

4. Показан пример моделирования и верификации цифрового устройства, решающего проблему аппаратурной реализации суперпозиции нескольких видеофильмов в один с последующим выводом на экран исходных кадров и результата с помощью Program Language Interface (PLI) [15].

5. Предложено использовать структуры данных видеопотока в качестве эффективного средства тестирования функций автономного проектируемого цифрового изделия, что позволяет визуально наблюдать искажения на экране в случае некорректной работы отдельных компонентов системы, а также одновременно тестировать все ее функции на рабочих частотах.

Литература: 1. *Bass M.J. and Cristensen C.M.* The future of the Microprocessor Business. IEEE Spectrum, April, 2002. P. 34-39. 2. *Don Edinfeld, Andrew B Kahng, Mike Rodgers, and Yervant Zorian.* 2003 Technology Roadmap for Semiconductors, Computer, January 2004, pp. 47-56. 3. *Tredennock N., Shimamoto B.* "Go Reconfigure". IEEE Spectrum, December 2003. P. 37-40. 4. *Gupta B. and Borgatti M.* Different Approaches to Add Reconfigurability in a SoC Architecture // Design Automation and Test in Europe (DATE 03). 2003. P. 398-402. 5. *Borgatti M., Calm L., De Sandre G., Forkt B., Jezzi D., Lertora F., Muzzi G., Pasotti M., Poles M., Rolandi P.L.*(STMicroelectronics) A Reconfigurable Signal Processing IC with Embedded FPGA and Multi-Port Flash Memory // Design Automation Conference (DAC 03). 2003. P. 691-696. 6. *Linda Geppert.* "The New Indelible Memories". IEEE Spectrum, March 2003. P. 49-54. 7. *UML-SOC 2004.* UML for SOC Design. DAC 2004. Workshop. 58 p. 8. *Nikolaos S. Voros, Luis Sanchez, Alejandro Alonso, Alexios N. Birbas, Michael Birbas, Ahmed Jerraya.* Hardware-Software Co-Design of Complex Embedded Systems. Design Automation for Embedded Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2003. P. 5-34. 9. *S. Yoo and Jerraya A.* Introduction to Hardware Abstraction Layers for SoC // Design Automation and Test in Europe (DATE 03). 2003. P. 336-338. 10. *Vercauteren, S.,*

J.V.D. Steen, and D Verkest. Combining Software Synthesis and Hardware-Software Interface Generation to Meet Hard Real-Time Constraints. DATE'99. 1999. P. 177-187.

11. *Boehm B.* A Spiral model of Software Development and Enhancement. Science of Computer Programming. 1988. Vol. 8. P. 231-274. 12. *Farber S.* ARM System-on-Chip architecture. Addison - Wesley. 2000. 420p. 13. *David Seal.* Architecture Reference Manual. Addison - Wesley. 2001. 560p. 14. *Active-HDL User's Guid.* Second Edition. Copyright. Aldec Inc. 2003. 213p. 15. *Samir Palnitkar.* Verilog HDL. A Guide to digital design and synthesis. Sunsoft Press. A prentice Hall Title. 2002. 396p.

Поступила в редколлегию 11.02.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

Егоров Александр Андреевич, аспирант кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Увлечения: баскетбол, футбол, автопутешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

Хаханова Ирина Витальевна, канд. техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и диагностика цифровых устройств. Увлечения: английский язык, гитара. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

Гузь Олеся Алексеевна, аспирантка кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Увлечения: баскетбол, футбол, автопутешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanov@kture.kharkov.ua

УДК 681.7.068.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КРИТИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОММУТАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ФИЛИПЕНКО А.И.

Описывается контроль состояния критичных поверхностей волоконно-оптических компонентов, который выполняется методом двухлучевой интерференции по схеме интерферометра Майкельсона. Приводятся соотношения, связывающие параметры формирования поверхностей с характеристиками интерференционного изображения. Предлагается и исследуется методика выделения полезной информационной составляющей из смеси интерференционного

сигнала с шумом и фоном измерения, основанная на использовании полосовых фильтров Баттерворта.

1. Общая характеристика проблемы

Коммутационные компоненты осуществляют передачу или перераспределение оптической мощности между отдельными оптическими волокнами. Ряды компонентов охватывают разъёмные (коннекторы) и неразъёмные оптические соединители (сварные или клеевые сростки), оптические переключатели (электромеханические и интегральные) и оптические ответвители. Для удобства использования переключатели и ответвители содержат волоконные выводы, оканчивающиеся наконечниками разъёмных соединителей. Таким образом, при монтаже и эксплуатации волоконно-оптических систем широко применяется передача оптической энергии из волокна в волокно через среду с показателем преломления, отличающимся от показателя материала сердцевины волокна. В этих условиях в зоне контакта возникают обратные потери, т.е. свет, распространяющийся в направлении, обратном направлению передачи полезной информации. Первичной причиной обратных потерь является отражение от области изменения показателя преломления в зазоре между

торцами двух соединяемых оптических волокон (Френелевское отражение), который образуется ввиду наличия неровностей на торцевых поверхностях. Этот эффект устраняется приданием торцу наконечника соединителя определенной формы и свойству путем полировки, что способствует физическому контакту торцов наконечников соединителей. Необходимым условием обеспечения низкого уровня обратного отражения и неотъемлемой частью технологического процесса изготовления коммутационных волоконно-оптических компонентов является операция контроля качества торцевых поверхностей волокон.

2. Анализ исследований и публикаций, посвященных решению проблемы

Описание свойств поверхностей может осуществляться несколькими способами. Государственными стандартами в качестве основных параметров, характеризующих шероховатость поверхности, установлены (рис.1):

– среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля y_i в пределах базовой длины

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|; \quad (1)$$

– высота неровностей профиля по десяти точкам: сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля $|y_{p_{mi}}|$ (пик - P) и глубин пяти наибольших его впадин $|y_{v_{mi}}|$ (впадина - V) в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{i=1}^5 |y_{p_{mi}}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_{mi}}| \right); \quad (2)$$

– наибольшая высота профиля R_{max} – расстояние между линией выступов профиля и линией его впадин в пределах базовой длины;

– m – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.

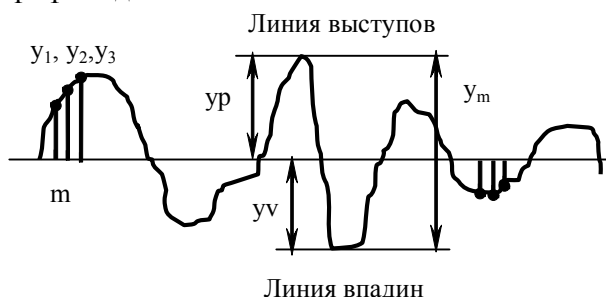


Рис. 1. Параметры шероховатости поверхности

Контроль качества поверхности может осуществляться профилометрами или оптическими интерференционными методами. Для измерения микродефектов оптических поверхностей (к которым можно отнести критичные поверхности волокон-

но-оптических компонентов) обычно используются интерференционные методы [1,2]. Они основываются на анализе интерференционных картин, получаемых при сложении когерентных световых волн (опорной и отраженной контролируемой поверхностью), и квадратичном детектировании колебаний результирующего поля. Ввиду наибольшего распространения интерференционных методов для определения свойств оптических поверхностей международным стандартом ISO10110-5 “Оптические приборы и устройства” предусмотрены характеристики, несколько отличающиеся от регламентируемых отечественными стандартами. Так, свойства поверхности принято характеризовать величиной искривления интерференционных полос по отношению к расстоянию между ними [3,4] (рис.2) или в количестве полос

$$\text{Абберация} = d / \Delta, \quad (3)$$

или в количестве длин волн

$$\text{Абберация} = d / (2\Delta), \quad (4)$$

где Δ – расстояние между полосами; d – девиация полос.

Например, “кривизна поверхности составляет 0,6 ширины между интерференционными полосами”. Характеристики оптических поверхностей согласно требованиям международного стандарта представляются в виде $3/A(B)C \text{ rms}_x < D$, где вместо x подставляется t , I или a (параметры, назначение которых раскрывается в стандарте), а символы A , B и C характеризуют виды деформации поверхности: среднее искривление, вращательную и невращательную симметричную деформацию (параметр типа «пик-впадина» - peak-to-valley).

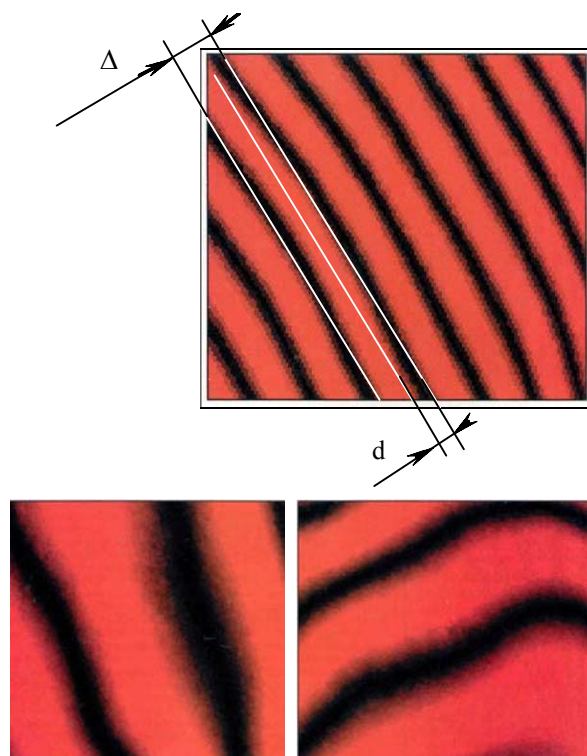


Рис. 2. Интерференционные картины оптических поверхностей

Другой характеристикой, рекомендуемой ISO 10110-5, является среднеквадратичное значение функции отклонения формы волнового фронта по анализируемой поверхности, ограниченной апертурой контроля – rms (root mean square):

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} . \quad (5)$$

Параметр P-V наиболее широко используется, однако является не совсем удачным, так как его большое значение может соответствовать только одной интерференционной полосе. При этом на данном одиночном дефекте потери света будут незначительные. Параметр rms характеризует среднеквадратичную ошибку профиля по всей поверхности, тем самым давая более объективную оценку ее топологии. В соответствии с положениями стандарта ISO 10110-5 состояние оптических поверхностей, представленных на рис. 2, может быть записано следующим образом:

$$3/0,6(0,75)0,2 \quad \text{или}$$

$$3/0,6(0,75) \text{rms}_a < 0.10, \quad \text{или}$$

$$3/0,6 \text{rms}_i < 0.11 \quad \text{rms}_a < 0.10, \quad \text{или}$$

$$3/0,6 \text{rms}_i < 0.11, \quad \text{или}$$

$$3/\text{rms}_t < 0.17.$$

Целью исследований является повышение точности и достоверности контроля формы критических поверхностей коммутационных волоконно-оптических компонентов за счет автоматизированного анализа интерференционных изображений. Цель достигается использованием для восприятия интерференционного изображения матричного фотоприемника высокого пространственного разрешения и созданием методики компьютерной обработки распределения интенсивности интерференционного поля, создаваемого поверхностями волоконно-оптических компонентов.

3. Постановка задачи

По структуре элементы коммутационных компонентов (самые распространенные представители – наконечники оптических соединителей) в общем случае могут состоять из очень незначительных по площади металлических, керамических, полимерных и стеклянных слоев, которые имеют различные физико-химические свойства. Полировка торцевой поверхности оптического наконечника выполняется в несколько приемов двумя методами: свободным (не фиксированным) и связанным абразивом. В обоих случаях все же могут оставаться дефекты в виде сколов и царапин, которые не только увеличивают потери в соединении, но и впоследствии могут вызвать микроразрушения волокна, капилляра в процессе воздействия климатических и механических факторов, что, в конце концов, приводит к еще большему возрастанию потерь оптического сигнала.

Следующим приемом, снижающим обратные потери, является придание особой формы торцу оптического наконечника. С этой целью в процессе полировки формируется торцевая поверхность с определенными сферичностью и углом. Обычно существуют соединители с плоской (FC-flat connector), сферической (физический контакт – Physical Contact-PC, супер-PC, ультра-PC) и угловой сферической полировкой (Angled PC-APC). Все PC-соединители имеют скругленный торец, обеспечивающий контакт только световодов, не допуская соприкосновения металлических и иных частей наконечника. При этом также исключается промежуток воздух-стекло в контакте сердцевин световодов. В APC-соединителях (рис.3) создаются условия для вывода отраженного сигнала в оболочку. Для них характерно низкое обратное отражение, но при немного больших вносимых потерях. Зависящее от угла полировки увеличение вносимых и обратных потерь, в свою очередь, определяется числовой апертурой волокна. Фактически угол полировки должен равняться апертурному углу волокна. В настоящее время наиболее типичными являются значения угла 5° и $8^\circ \pm 0,5^\circ$ (см. рис.3).

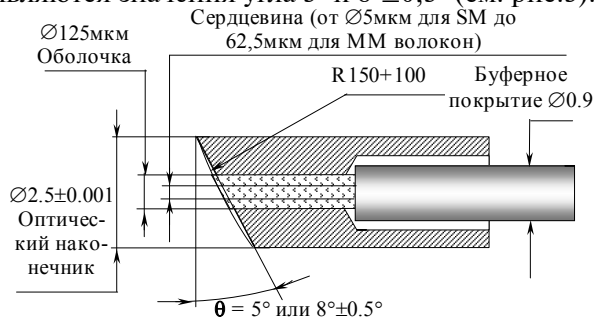


Рис. 3. Схема конструкции APC-соединителя

Согласно требованиям технических условий производителя, шероховатость по параметру R_a торца соединителей с физическим контактом (PC-соединителей) после обработки не должна превышать 0,035 мкм. С учетом приведенных особенностей должна решаться задача создания интерференционного метода контроля параметров поверхностей волоконно-оптических коммутационных компонентов. Метод должен быть пригоден для анализа поверхностей нескольких типов. Набор параметров должен включать устанавливаемые отечественным и международным стандартами.

4. Теоретические основы интерференционных методов контроля параметров коммутационных волоконно-оптических компонентов

Для формирования интерференционного изображения торца наконечника соединителя может быть использован двухлучевой микроинтерферометр, схема которого представлена на рис. 4.

Вместо окуляра или фотографической приставки на интерферометре устанавливается видеокамера на приборах с зарядовой связью. Сформированное на элементах ПЗС-матрицы изображение поэлементно вводится в персональный компьютер для дальнейшей обработки (рис. 5).

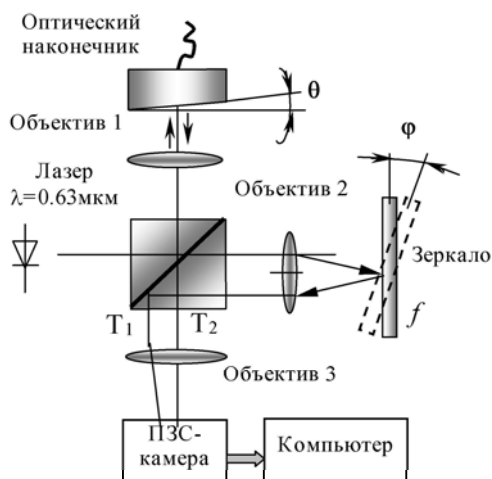


Рис. 4. Схема установки, реализующей интерференционный метод контроля коммутационных волоконно-оптических компонентов

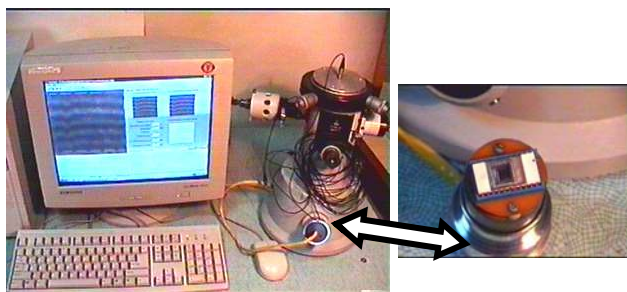


Рис. 5. Система контроля параметров шероховатости поверхностей волоконно-оптических компонентов и модуль видеокamеры

В поле зрения микроинтерферометра одновременно наблюдаются интерференционные полосы и исследуемая поверхность. Интервал между двумя соседними полосами соответствует разности хода в одну длину волны. Микро топография поверхности, а также присутствующие поверхностные дефекты, такие как царапины, трещины, сколы, превышающие $\lambda/2$ (λ – длина волны), приводят к искривлению полос. Степень кривизны пропорциональна величине дефекта и параметрам интерферометра. На рис. 6 хорошо видно смещение полос в области кварцевого капилляра, свидетельствующее о некотором возвышении оптического волокна над ним.

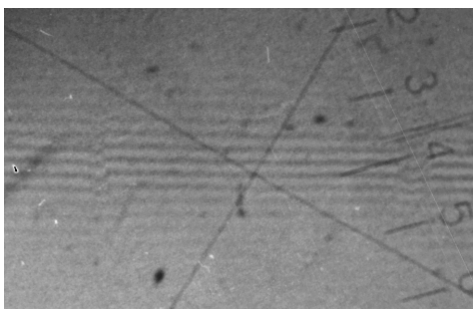


Рис. 6. Интерференционное изображение, сформированное торцом оптического наконечника

Наибольшее смещение полос наблюдается на границе оптического волокна и клеевой композиции,

где имеется значительная выборка материала. Глубина дефекта определяется по значению кривизны и смещению интерференционных полос.

Как уже отмечалось, сферическая форма торца способствует физическому контакту только поверхностей волокон, исключая соприкосновение втулок. Поэтому достаточно контролировать угол полировки торца только волокна. Данная особенность ограничивает базовую область контроля размерами оптического волокна. Это упрощает практическую реализацию, так как не требует оптических приборов с широким полем зрения или прецизионных подвижек координатного стола. Также анализируется поверхность только одного класса – стекло, тогда как втулка может быть стальной или керамической с отличающимися коэффициентами отражения.

В обычном режиме зеркало микроинтерферометра наклонено на незначительный угол φ . В результате лучи, падающие на его разные области, проходят различные пути и возникает разность хода, которая линейно изменяет фазу колебаний луча T1 и T2 вдоль поля зрения микроинтерферометра. Благодаря этому при идеально гладкой и перпендикулярной испытуемой поверхности видеокamera наблюдает систему параллельных интерференционных полос “равной толщины”. Смещение объекта приводит к перемещению полос, а изменение угла наклона φ – к изменению их размеров и расстояния между ними.

Эффект от малого наклона зеркала аналогичен интерференции в плоском оптическом клине (рис. 7).

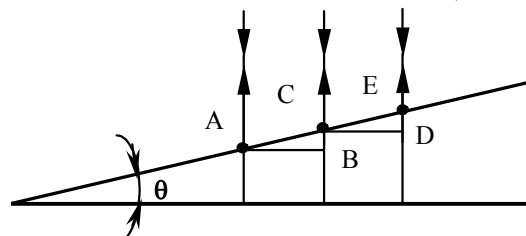


Рис. 7. Схема, поясняющая образования оптической разности хода

Допустим, в точках А, С, Е наблюдаются интерференционные максимумы интенсивности. Это условие выполняется, если разность хода h возрастет на расстояние, равное длине волны, т.е. $BC=DE=\lambda_1 = \lambda / n$ (где λ – длина волны в воздухе, n – показатель преломления материала оптического клина). Если для образования оптической разности хода h используется призма, тогда n – показатель преломления материала призмы. В случае формирования разности хода с использованием наклонного зеркала – n – показатель преломления воздуха. Условие для максимумов интенсивности имеет вид

$$h = (2m\lambda)/(2n), \quad (6)$$

где $m = 1, 2, \dots$ – порядок интерференции.

Микроинтерферометр позволяет определить кривизну полос с разрешением 0,1 интервала между полосами. Такое смещение соответствует размеру дефекта $0,1 \cdot \lambda / 2$ (разность хода λ). При исходной длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ эта величина составляет $0,05 \cdot \lambda = 0,032 \text{ мкм}$.

На основании рис. 7 и (6) можно записать

$$2 \cdot \Delta \cdot \text{tg}\theta = \lambda / n. \quad (7)$$

Так как для малых углов (в том числе для $\theta \leq 8^\circ$) $\text{tg}\theta \approx \theta$ рад, то расстояние между полосами

$$\Delta = \lambda / (2 \cdot n \cdot \theta). \quad (8)$$

Поскольку пространственная ориентация плоскости торца случайна и заранее не известна, то для измерения в схеме микроинтерферометра следует изменить назначение объекта и зеркала. Необходимо установить штатное зеркало перпендикулярно к ходу лучей ($\varphi = 0^\circ$), а в качестве наклонного зеркала использовать торец APC-соединителя. Выравнивание зеркала достигается помещением в плоскость объекта плоского эталонного зеркала и устранением интерференционной картины путем уменьшения угла поворота наклонного зеркала φ .

При стандартных значениях угла полировки торца оптического наконечника расстояние между полосами Δ для угла 5° будет составлять около 8 мкм и для угла 8° – около 5 мкм. Эти значения могут быть легко зафиксированы с помощью приведенной установки контроля и с использованием цифровых процедур обработки данных.

Наличие дефекта на поверхности, например, углубления, вызывает смещение области возникновения разности хода. Данная особенность поясняется на рис. 8. Дефект размером OC' вызвал уменьшение расстояния между полосами на величину d .

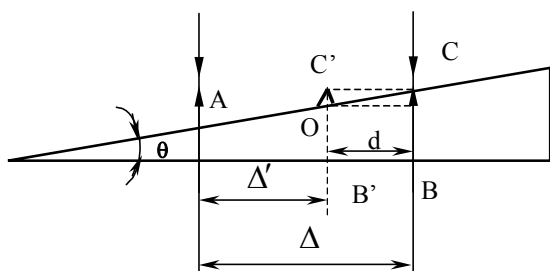


Рис.8. Схема, поясняющая возникновение смещения интерференционных полос на углублении

На основании рис. 8 и (6), (7) можно вывести выражение для глубины дефекта δ :

$$\begin{aligned} \delta = OC' &= BC - \Delta' \text{tg}\theta = BC - \Delta' \cdot BC / \Delta = \\ &= BC(1 - \Delta' / \Delta) = (\lambda / 2) \cdot (1 - \Delta' / \Delta) = \\ &= \frac{\lambda}{2} \left(1 - \frac{\Delta - d}{\Delta} \right) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{d}{\Delta}. \end{aligned} \quad (9)$$

С помощью (9) подтверждается вывод о том, что глубина дефекта δ может быть измерена в единицах относительного смещения интерференцион-

ных полос по отношению к расстоянию между полосами (см. рис. 8) в виде: кривизна поверхности составляет d / Δ полос или $d / (2\Delta)$ длин волн (так как $\Delta = \lambda / 2$).

Формула является частотно-зависимой, поэтому непременным условием измерения величины дефектов поверхности должно быть использование высококогерентных источников излучения – лазеров.

Рассмотренные положения касаются создания и использования для контроля качества поверхностей интерференционных картин типа «полос равной толщины». Другой разновидностью интерференции, возникающей на сферических поверхностях, являются интерференционные картины в виде колец (кольца Ньютона). Основной отличительной особенностью данного вида есть возможность определения радиуса кривизны сферических поверхностей. Областью приложения в контроле волоконно-оптических компонентов для данного типа интерференции может быть контроль сферичности оптических наконечников с физическим контактом (PC-connectors). Используя интерференцию в виде полос равной толщины, также можно определить сферичность, однако процесс обработки при этом усложняется, так как приходится проводить анализ отдельно по ортогональным осям, поворачивая объект контроля. На рис. 9 представлена схема, объясняющая возникновение оптической разности хода и образование интерференционного изображения в виде колец Ньютона.

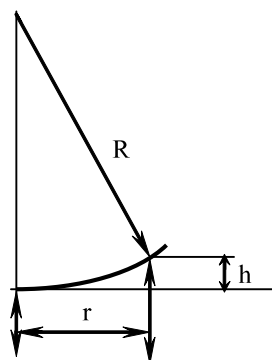


Рис. 9. Образование разности хода на сферической поверхности

Формирование интерференции также основано на принципах оптического клина, однако с увеличивающимся локальным углом по мере удаления от вершины сферы. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению толщины полос и расстояния между ними.

На основании рис. 9 можно выразить условие максимума (6) через радиус кривизны сферы R и радиус интерференционной полосы r :

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (10)$$

Из (6) и (10) получаем выражение для определения кривизны поверхности:

$$R = \left(\frac{h^2 + r^2}{2h} \right) \approx r^2 / (2h) = r^2 / (2m\lambda). \quad (11)$$

Таким образом, при разработке метода контроля качества поверхностей волоконно-оптических компонентов по измеренному распределению интенсивности в интерференционной картине могут быть определены все рассмотренные параметры. Как видно из предшествующих рассуждений, эта задача является производной от задачи извлечения полезной информации из измеренной интерферен-

ционной картины. Такой информацией является знание точного месторасположения максимумов интерференционных полос. Воздействующие в процессе измерения интерференционных картин факторы в значительной мере искажают реальную картину, вызывая присутствие в сигнале аддитивных и мультипликативных шумовых составляющих. Поэтому основным моментом при разработке интерференционных методов является создание математических методов обработки, позволяющих с высокой достоверностью и точностью восстановить трассы интерференционных максимумов, по которым в дальнейшем могут быть определены рассмотренные параметры.

Рассмотрим особенности формирования интерференционных изображений и их использование для контроля поверхностей волоконно-оптических компонентов. При сложении колебаний с амплитудами a_k и фазами φ_k интерференционный сигнал s определяется преобразованием суммарного колебания в форме

$$s = \mu \left[\sum_k a_k \exp(j\varphi_k) \right]^2 = \mu \left[\sum_k a_k \cos(\varphi_k) \right]^2 + \mu \left[\sum_k a_k \sin(\varphi_k) \right]^2, \quad (12)$$

где μ – коэффициент преобразования. Результирующая фаза определяется в виде

$$\operatorname{tg} \varphi = \left[\sum_k a_k \sin(\varphi_k) \right] \cdot \left[\sum_k a_k \cos(\varphi_k) \right]^{-1}. \quad (13)$$

При фиксированных значениях a_k интерференционный сигнал зависит от разности фаз интерферирующих волн, которая определяется геометрическими характеристиками интерферометра, показателем преломления среды распространения световых волн, свойствами источника излучения. Разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ двух волн, имеющих оптическую разность хода h , определяется выражением

$$\Delta\varphi = 2\pi h / \lambda = 2\pi N_1 = 2\pi C_1 + \varepsilon_1, \quad (14)$$

где λ – длина волны; N_1 – порядок интерференции; $C_1 = 0, \pm 1, \dots$ – целый порядок интерференции; $0 \leq \varepsilon_1 \leq 1$ – дробная доля порядка, $\varepsilon_1 = \varepsilon / 2\pi$. Из выражения (10) с учетом (14) и свойства периодичности тригонометрических функций получим при $k = 1, 2$ сигнал на выходе двухлучевого интерферометра:

$$s = s_0 + s_m \cos \varepsilon. \quad (15)$$

Задача состоит в определении значений ε или значений $\Delta\varphi$ в (14) по измеренным значениям интерференционного сигнала s . С математической точки зрения эта задача является нелинейной обратной задачей, которая решается, вообще говоря, в условиях априорной неопределенности параметров s_0, s_m , зависящих от времени и пространственных координат. Как известно, характерной особенностью решения обратных задач является необходимость преодоления проблемы некоррект-

ности, т.е. неустойчивости решения при незначительных погрешностях в исходных данных. Указанные особенности определяют специфику методов автоматической обработки интерференционных сигналов: необходимо определить сопутствующие параметры или исключить их влияние, выполнить нелинейное преобразование, исключить неоднозначность при измерении фаз ε и неустойчивость при восстановлении значений полной фазы сигнала φ .

Для двухлучевого интерферометра характерным является узкополосный сигнал (информационная составляющая)

$$s_c = s_m(x) \cos[\varepsilon + 2\pi u_0 x + \varphi(x)], \quad (16)$$

где x – независимая переменная; $s_m(x)$ и $\varphi(x)$ – функции, которые изменяются медленно по сравнению с периодом $1/u_0$ информационной составляющей, имеющей частоту u_0 . С учетом (15) и (16) можно определить вектор параметров интерференционного сигнала $\Theta = (s_0, s_m, \varepsilon, u_0)^T$. На предварительном этапе обработки, в частности при подавлении фоновой составляющей s_0 в (15) и выделении полезного сигнала (16) обычно используются методы линейной обработки сигналов. Для устранения влияния помех импульсного характера и ложных периодических составляющих эффективными оказываются методы нелинейной фильтрации.

Операторное уравнение интерферометрической системы в случае детерминированного характера сигнала $s(x, \varepsilon, \Theta)$ и аддитивного шума с нулевым средним значением имеет вид

$$\hat{\varepsilon} = T\{\Theta_a, s(x, \varepsilon, \Theta) + n(x)\} = aT\{s(x, \varepsilon)\}, \quad (17)$$

где Θ_a – вектор параметров линейного усреднения значений сигнала s ; a – собственные значения оператора T , соответствующие гармоническим составляющим интерференционного сигнала.

Таким образом, задача сводится к синтезу оператора обработки, реализующего обратные тригонометрические функции и инвариантного к вектору параметров Θ . Операторное уравнение иллюстрируется рис. 10.

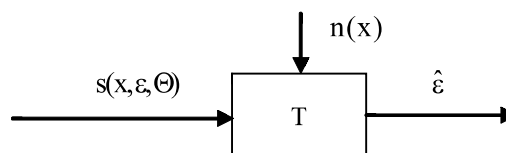


Рис. 10. Системное преобразование интерференционного сигнала

В процессе восприятия интерференционного сигнала матричным многоэлементным фотоприемником компоненты сигнала представляются в виде последовательности равноотстоящих отсчетов интерференционного сигнала (16), взятых в дискретных точках $x_k = k \cdot \Delta x$, где Δx – шаг дискретизации, т.е. $s(k) = s(x_k)$. Также сигнал (16) с учетом фоновой

составляющей представляет значения яркости в сечении двумерной интерференционной картины.

Процесс компьютерной обработки дискретной последовательности отсчетов интерференционного сигнала в общем виде можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 11.

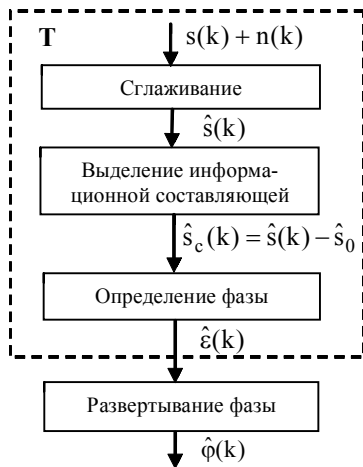


Рис.11. Операции обработки вектора наблюдений интерференционного сигнала

5. Выделение информационной составляющей интерференционного сигнала

На рис. 12 приведен фрагмент распределения амплитуды интерференционного поля для трех полос в одномерном варианте, полученный при контроле торцевой поверхности наконечника разъемного оптического соединителя на установке, выполненной по схеме на рис. 4. Количество элементов равно 64 при разрешающей способности системы микроинтерферометр-камера ПЗС 0,15мкм. Сигнал содержит значительные шумовые составляющие, которые в данном виде делают невозможным определение интерференционных максимумов. Первые два блока оператора T выполняют устранение высокочастотного шума измерения и сопутствующих параметров: фоновой s_0 и модуляционных составляющих s_m . Данная задача решена с использованием полосового фильтра Баттерворта, имеющего максимально плоскую амплитудно-частотную характеристику в полосе пропускания.

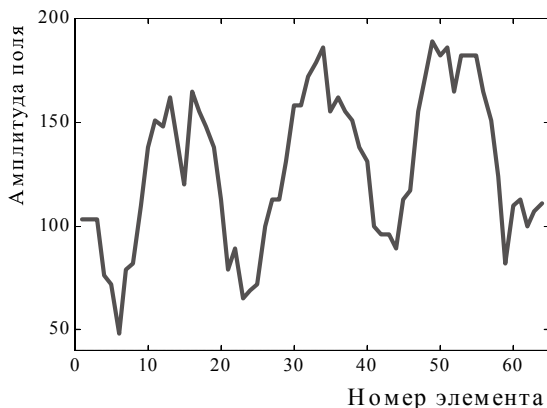


Рис. 12. Фрагмент распределения амплитуды интерференционного поля для трех полос

Для выбора характеристик фильтра необходимо оценить спектральный состав интерференционного

изображения. На рис.13 приведено окно инструмента интерактивного проектирования фильтров Signal Processing SPTOOL MatLab, на котором совместно представлены спектр сигнала, изображенного на рис.12, и АЧХ проектируемого фильтра.

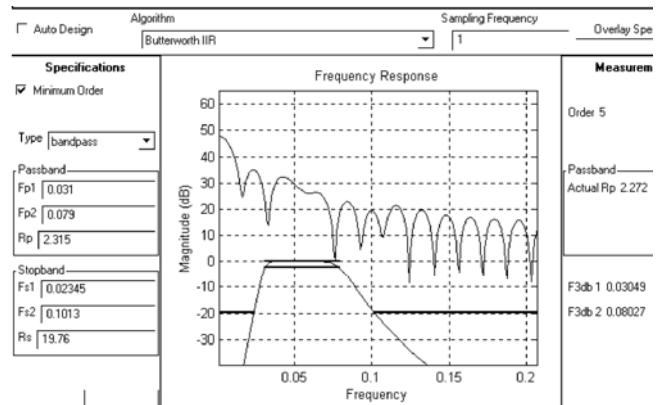


Рис.13. Окно проектирования фильтра. Содержит спектр интерференционного поля, приведенного на рис.12. Полезная информация содержится во 2-й, 3-й и 4-й гармониках

Для анализируемого случая число полос $K = 3.5$, количество отсчетов $N = 64$ и разрешение системы микроинтерферометр-матрица ПЗС $\Delta x = 0.15\text{мкм}$. В этом случае нулевая пространственная частота полезного сигнала может быть определена из выражения

$$u_0 = K / (N \cdot \Delta x) \quad (18)$$

и для указанных условий (см. рис. 12) составит $u_0 = 3.5 / (64 \cdot 0.15) \approx 0.37\text{мкм}^{-1}$ или в количестве полос на один элемент матрицы: $u_0 = 3.5 / 64 \approx 0.055\text{эл}^{-1}$.

При выборе полосы пропускания полосового фильтра для выделения полезной информационной составляющей интерференционного сигнала необходимо сформулировать требования к нижней и верхней граничной частоте фильтра. Можно воспользоваться тем свойством, что количество гармоник в спектре равно количеству отсчетов анализируемой последовательности. В ходе исследований установлено, что информационные составляющие содержатся в трех соседних гармониках, номер средней из которых соответствует рассчитанному по (18) значению пространственной частоты u_0 (см. рис. 13). Таким образом, граничные частоты полосы пропускания рекомендуется выбирать из следующих условий (полоса пропускания фильтра $3 \cdot \Delta u$):

$$\begin{cases} F_{p1} = u_0 - 1.5 \cdot \Delta u = u_0 - 1.5 / N; \\ F_{p2} = u_0 + 1.5 \cdot \Delta u = u_0 + 1.5 / N \end{cases}, \quad (19)$$

где $\Delta u = 1/N$ — полоса, приходящаяся на одну гармонику, величина, обратная количеству отсчетов N (для сигнала на рис.12 $\Delta u = 1/64 \approx 0.016$).

Путем моделирования определены рекомендуемые характеристики фильтра Баттерворта: порядок $n=3\dots6$, частоты отсечки выбираются из условия

(19). В полосе пропускания фильтр имеет равномерную плоскую амплитудную и линейную без разрывов фазовую характеристику.

Первая особенность способствует передаче в выходной сигнал фильтра всей мощности полезных составляющих, а вторая — не вносит фазовых искажений.

Из рис. 14 видно, что предлагаемый метод предварительной обработки интерференционного изображения цифровым полосовым фильтром Баттерворта 5-го порядка обеспечивает высококачественное выделение полезных составляющих информационного сигнала s_s , устраняет сопутствующие компоненты — фоновую s_0 и, частично, модуляционную s_m составляющие, высокочастотные шумы измерения, а также обеспечивает сохранение фазы сигнала. В то же время заметно, что в сигнале содержится медленно изменяющаяся амплитудная модуляция, вызванная неравномерностью яркости интерференционной картины, которая представляет собой мультипликативный шум (коррелированный с сигналом) и может увеличить погрешность определения максимумов интерференционных полос. Это существенная особенность, так как из рассмотренных выше положений следует, что при обработке интерференционных картин для определения качества поверхностей коммутационных волоконно-оптических компонентов требуется найти положения интерференционных экстремумов. Задача определения максимумов наиболее оптимально решается через нахождение корней фазовой функции. Для их нахождения рациональнее всего использовать преобразование Гильберта и теорию аналитических сигналов, что позволяет уменьшить влияние мультипликативного шума и фазовых искажений интерференционного сигнала. При этом независимо от формы полезной составляющей сигнала ей ставится в соответствие сопряженная по Гильберту составляющая, имеющая такую же огибающую $s(x)$, а вычисленные значения фазы не зависят от $s(x)$.

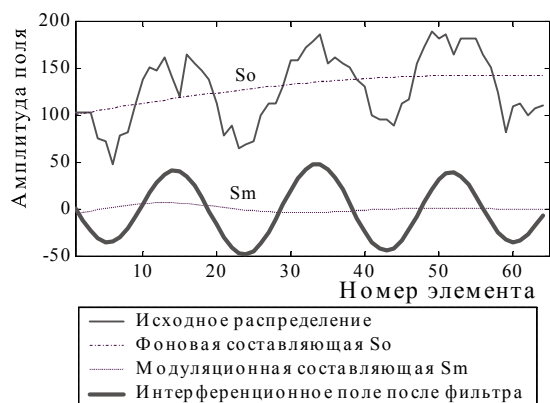


Рис. 14. Распределение интерференционного поля до и после прохождения полосового фильтра Баттерворта 5-го порядка (рис.18)

6. Выводы

Проанализированы главные сведения, лежащие в основе интерференционных методов контроля поверхностей. В качестве такого метода выбран двухлучевой, реализованный на принципах интерферометра Майкельсона.

Новизна полученных результатов исследований характеризуется следующими положениями:

- получил дальнейшее развитие интерференционный метод применительно к контролю параметров волоконно-оптических компонентов, получены математические выражения, связывающие характеристики формы критических поверхностей с величиной локального отклонения профиля;
- выполнено математическое описание задачи анализа интерференционного изображения, приведена математическая модель интерференционного сигнала в условиях присутствия фоновой s_0 , модуляционных $s_m(x)$ и шумовых $n(x)$ составляющих;
- создана модель цифровой обработки интерференционного сигнала, сформированного критическими поверхностями волоконно-оптических компонентов, оператор преобразования которой включает сглаживание, выделение информационной составляющей, определение фазы сигнала и ее корней;
- получены соотношения, связывающие пространственную частоту интерференционного сигнала с количеством отсчетов на его период и пространственным разрешением измерительной системы интерферометр-фотоприемник;
- предложен и исследован метод выделения полезной информационной составляющей интерференционного изображения поверхностей волоконно-оптических компонентов из смеси с фоновыми, модуляционными и импульсными шумами на основе использования полосовых фильтров Баттерворта, разработаны требования к выбору порядка фильтра и граничных частот полосы пропускания.

Практическая ценность результатов исследований состоит в том, что они являются основой для разработки технологии и автоматизированного технологического оборудования интерференционного контроля критических поверхностей волоконно-оптических компонентов, создания алгоритмов и программ для анализа интерференционных изображений и определения параметров формы критических поверхностей.

Дальнейшие исследования предполагают разработку методики идентификации расположения интерференционных максимумов, которая должна обеспечить надежное их определение в условиях низкой крутизны изменяющегося сигнала в точках экстремумов и присутствия мультипликативных модуляционных шумов.

Литература: 1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719с. 2. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 1998. 240с. 3. Bray M. Measuring optical quality/Photonics spectra, July, 2000. P.108-114. 4. Page D., Routledge I. Using Interferometry for Quality Monitoring // Photonics spectra, November, 2001. P.147-153.

Поступила в редколлегию 05.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук Доля Г.Н.

Филипенко Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и автоматизации производства РЭС и ЭВС ХНУРЭ. Научные интересы: компоненты волоконно-оптических систем передачи информации и технология их производства. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-86.