волокна в поле зрения камеры;
- 4) перемещение вакуумного держателя вдоль оси КВТЛ к его кончику;
- 5) сканирование концевой области КВТЛ (получение серии изображений для анализа геометрии волокна).

Калибровка системы осуществляется один раз за сеанс, и при смене волокон нет необходимости в ее перекалибровке. КВТЛ может быть установлено в держателе достаточно грубо (с погрешностью  $\pm 500$  мкм), но жестко, чтобы все перемещения координатного столика напрямую переходили в движение волокна. Грубая первоначальная установка волокна ( $\pm 500$  мкм при поле зрения  $150 \times 150$  мкм) требует наличия третьего этапа – поиска волокна в поле зрения видеокамеры. Возможны различные алгоритмы поиска. Например, перемещение координатного столика происходит в направлении оси X, пока половина поля зрения не станет темной, затем объект смещается по координате z и производится фокусировка микроскопа на край держателя. На-

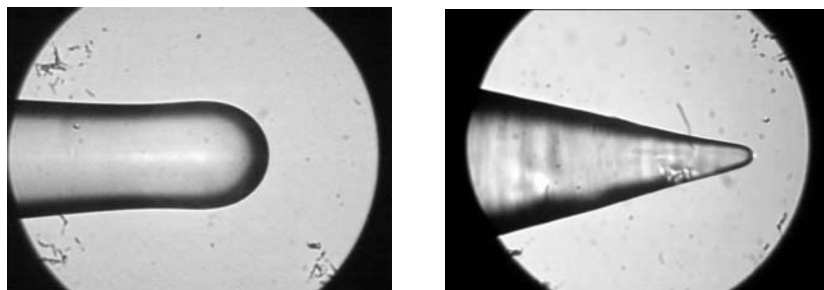


Рис. 2. Типичные изображения кончика КВТЛ

конец, при смещении объекта по краю держателя (координате  $y$ ) происходит обнаружение самого КВТЛ. Данный этап заканчивается, когда кончик КВТЛ приводится в центральную часть поля зрения, как показано на рис. 2. Из такого положения начинается процесс сканирования КВТЛ. Главной задачей на этом этапе является определение контурной линии конца волокна. На основе полученной информации вычисляются такие параметры КВТЛ, как углы, радиусы и др. В процессе сканирования можно выделить три составляющие: обработку по выбранному алгоритму определенной части изображения, сохранение изображения, если достигнут край поля зрения микроскопа, и перемещение КВТЛ в направлении оси  $X$ . Эти три составляющих процесса повторяются до тех пор, пока в результате обработки данных не выявится постоянство ширины сечения КВТЛ при его смещении по координате  $x$ . В ходе обработки данных о сечении волокна обязательно принимается во внимание информация об изменениях координаты  $z$ . Это позволяет реконструировать контур волокна, даже если реконструируемая плоскость не параллельна плоскости  $XU$ . При вычислениях по заданному алгоритму сначала производят подавление шумов изображения и корректировку дисторсий (геометрических искажений). После этого каждое изображение анализируется в отдельности и в совокупности со всеми другими изображениями, полученными в ходе сканирования данного волокна.

**Калибровка системы.** Цель калибровки – компенсация дисторсий, вносимых оптической системой, и обеспечение надежных измерений.

На данном этапе производится также подавление фонового изображения – пыли и других нежелательных частиц, от которых не застраховано большинство оптических систем. Эти частицы легко идентифицируются человеком и слабо влияют на восприятие самого изображения, но алгоритмы обработки изображений, реализованные в компьютерах, более чувствительны к таким частицам. Учет частиц пыли существенно усложняет алгоритмы обработки и увеличивает время выполнения процедуры. Одним из способов уменьшения их влияния является вычитание изображения рабочего поля микроскопа без какого-либо волокна из изображений с исследуемым образцом (волокном). Операцию подавления фона можно записать как

$$I_{\text{очищ}} = I_{\text{изм}} - I_{\text{фон}}. \quad (1)$$

Простое вычитание согласно (1) уменьшает динамический диапазон изображения, края объекта становятся менее четкими и более сложно обнаруживаемыми. С помощью данной процедуры невозможно подавить частицы в области изображения, занимаемой волокном. Для улучшения процедуры подав-

ления фона могут использоваться другие принципы исключения нежелательных объектов из области измерений.

Кроме подавления фона на этом этапе производится компенсация оптических дисторсий: радиальной и смещения центра. Оба вида искажений хорошо изучены, и известны алгоритмы компенсации их влияния [5, 6]. Применительно к реально используемой оптической системе в данной экспериментальной установке предполагается следующая модель дисторсии:

$$R = r + Kr^2 = r(1 + Kr) \approx r(1 + KR), \quad (2)$$

где  $R$  – искаженное расстояние от некоторой точки до центра дисторсии;  $r$  – истинное расстояние от точки до центра дисторсии;  $K$  – коэффициент дисторсии. Предполагается, что  $K$  относительно мало и  $R \approx r$ . В результате истинное значение  $r$  может быть вычислено из (2):

$$r = R/(1 + KR). \quad (3)$$

Положение центра и коэффициента дисторсии определяется при калибровке системы. Для данной процедуры используется калибровочный шаблон, который состоит из серии параллельных линий. Его можно получить, перемещая волокно в поле зрения микроскопа в направлении, перпендикулярном оси волокна. Такой шаблон используется для определения центра оптической дисторсии следующим образом. Ширина сечения КВТЛ будет иметь экстремум (максимум или минимум, зависящий от знака  $K$ ), когда центр оптической дисторсии будет находиться на линии, вдоль которой измеряется ширина волокна. При перемещении КВТЛ вдоль координаты  $Y$  край КВТЛ даст наименьшее отклонение от прямой линии в момент прохождения его через центр дисторсии. Пересечение этих двух линий (края волокна с наименьшим отклонением от прямой линии и линии сканирования с экстремальной шириной поперечного сечения) дает хорошую аппроксимацию положения центра дисторсии. Отметим, что данная процедура поиска центра дисторсии разработана для случая отсутствия тангенциальной дисторсии.

Применение точечного калибровочного шаблона устраняет такое ограничение. Создается подобный шаблон следующим образом. При подаче света видимого диапазона в коническое волокно на его кончике возникает четко определяемая и точно расположенная светящаяся точка (рис. 3, *a*). Захватывая набор изображений, получаемых при перемещении волокна на точные интервалы в двух направлениях, светящаяся точка создает по всему полю зрения калибровочный шаблон (рис. 3, *b*). Подобный прием использовался в [6]. По аналогии после определения координат центра дисторсии вычисляют и коэффициент дисторсии  $K$ , решая соответствующую систему уравнений.

Для достижения большей точности измерений полученные изображения необходимо интерполировать. Это также даст возможность определить центр дисторсии с субпиксельным разрешением. После расчета центра и коэффициента дисторсии исходные изображения интерполируются и подвергаются коррекции. Пример применения указанных выше алгоритмов коррекции приведен на рис. 4. Здесь показаны результаты измерения ширины сечения волокна без покрытия (в пикселях) вдоль его длины. Кривая (1) представляет результат измерений без коррекции. Явно виден экстремум ширины волокна в центре и сужение размера на краях поля зрения, что характерно для

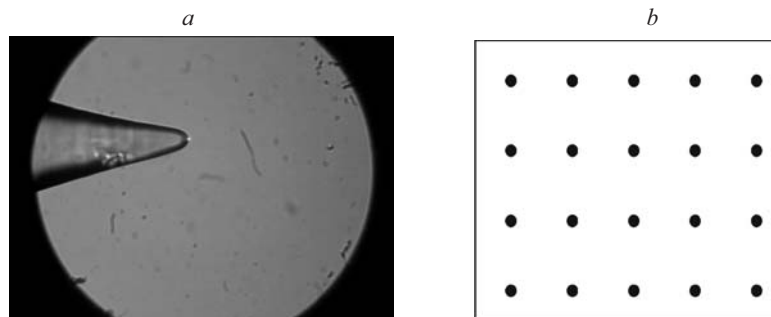


Рис. 3. Калибровка системы

радиальной дисторсии объектива. Кривая (2) – результат измерений после коррекции. Видно, что ширина волокна имеет практически постоянное значение (с точностью до долей пикселя). Волокно на откорректированном изображении примерно на 2 пикселя шире, чем на исходном изображении (при полной ширине 320 пикселей).

Калибровку целесообразно выполнять в начале процесса измерений, чтобы иметь возможность быстрой интерпретации полученных изображений.

**Сканирование и геометрический анализ.** Во время сканирования концевой области волокна создаются наборы изображений КВТЛ, которые корректируются, а затем анализируются в целях формирования контура КВТЛ. Этот контур создается с помощью специального алгоритма детектирования границ. Сама операция выделения границ является известной процедурой при обработке изображений [7, 8]. Детектирование границы может быть определено как выделение относительно резких изменений яркости пикселей. Когда края объекта перпендикулярны оси  $Y$ , они могут быть достаточно просто определены сравнением соседних пикселей с одной и той же координаты

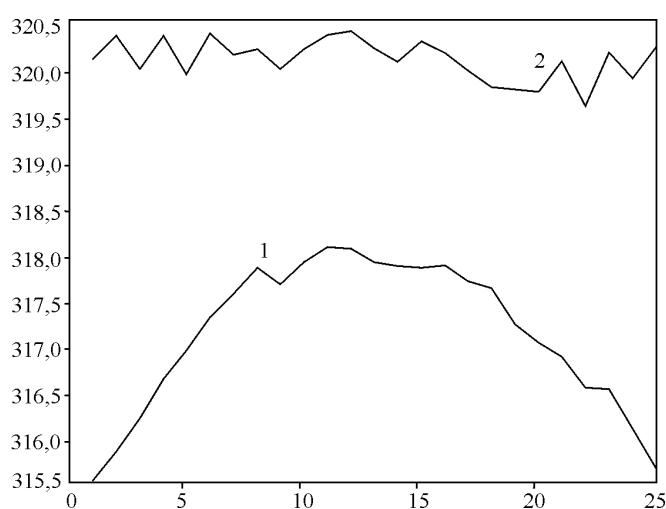


Рис. 4. Корректировка изображения

натой  $x$ . Известно два подхода к решению задачи детектирования границ: один основан на выделении гистерезисных порогов, другой – на вычислении производной. Оба подхода чувствительны к шумам изображения, хотя алгоритм с вычислением производной является более стабильным и удобным для применения. Знание *a priori*, что изображение содержит прямые линии, может быть эффективно использовано, в том числе подгонка полиномом может быть применена для вычисления истинной линии. В общем случае следует допускать, что линии будут кривыми (например, кончик КВТЛ может иметь произвольную форму). Необходимо принимать во внимание то, что получаемые изображения содержат значительный шум (особенно после вычитания фоновой составляющей). Следует всегда учитывать, что кончик КВТЛ является существенно фазовым объектом, и поэтому использование простых алгоритмов в данной задаче малоэффективно. С помощью этих алгоритмов трудно получить прямую линию даже в тех случаях, когда она легко распознается глазом человека. И напротив, использование программного пакета “2D Canny”, ориентированного на решение проблемы детектирования границ, дает сплошную стабильную линию, которая хорошо согласуется с восприятием анализируемого контура человеком. Во многом высокие результаты детектирования границ с помощью программного пакета “2D Canny” обусловлены использованием в нем гауссовой (низкочастотной) фильтрации входного изображения, которая уменьшает влияние шума, практически не искажая граничных точек контура. Программный пакет “2D Canny” позволяет выделять как явные, так и нечетко выраженные границы, он автоматически «сшивает» разорванные границы, при этом довольно часто получается контур с утерянными точками. Типичный пример восстановления контура волокна представлен на рис. 5, *a*. Для сравнения на рис. 5, *b* приведено соответствующее изображение кончика КВТЛ.

При решении проблемы определения геометрии КВТЛ главной задачей является получение внешнего контура, который интерпретируется как искомый контур кончика КВТЛ. Так как исходный объект является сплошным, то пропущенные точки на полученном контуре легко могут быть экстраполированы на основе существующих точек контура. Практически не бывает шумовых точек вне требуемого контура, потому что почти все шумовые точки удаляются при вычитании фонового изображения. Оставшиеся шумовые пиксе-

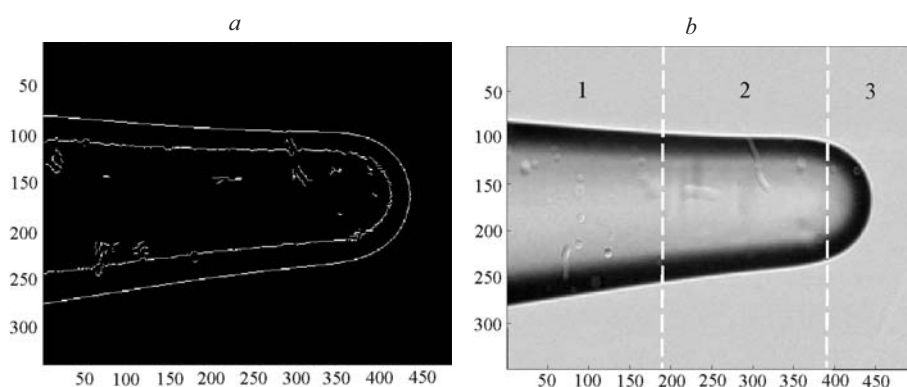


Рис. 5. Детектирование границ изображения: типичный результат восстановления контура с помощью пакета “2D Canny” (*a*) и исходный фрагмент и его разбиение на анализируемые части (*b*)

ли находятся внутри контура объекта и могут быть распознаны и удалены путем сравнения их координат с доступными точками контура.

Кривую контура можно использовать для построения трехмерной модели кончика КВТЛ. Предполагается наличие цилиндрической симметрии объекта. Тогда вращением объекта вокруг этой оси можно воспроизвести трехмерную модель. В таком случае необходимо принять во внимание небольшие отличия между половинками контура и выполнить более гладкую сшивку половинок трехмерной модели. Для этого кривую контура целесообразно разделить на три части (как показано на рис. 5, *b*): верхнюю конусную границу (1), нижнюю конусную границу (2) и сферическую линзу (3). В случае верхней и нижней конусных границ целью вычислений является определение углов наклона линий, которые выявляются при полиномиальной подгонке первого порядка. Разница углов наклона верхней и нижней линий даст угол конуса. При анализе области сферической линзы выявляется ее радиус и положение центра кривизны. Центр окружности  $O$  находится на пересечении двух нормалей к хордам  $AB$  и  $BC$ , как показано на рис. 6, *a*. Расстояние между центром и точками  $A, B$  и  $C$  является радиусом. Для повышения точности определения центра целесообразно точки  $A, B$  и  $C$  разнести как можно дальше друг от друга. Для нахождения среднего радиуса и среднего центра можно выбрать случайные наборы троек (по аналогии с методом Монте-Карло). Экспериментальный результат, полученный всего по трем точкам, представлен на рис. 6, *b*. Видна незначительная разница между восстановленным контуром кончика КВТЛ и расчетной кривой. Для меньших сечений дуги получается более точная подгонка.

**Обсуждение результатов.** Алгоритмы, приведенные выше, были реализованы в наиболее простом виде, но несмотря на это дали обнадеживающие результаты. Усложнение алгоритмов может существенно улучшить результаты. Например, применение интерполяции с увеличением частоты дискретизации в 3–5 раз значительно улучшает качество восстанавливаемого контура. Алгоритмы, использующие интерполяцию более высоких порядков, значительно повышают требования к объему памяти (пропорционально  $N^2$ ). Как следствие, необходим разумный компромисс между качеством результатов и временем вычислений.

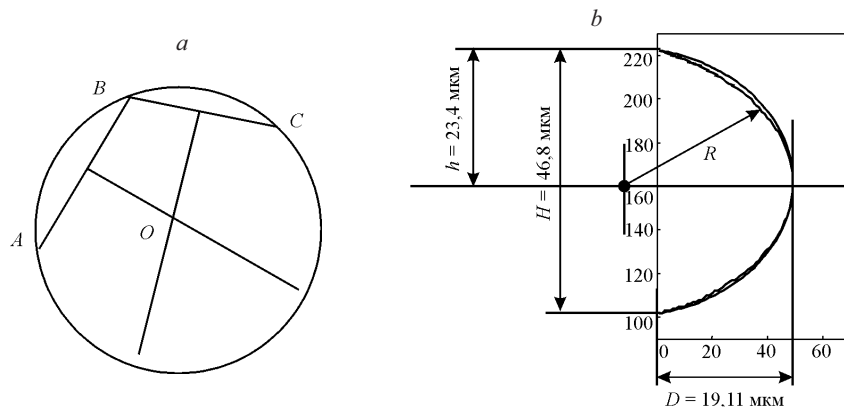


Рис. 6. Примеры аналитических процедур: определение центра кривизны линзы (*a*); анализ точности подгонки расчетной кривой и исходных данных (*b*)

Процедуру сшивки изображений целесообразно выполнять в наиболее простой форме – сравнением ширин. В большинстве случаев одинаковая ширина на перекрывающихся картинках принадлежит одним и тем же участкам. В результате изображение всего кончика КВТЛ может быть создано, даже если конец волокна слишком длинный и не вмещается целиком в поле зрения микроскопа. Большинство алгоритмов, апробированных в данной работе, реализовано в автоматическом режиме и не требует ручного вмешательства, хотя все же есть некоторые части программы, требующие эвристических приемов. Автоматизация этих частей программы обработки планируется на будущее (например, разбиение концевой области КВТЛ на линейную и сферические части).

**Практические вопросы.** *Освещение* имеет очень важное значение для повышения качества анализа. Различные схемы освещения могут дать разную информацию об объекте. На рис. 7 представлены три варианта схем освещения объекта. Легко заметить, что при использовании верхнего освещения сферическая линза почти не видна, так как имеет очень гладкую поверхность, и свет, падающий сверху, практически не рассеивается назад. Поверхность конической части более шероховата, и поэтому назад рассеивается заметно большая часть света, чем от сферической части.

При работе с любым источником света (особенно с фоновым) следует иметь в виду, что волокно является фазовым объектом, поэтому интерпретация различных признаков не является тривиальной задачей, как это может казаться.

*Слежение.* Поверхность обычного оптического волокна без покрытия (и его контур), как правило, не имеет существенных отличительных признаков, которые могли бы помочь отслеживать перемещение волокна вдоль его оси. Конические части волокна имеют вполне однозначное соответствие между выбранным местом на поверхности волокна и расстоянием от этого места до кончика волокна. Это позволяет отслеживать и документировать малые перемещения кончика волокна, сравнивать положения различных участков волокна на разных изображениях.

*Тепловое расширение.* Ввиду использования значительного увеличения в оптическом микроскопе и высоких требований к качеству контроля все измерения (и калибровка!) должны проводиться после полной стабилизации температуры.

*Шероховатость.* Выбор правильного освещения позволяет оценить такой параметр поверхности волокна, как шероховатость. Для этого необходимо более точно сфокусироваться на выбранном участке волокна. Имеющиеся на поверхности грубые элементы, как правило, рассеивают верхнее освеще-

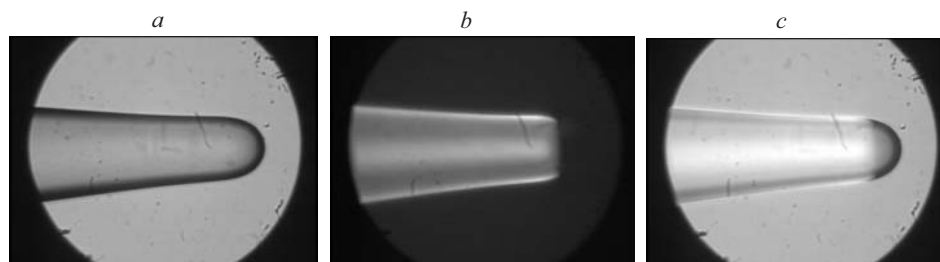


Рис. 7. Примеры использования различных схем освещения объекта: фоновое освещение (a), верхнее освещение (b), комбинированное освещение (c)



щение назад в микроскоп (см. рис. 3, а, светлые точки). Оцениваться будет только небольшая часть поверхности волокна, так как остальная ее часть из-за значительных изменений высоты поверхности будет выглядеть расфокусированной. Определить параметр шероховатости конической поверхности стандартным методом весьма трудно. Сложная функциональная зависимость параметров изображения от типа освещения, фокального расстояния объектива и свойств материала, из которого выполнено волокно, делают сложным создание метода автоматического измерения шероховатости поверхности волокна.

*Изгиб волокна.* Измеряемый конец волокна должен по возможности более плотно прилегать к стенкам V-образной канавки держателя, чтобы не было изгиба и в результате – искажения контролируемой формы волокна.

**Заключение.** Предложена новая методика контроля геометрии конических волокон с торцевой линзой. Большинство алгоритмов и процедур данной методики были апробированы на реальных волокнах различных производителей и дали обнадеживающие результаты. Такая методика создавалась для последующего использования ее в автоматическом режиме контроля КВТЛ на производственных линиях. Технические решения многих алгоритмов и процедур заимствованы из других исследовательских областей и адаптированы к специфическим условиям выходного контроля КВТЛ. Чтобы полностью автоматизировать процесс контроля КВТЛ на основе предлагаемой методики, необходимо доработать некоторые алгоритмы и эвристику. При использовании соответствующих интерполирующих процедур вычислительная сложность методики может быть оптимизирована.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pagnot T., Pierali C.** Fabrication of multimode fiber tapers with a high reproducibility of the subwavelength extremity size: application to scanning near-field optical microscope probes // Opt. Commun. 1996. **132**. P. 161.
2. **Birks T. A., Li W. Y.** Control of optical fiber taper shape // Electron. Lett. 1991. **27**, N 18. P. 1654.
3. **Hoffmann P., Dutoit B., Salath R.-P.** Comparison of mechanically drawn and protection layer chemically etched optical fiber tips // Ultramicroscopy. 1995. **61**. P. 165.
4. **Valaskovic G. A., Holton M., Morrison G. H.** Parameter control, characterization, and optimization in the fabrication of optical fiber near-field probes // Appl. Opt. 1995. **34**, N 7. P. 1215.
5. **Nomura Y., Sagara M., Naruse H., Ide A.** Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera // IEEE Trans. Pattern Analys. and Machine Intelligence. 1992. **14**, N 11. P. 1095.
6. **Shah S., Aggarwal J. K.** A simple calibration procedure for fish eye (high distortion) lens camera // IEEE. 1994. P. 3422.
7. **Bennamoun M.** Edge detection: problems and solutions. Invited paper // IEEE. 1997. P. 3164.
8. **Basu M.** Gaussian-based edge-detection methods – a survey // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Pt. C: Applications and Reviews. 2002. **32**, N 3. P. 252.

*Поступила в редакцию 27 октября 2005 г.*