

УДК 531.7

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБОКИХ  
МИКРООТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ****Дючкова Мария Андреевна,**

магистрант,

E-mail: marusya\_dyuch@mail.ru

**Куренщиков Александр Владимирович,**кандидат технических наук, Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск

E-mail: akur@inbox.ru

**Аннотация**

В статье рассматриваются пути решения проблем, присущих измерениям характеристик глубоких микроотверстий. Отмечается актуальность таких измерений, связанная с тенденцией миниатюризации и широким внедрением аддитивных технологий, с характерными для них, сложными внутренними полостями. Приводятся виды микроотверстий и трудности при их измерении. Отмечается эффективность оптических методов измерения глубоких отверстий и, в частности, методов низкокогерентной интерферометрии. Рассматривается устройство реализованных измерительных установок. В заключении делается вывод о перспективности методов низкокогерентной интерферометрии для измерения микроотверстий.

**Ключевые слова:** отверстие, метрология, измерение, метод, излучение, лазер, низкокогерентная интерферометрия.

**MODERN METHODS OF MEASURING DEEP MICROHOLES BASED ON  
LOW COHERENCE INTERFEROMETRY****Maria A. Dyuchkova,**

undergraduate

E-mail: marusya\_dyuch@mail.ru

**Alexander V. Kurenshchikov,**Candidate of Technical Sciences, National Research Mordovia State University named after N. P.  
Ogaryov, Saransk

E-mail: akur@inbox.ru

ABSTRACT

The article discusses ways to solve problems inherent in measuring the characteristics of deep micro-holes. The relevance of such measurements is noted, associated with the trend of miniaturization and the widespread introduction of additive technologies, with their characteristic, complex internal cavities. The types of micro-holes and difficulties in measuring them are given. The effectiveness of optical methods for measuring deep holes and, in particular, low coherence interferometry methods is noted. The design of the implemented measuring installations is considered. In conclusion, a conclusion is made about the prospects of low coherence interferometry methods for measuring micro-holes.

---

**Keywords:** hole, metrology, measurement, method, radiation, laser, low coherence interferometry.

---

Миниатюризация компонентов является неотъемлемой частью современного технологического развития, обусловленного эволюцией методов микропроизводства, таких как микроэлектроразрядная обработка, ультразвуковая микрорезка и сверление, микро- и нанолитография, нанопечать и микроформовка. Эти технологии позволяют создавать структуры диаметром в десятки микрометров и глубиной более 1 мм, такие как микроотверстия, сопла и каналы. Также растет интерес к применению функциональной текстуры поверхности для улучшения эксплуатационных характеристик деталей, особенно для целей теплопередачи, смазки и смачиваемости. Развитие и все более широкое использование аддитивных технологий для производства функциональных деталей позволяет создавать объекты, которые невозможно изготовить с помощью обычных методов. Аддитивные технологии позволяют создавать сложные внутренние полости для снижения веса, повышения производительности и компактности конструкции. Измерение внутренних объектов, особенно небольших глухих отверстий и внутренних микроструктур, представляет значительную метрологическую проблему, как правило, их сложнее измерить, чем внешние поверхности. Основная трудность при выполнении точных измерений микроотверстий с использованием контактных методов заключается в силе воздействия зонда на поверхность, следствием чего может быть повреждение образца. Кроме того, ограниченное пространство зондирования часто требует длинного и тонкого зонда, что может привести к деформации щупа и ошибке измерения. Скорость перемещения зонда также ограничена, чтобы уменьшить импульс, что приводит к низкой скорости измерений. Традиционные оптические методы измерения сдерживаются линией визирования, когда луч света заслоняется или отражается боковой стенкой микроотверстия. Все эти проблемы привели к разработке широкого спектра методов измерений для исследования труднодоступных областей.

Несмотря на трудности процесса измерений, необходимо проверять изготовленные изделия для определения их качества, что требует точных и повторяемых измерений геометрии отверстий и текстуры их внутренней поверхности. Это приводит к вполне определенным требованиям к диапазону измерений, скорости и разрешению при осевых, и радиальных измерениях. Поскольку структуры отверстий с высоким отношением длины к диаметру (глубокие отверстия) становятся все сложнее, метрологические инструменты, используемые для определения их характеристик, должны иметь высокий уровень производительности. Особенно актуально в текущее время измерение внутренних структур глубоких отверстий диаметром от 0,1 мм до 10 мм и глубиной более 1 мм. Эти структуры можно разделить на четыре категории: прямые, конические, со сложной внутренней геометрией, не прямые. Для микроотверстий существует пять геометрических характеристик, которые представляют основной интерес: цилиндричность, диаметр,

прямолинейность, конусность, и класс чистоты поверхности (шероховатость). Следовательно, необходимы методы способные измерять эти характеристики в указанных структурах, поскольку они имеют решающее значение для их функционала.

Бесконтактные методы измерения представляют значительный интерес, поскольку обеспечивают высокую скорость измерения точек поверхности, что позволяет создавать плотные трехмерные облака точек, которые точно отображают топографию образца без деформации измеряемой поверхности. Основным принципом активной бесконтактной системы измерения является проецирование электромагнитной волны на объект исследования и обработка отраженного сигнала для определения расстояния до него. Существует множество методов измерения, которые попадают в эту категорию, однако для целей измерения глубоких отверстий наиболее подходят низкокогерентная интерферометрия, лазерная триангуляция, рентгеновская компьютерная томография и методы с использованием емкостных зондов.

Оптические методы являются перспективными бесконтактными методами измерения, способными достигать высокого разрешения и точности при осевых измерениях. Однако измерения контактного типа могут обеспечить более высокое боковое разрешение, чем оптические методы, это связано с тем, что на оптические методы измерения влияют параметры поверхности образца и качество оптики, использующейся для фокусировки, при этом боковое разрешение в конечном итоге ограничивается дифракционным пределом. Одной из основных проблем, связанных с оптическими методами измерения, является влияние свойств измеряемого объекта (геометрия, качество поверхности, материал и т.д.) на результат измерения. Например, некоторые поверхности могут вносить ложные фазовые изменения в отраженное излучение из-за свойств материала. Таким образом, связь между свойствами объекта и неопределенностью измерения должна быть известна для каждого оптического датчика.

Надежность оптических систем измерения тесно связана с отражением света диффузно рассеивающими поверхностями, заставляющими падающий свет рассеиваться во многих направлениях, и возвращаться в систему измерения. Хотя эта зависимость хорошо известна, количественно ее очень сложно определить для совокупности свойств оптики системы измерения, рода материала, геометрии и текстуры поверхности. В этом отличие от механических зондирующих систем, поведение которых легко смоделировать для различных топографий поверхности. При обнаружении обратного отраженного сигнала от образца существует максимальный измеряемый угол наклона поверхности, он соответствует половине угла апертуры  $\alpha$  оптической системы. Таким образом, гладкая поверхность с углом наклона больше  $\alpha$  не отражает свет обратно в систему, следовательно, не может быть измерена. Тем не менее, способность оптических систем измерять крутые поверхности может быть улучшена путем изменения выравнивания образца относительно оптической оси датчика.

Метод низкокогерентной интерферометрии (LCI) основан на принципе когерентного стробирования, что позволяет измерять расстояние в абсолютных величинах посредством анализа области интерференции между образцом и опорным сигналом, подаваемым с использованием источника излучения с низкой временной когерентностью или настраиваемого лазера. Существует множество вариаций метода, которые можно использовать для реализации системы, например тандемный LCI или ступенчатый эталонный LCI. Эти системы могут обеспечивать абсолютные измерения с высоким разрешением по глубине, осевым и латеральным разрешением. Однако эти зонды способны выполнять измерения только в одной плоскости, что делает их подверженными дрейфу внутри измеряемого отверстия вокруг оси вращения и неспособными выполнять измерения выступов или дна отверстий.

Производительность интерферометрических систем возможно улучшить за счет применения оптоволоконна. Что объясняется их малым размером и весом, возможностью мультиплексирования и дистанционного зондирования, высокой гибкостью и низкими потерями полезного сигнала, высокой чувствительностью, низкой стоимостью изготовления, малым форм-фактором, высокой точностью, устойчивостью к электромагнитным помехам, высоким температурам и облучению, что делает их привлекательными для многих прикладных решений [1]. Например, волоконно-оптические системы LCI широко используются в биомедицине, где этот метод называется оптической когерентной томографией, также разработаны некоторые решения для размерной метрологии промышленных компонентов и измерений геометрии отверстий.

В литературе описана измерительная система LCI состоящая из оптоволоконного зонда и оптоволоконного интерферометрического оценочного блока (рис. 1) [2].

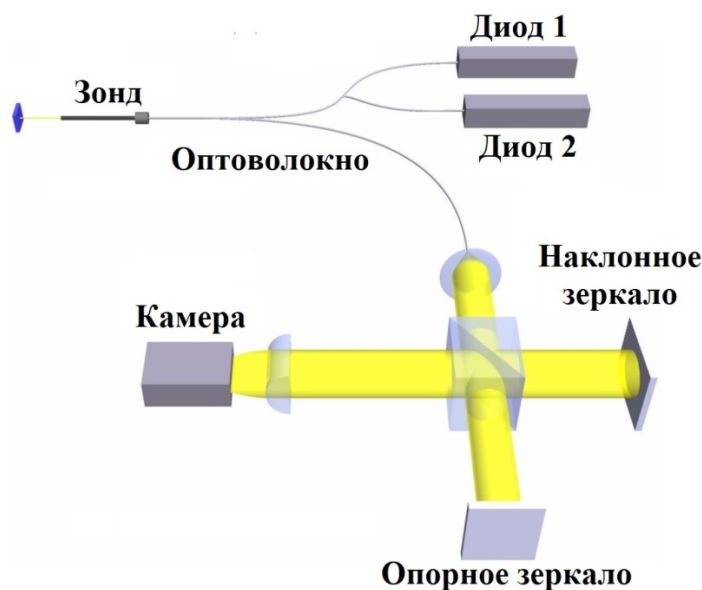


Рисунок 1 – Измерительная установка оптоволоконного интерферометра с опорным зеркалом [2].

Оба элемента используют интерферометрический принцип: оптоволоконный интерферометр Физо используется в качестве зонда и кодирует расстояние измерения, которое затем декодируется в интерферометре Майкельсона. В системе использован общий тракт, в котором используется наклоненное эталонное зеркало, чтобы исключить необходимость пошагового регулирования и обеспечить однократное измерение. Эта система имеет переменное рабочее расстояние 100 мкм, диапазон измерения 160 мкм, точность в нанометром диапазоне и зависящую от глубины неопределенность от 16,9 нм до 67,6 нм. Использовалось оптоволоконно диаметром 80 мкм с фокусирующим зондом, изготовленным из призмы с градиентным индексом, заточенной под углом 45°, что дает размер пятна 7 мкм. С помощью метода продемонстрировано измерение автомобильных форсунок с погрешностью измерения менее 100 нм.

Тандемный датчик LCI используется в работе [3], где применяется оптоволоконный зонд диаметром 30 мкм, отполированным под углом 45°, для измерения боковых стенок отверстий малого диаметра с погрешностью измерения 89 нм. Здесь в качестве источника широкополосного излучения применяется суперлюминесцентный диод (СЛД), а измерительный и опорный интерферометры, соединенные одномодовым оптоволоконном, создают интерференционную полосу, если длины оптических путей в обоих интерферометрах одинаковы (рис. 2). Следовательно, сканируя опорное зеркало и

отслеживая его положение с помощью интерференционных полос, генерируемых с помощью гелий-неонового лазера, можно определить расстояние до поверхности.

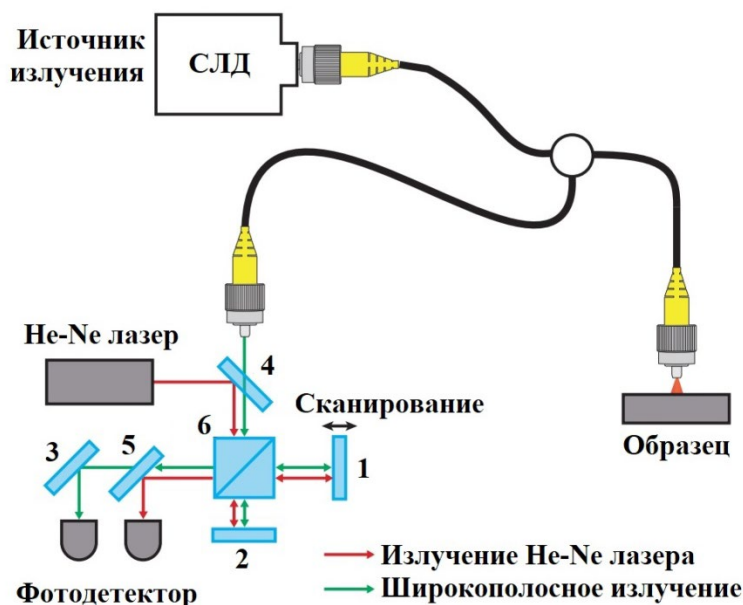


Рисунок 2 – Измерительная установка LCI с тандемным датчиком [3]: 1-3 – зеркала; 4-5 – полупрозрачные зеркала; 6 – расщепитель луча.

Спектральный датчик LCI, использующий общий оптоволоконный тракт и чувствительную головку с одномодовым оптоволоконном (рис. 3), оказался эффективным методом измерения топографии поверхности [4].

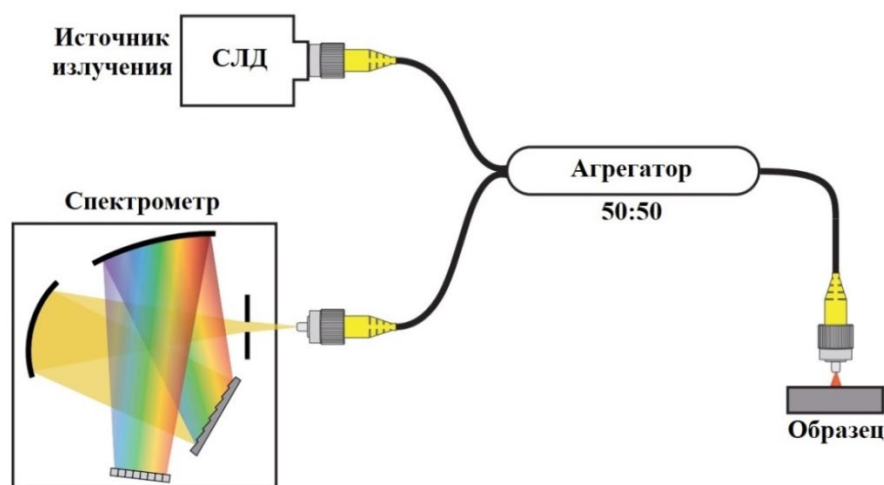


Рисунок 3 – Измерительная установка LCI с общим трактом для опорного и измерительного сигналов [4].

Система состоит из широкополосного источника излучения на основе суперлюминесцентного диода (СЛД) 58 нм и мощностью излучения 5,14 мВт. Для разделения и соединения луча использовался одномодовый оптоволоконный агрегатор с коэффициентом разделения 50:50, причем только одна ветвь использовалась в качестве общего пути для измерительного и опорного сигналов. Использовался спектрометр, работающий на частоте 125 Гц, с матрицей 2048×64 пикселей, начальной длиной волны 756 нм и спектральным диапазоном 174 нм с разрешением 0,21 нм, что дает теоретический осевой рабочий диапазон 2,15 мм. Эта система очень надежна в различных рабочих средах благодаря своим возможностям передачи излучения в общем тракте и однократным измерением. Система была испытана в воздухе, воде, парафине и жидкости для целей

металлообработки и показала хорошую стабильность линейности, точности измерения и прецизионности, в текущей конфигурации обеспечивающей диапазон измерений 2,1 мм [5].

В заключение можно отметить, что методы низкокогерентной интерферометрии могут обеспечить измерения глубоких отверстий, сохраняя при этом высокое разрешение и скорость измерения с адекватным рабочим диапазоном и низкой погрешностью. Однако, из-за высокой гибкости оптических волокон, могут возникнуть проблемы с поддержанием стабильного положения во время измерения, когда тело датчика требует вертикального перемещения и поворотов для измерений в отверстии. Несомненным преимуществом данных методов является их высокая универсальность и легкость изготовления систем с индивидуальной конфигурацией.

#### Список литературы:

1. Miliou, A. In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances / A. Miliou // *Photonics*. 2021. № 8. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics8070265> (дата обращения: 12.12.2024).
2. Pfeifer, T. Interferometric measurement of injection nozzles using ultra-small fiber-optical probes / T. Pfeifer, R. Schmitt, N. Konig, G. F. Mallmann // *Chinese Optics Letters*. 2011. № 9. 071202. URL: <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00005/2011/9/7/COL201109071202.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).
3. Matsui, K. New non-contact measurement of small inside-diameter using tandem low-coherence interferometer and optical fiber devices / K. Matsui, H. Matsumoto, S. Takahashi, K. Takamasu // *In Proceedings of the Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd.: Bach. Switzerland. 2012. № 523. С. 871-876. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.871> (дата обращения: 12.12.2024).
4. Hovell, T. From light to displacement: A design framework for Optimising spectral-domain low-coherence interferometric sensors for in situ measurement / T. Hovell, J. Petzing, L. Justham, P. Kinnell // *Applied Sciences* 2020. № 10. 8590. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238590> (дата обращения: 12.12.2024).
5. Hovell, T. Lensless fiber-deployed low-coherence interferometer for in-situ measurements in nonideal environments / T. Hovell, R. S. Matharu, J. Petzing, L. Justham, P. Kinnell // *Optical Engineering*. 2020. № 59. 014113. URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.1.014113> (дата обращения: 12.12.2024).

#### References:

1. Miliou, A. In-fibre interferometric-based sensors: Overview and recent advances / A. Miliou // *Photonics*. 2021. № 8. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics8070265> (access date: 12.12.2024).
2. Pfeifer, T. Interferometric measurement of injection nozzles using ultra-small fiber-optical probes / T. Pfeifer, R. Schmitt, N. Konig, G. F. Mallmann // *Chinese Optics Letters*. 2011. № 9. 071202. URL: <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00005/2011/9/7/COL201109071202.pdf> (access date: 12.12.2024).

3. Matsui, K. New non-contact measurement of small inside-diameter using tandem low-coherence interferometer and optical fiber devices / K. Matsui, H. Matsumoto, S. Takahashi, K. Takamasu // In Proceedings of the Key Engineering Materials . Trans Tech Publications Ltd.: Bach. Switzerland. 2012. №. 523. P. 871-876. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.871> (access date: 12.12.2024).
4. Hovell, T. From light to displacement: A design framework for Optimizing spectral-domain low-coherence interferometric sensors for in situ measurement / T. Hovell, J. Petzing, L. Justham, P. Kinnell // Applied Sciences 2020. №. 10. 8590. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238590> (access date: 12.12.2024).
5. Hovell, T. Lensless fiber-deployed low-coherence interferometer for in-situ measurements in nonideal environments / T. Hovell, R. S. Matharu, J. Petzing, L. Justham, P. Kinnell // Optical Engineering. 2020. №. 59. 014113. URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.1.014113> (access date: 12.12.2024).