

11. Лазерные измерители линейных размеров

11.1 Основные свойства лазерного излучения и особенности его применения в ОНК

Применение оптических квантовых генераторов (лазеров) позволяет не только повысить точность, достоверность, скорость измерений различных параметров, но в ряде случаев дает возможность вообще впервые осуществить количественную оценку характеристик многих сложных процессов и явлений, существенно расширить границы традиционных оптических методов контроля и создать принципиально новые методы оптического неразрушающего контроля, например, голографические, акустооптические и др.

ОНК с использованием лазерного излучения базируется на применении основных свойств лазерного излучения – *монохроматичности, высокой направленности, высокой мощности, малой длительности импульса, высокой степени поляризации, когерентности* .

Высокая монохроматичность (узкий спектр частот) излучения лазера позволяет широко использовать методы спектральной селекции объектов. В настоящее время число излучаемых лазером различных длин волн достигло нескольких сотен в УФ, ВИ и ИК диапазонах спектра. Созданы лазеры с плавной перестройкой длины волны излучения.

Лазеры излучают в очень малых телесных углах, типичный угол расходимости лазерного пучка составляет порядка $3 \div 10$ мрад. Такая *острая направленность* излучения обеспечивает эффективность сканирующих систем контроля удаленных объектов .

Высокая мощность лазерного излучения позволяет использовать в ОНК нелинейные оптические явления, в том числе параметрическую перестройку частоты излучения, самофокусировку света, активную спектроскопию когерентного рассеяния и др. Становится возможным активный оптический контроль, когда дефектные места объекта контроля (дефекты топологии и т.п.) могут локально удаляться испарением под действием луча лазера.

Возможность генерации с помощью лазера *световых импульсов предельно малой длительности* (до 10^{-14} с) позволяет реализовать эффективные методики контроля динамических характеристик объектов.

Излучение лазера обычно линейно поляризовано. Для изменения характера поляризации применяют поляризаторы и компенсаторы различных типов (николи, четвертьволновые пластинки и т.п.). Это свойство лазерного излучения применяется, в частности, в ОНК объектов очень малых толщин (тонкие пленки).

Излучение лазеров обладает свойством *пространственной и временной когерентности*, т.е. регулярностью колебаний в пространстве и времени. Пространственная когерентность означает, что индуцированное излучение атомов по всему сечению активной среды происходит в одной фазе световой волны, при этом ее фронт близок к фронту плоской волны. Для большинства серийных многомодовых лазеров длина когерентности $L \approx 0,1..0,5 м$, для лучших одномодовых лазеров - $L \approx 10 \div 100 м$. Излучение лазера происходит на строго фиксированной частоте ν , которая однако подвержена небольшим изменениям на величину $\Delta \nu$ за счет флуктуаций процесса излучения.

11.2 Классификация ЛИЛР

В технике измерения линейных размеров лазеры применяются благодаря высокой монохроматичности, большой длине когерентности, хорошей стабильности направления луча, хорошей фокусируемости, высокой стабильности частоты (длины волны), большой энергетической яркости. Например, наиболее часто применяемый в ЛИЛР гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0,633 мкм$ имеет длину когерентности $L \sim 10^3 м$, энергетическую яркость $L_e \approx 10^5 Вт/(м^2 \cdot ср)$ и относительную воспроизводимость длины волны

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \sim 10^{-7} \div 10^{-11}.$$

Лазерные измерители линейных размеров сочетают в себе высокое пространственное разрешение с большим быстродействием.

По методу измерения ЛИЛР делятся на системы с использованием:

- сканирования изображения;
- измерения времени распространения;
- модуляции лазерного излучения;
- интерферометрии;
- явления дифракции;

– явления поляризации.

11.3 ЛИЛР с использованием метода сканирования изображения

Идея метода сканирования изображения состоит в том, объект контроля проводят через лазерный луч или, наоборот, по нему сканируют лазерным лучом. Для определения геометрических размеров объекта служат границы тела, времена затемнения или различные условия отражения, например, угол отражения.

По *методу регистрации* рассматриваемые ЛИЛР принято делить на фотокомпенсационные, фотоследящие и фотоимпульсные, а *по способу получения и обработки измерительной информации* – на лазерные системы бегущего луча и лазерные триангуляционные измерители (ЛТИ).

11.3.1 Лазерные системы бегущего луча (ЛСБЛ)

Принцип действия ЛСБЛ основан на сканировании объекта тонким лазерным лучом, перемещение которого в пространстве по заданной траектории осуществляется с помощью специального устройства – сканатора. Наиболее распространены оптико-механические сканаторы, в которых управление лучом в пространстве осуществляется с помощью подвижных зеркал или линз. В последнее время находят применение быстродействующие электро- и акустооптические сканаторы.

При нахождении в зоне облучения измеряемого объекта последний перекрывает лазерный луч в течение определенного интервала времени. Специальное приемное устройство определяет временной интервал боковых сторон отбрасываемой объектом тени и передает эти данные на микропроцессорный анализатор, который и определяет на их основании размеры объекта.

Примером ЛСБЛ может быть лазерный диаметрмер фирм SIRA, (Англия) (рис. 11.1).

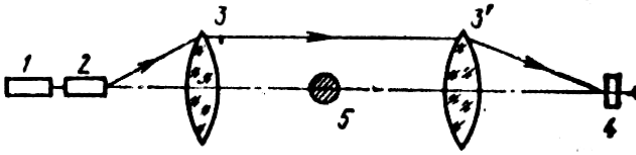


Рис. 11.1 Схема простейшего ЛСБЛ

Прибор состоит из сканатора, фотоприемника и системы регистрации. Луч лазера 1 направляется на зеркало 2, которое находится в фокусе проекционного объектива 3, и после объектива распространяется параллельно его оси. При вращении зеркала луч перемещается параллельно самому себе, пересекает контролируемое изделие 5 и поступает после линзы 3' на фотоприемник 4. В приборе использован оптико-импульсный способ измерения, т.е. длительность импульса фотоприемника пропорциональна размеру изделия. Диапазоны контролируемых диаметров 0,01 – 0,5 мм и 1 – 70 мм, погрешность 0,1%, частота сканирования 50 Гц. Выходной сигнал преобразуется в цифровую форму и поступает в систему сигнализации или АСУ. Подобные сканеры могут выполняться и двухкоординатными.

ЛСБЛ применяют для оценки абсолютных значений размера, а также отклонений размеров от номинальных. С их помощью можно определять размеры и отклонения нескольких деталей, контролировать установку и износ инструмента, оценивать некруглость или биение круглых деталей.

ЛСБЛ могут использоваться автономно или встраиваться в автоматизированные комплексы. При этом расстояние между лазерным блоком и приемным устройством может достигать двух метров, что позволяет оценивать с высокой точностью (до 0,25 мкм) довольно большие размеры.

Благодаря бесконтактности метода, измерение может проводиться в ходе технологического процесса без его остановки. Это обстоятельство особенно важно, например, при необходимости контроля раскаленных стеклянных изделий (волокон, стержней, труб и т.д.) в процессе их получения. Путем измерения времени затенения лазерного луча объектом контроля производится также измерение диаметра горячих (900°C) стальных труб во время технологического цикла; измерение диаметров проволочных канатов; измерение при шлифо-

вании круглых сталей; определение толщин изоляции провода в процессе изготовления; измерение длин ТВЭЛ'ов атомного реактора. Достигаемая точность измерения до 0,25 мкм.

Сканирующее лазерное излучение может использоваться для измерения с высокой точностью толщины (высоты) изделий больших размеров. Такой бесконтактный метод измерений особенно эффективен в металлургическом производстве при оценке размеров крупных слябов, поковок, широкой номенклатуры проката, других объектов, находящихся в технологическом процессе при высоких температурах. Одна из возможных схем подобного измерения представлена на рис.11.2.

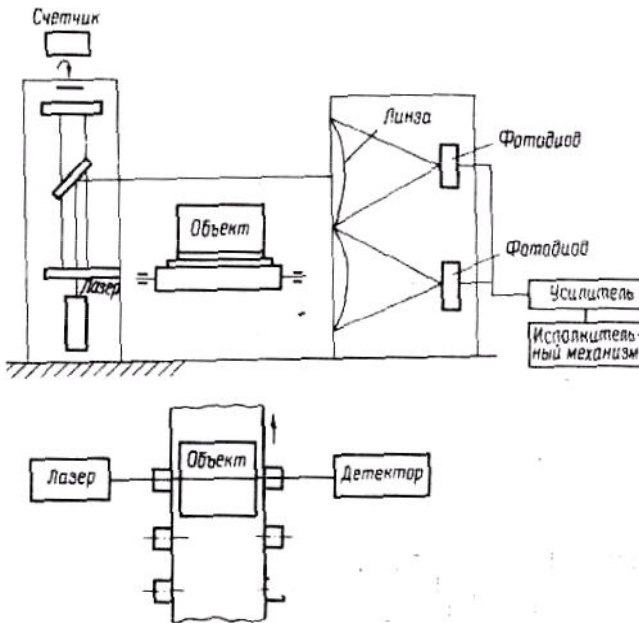


Рис.11.2 Схема лазерной системы дистанционной оценки толщины крупногабаритных объектов

Объект, движущийся по конвейеру, останавливается напротив лазерного излучателя. Включается сканирующее перемещение луча по вертикали. Импульсный генератор сканирует импульсы излучения с частотой один импульс на каждые 0,2 мм перемещения луча. Пока луч перекрыт объектом при перемещении (сканировании луча) призмы, счетчик отсчитывает импульсы (толщину). Как только луч реги-

стрируется фотодиодом, отсчет перемещений прекращается и фиксируется толщина объекта.

В ряде случаев эффективно применение ЛБСЛ с *продольным сканированием (фокусировкой) луча* (рис.11.3).

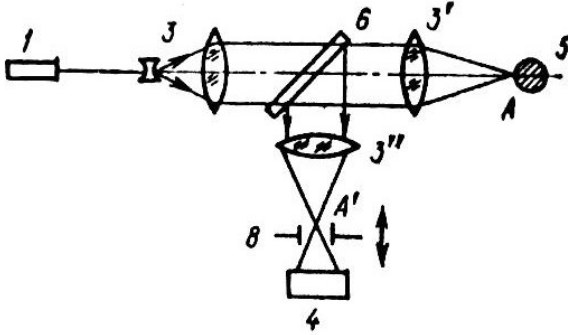


Рис. 11.3 ЛБСЛ с продольным сканированием луча

Свет от лазера 1 с помощью телескопа 3 и объектива 3' фокусируется на объект 5 в точку А. После отражения от объекта свет проходит объектив 3', светоделитель 6 и линзой 3'' фокусируется на диафрагму 8 (точка А'), которая совершает поступательные перемещения вдоль оптической оси. Если точка А' совпадает со средним положением диафрагмы, то в цепи нагрузки фотоприемника 4 протекает ток, интенсивность которого меняется по синусоидальному закону (обычно диафрагма совершает гармонические колебания). При изменении положения объекта максимум сигнала будет соответствовать фазе колебания, отличной от исходной, что фиксируется соответствующим электронным устройством. Подобные системы находят применение для контроля размеров деталей при их обработке на токарных станках и т.п.

ЛИЛР типа ЛСБЛ применяются также (рис.11.4) для определения границы и позиционирования ОК, определения диаметра и провисания материала в виде каната, контроля расстояния между контактами свечи зажигания. В этих случаях относительная погрешность $\sim 10^{-3}$ (0,1%).

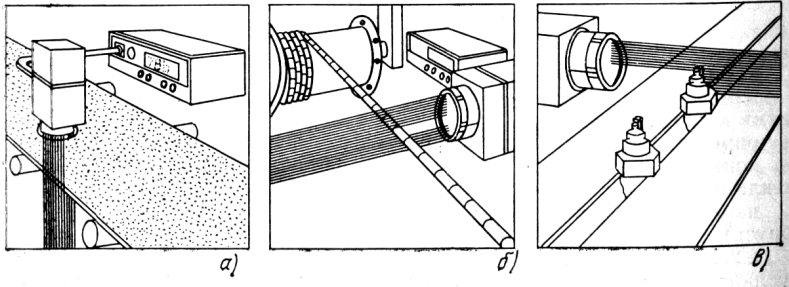


Рис. 6.4 Применение фотоэлектрического метода с использованием границ тени: а – определение границы и позиционирование измеряемого материала; б – определение диаметра и провисания материала в виде каната; в – контроль расстояния между контактами свечи зажигания

Кроме того подобные системы востребованы для определения совпадения и диаметра втулок колес автомашины, контроля перфораторов, контроля параллельности горловин распылителей. В этих случаях геометрия ОК измеряется по степени затенения пучков А, В и С (рис.11.5). Точность измерения $\sim 10 \div 1 \text{ мкм}$.

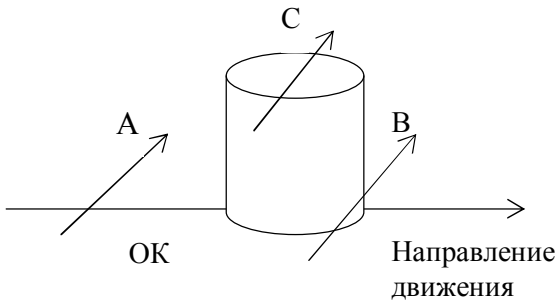


Рис. 11.5

Для определения толщины деталей или разности уровней (например, жидких металлов) применяется метод триангуляции (рис.11.1, 3)). Его идея показана на рисунке 11.6. Световая точка А на поверхности ОК отображается в световую точку А' на приемнике Е, а точка В – в В', которая на приемнике находится на расстоянии x' от

A' . При фиксированном расположении источника света и приемника (известны D и b из рис.11.1, 3)) можно найти расстояние x между A и B . Точность измерения $\sim 10 \div 1 \text{ мкм}$.

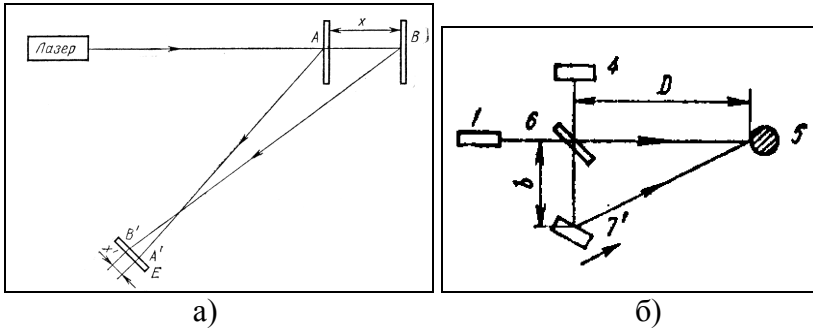


Рис. 11.6 а) - схема применения метода триангуляции: A и B – точки поверхности ОК с расстоянием x между ними; A' и B' – их изображение на приемнике E , б) схема простого ЛТИ

Таким образом, лазерные триангуляционные измерители (ЛТИ) основаны на принципе оптического дальномера с постоянной базой. Подобные системы работают в отраженных от объекта лучах ОКГ. В простейшем случае (рис. 11.6 б)) схема ЛТИ содержит лазер 1, неподвижное зеркало 4, светоделитель 6, вращающееся зеркало $7'$, схему визирования на объект 5 и приемник. Вращая подвижное зеркало, добиваются совмещения на поверхности объекта бликов от прямого и наклонного лучей и определяют расстояние D до объекта по формуле:

$$D = b \cdot ctg\alpha,$$

где b – база ЛТИ, α -- угол поворота зеркала.

Они находят применение в системах толщинометрии, устройствах контроля взаимного расположения объектов и т.п. Достоинства ЛТИ – широкий диапазон контролируемых размеров при значительных расстояниях до объекта в условиях одностороннего доступа к нему.

11.4 ЛИЛР с использованием измерения времени распространения световых сигналов

Для оценки толщины объекта, контроля профиля изделия и других подобных операций может быть использован метод, при котором отклонение размера или контура от номинала определяется по разности времени прохождения отраженных сигналов ($t_N - t_M$). Схема метода показана на рис. 11.7. Лазерный луч от излучателя 1 направляется на дефлектор 2, с помощью которого он периодически смещается с точки N (нулевой уровень) в точку M.

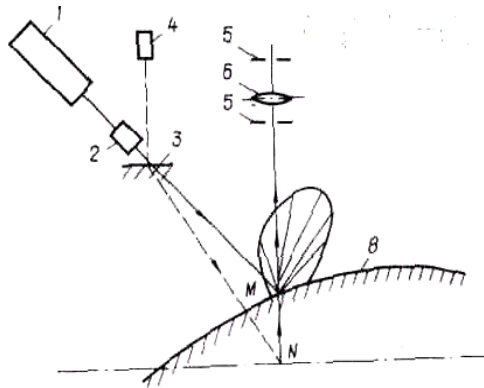


Рис. 11.7 Схема прибора для контроля размерных параметров изделий

Фактическое значение нулевого уровня обеспечивается с помощью полупрозрачного зеркала 3 и фотодиода 4. при оценке значения используется составляющая диффузно отраженного излучения, проходящая через диафрагмы 5 и линзу 6 на фотодиод 7. Таким образом, определяется относительная величина отклонения размера (контура) объекта 8 от заданного (нулевого) значения.

Рассмотренный метод измерения реализован, например, в приборах фирмы Holo System (ФРГ). С их помощью можно обеспечить точность измерения (контроля) до 10 мкм при скорости измерений до 1800 измерений в секунду.

Приборы используются для оценки толщины листового металла, бумаги, непрозрачной фольги, пластика; для определения уровня жидкости в открытых или закрытых емкостях; для оценки точности

профиля, например, лопасти турбин; для контроля положения объекта на расстоянии от 5 мм до 50 м.

Рассмотренная схема реализована также в лазерных дальномерах, высотомерах и лазерных локационных станциях (лидарах). Функциональные схемы в этих приборах аналогичны радиолокаторам (разница состоит в основном в характеристиках излучателя и антенн). Системы лазерной локации имеют преимущества по сравнению с радиолокаторами: большая точность измерения доплеровского сдвига частот, лучшее разрешение, большая точность определения координат объекта.

Рассматриваемый метод (иногда его называют импульсным) основан на измерении промежутка времени τ , необходимого для прохода короткого калиброванного импульса излучения до ОК и обратно, исходя из количества калиброванных импульсов n :

$$\tau = nT = \frac{2D}{c},$$

где T – период импульса, D – искомое расстояние (дальность), c – скорость света.

Погрешность измерений дальности ΔD в этом методе определяется в основном погрешностью измерения времени $\Delta \tau$:

$$\Delta D \approx \frac{1}{2} c \cdot \Delta \tau$$

(погрешностью Δc можно, как правило, пренебречь). Максимальная погрешность ΔD в этом методе порядка 6 мм, поэтому его используют только для измерения больших расстояний, например:

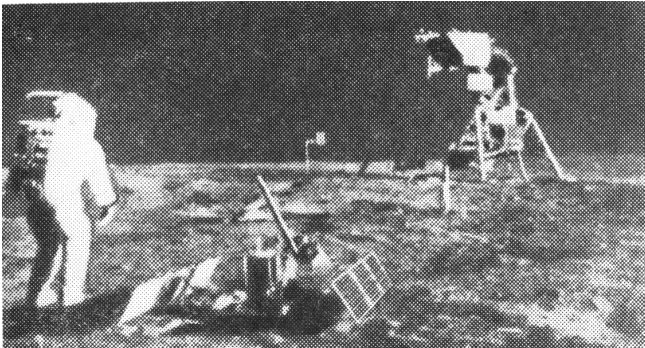


Рис. 11.8 Измерение расстояния Земля – Луна с помощью лазерного отражателя, установленного на поверхности Луны.

- геодезические измерения расстояний в интервале от нескольких метров до нескольких километров ($\Delta D/D \sim 10^{-3}$);
- определение траектории спутников для $D \sim 100 \div 300 \text{ км}$ ($\Delta D/D \sim 10^{-7}$);
- измерение расстояния Земля – Луна. Установленные на Луне отражатели («Аполлон – 11», США) позволяют осуществить прием световых сигналов на Земле ($\Delta D \sim 0,15 \text{ м}$) (рис.11.8).

11.5 ЛИЛР с модуляцией лазерного излучения.

Для модуляции лазерного излучения существует два способа, в зависимости от которых и различаются конструкции ЛИЛР.

Фазовый метод измерения дальности

Интенсивность светового пучка, который проходит измеряемое расстояние, *модулируется частотами СВЧ-диапазона*. Регистрируется запаздывание фазы модулируемого сигнала $\Delta\varphi$ при двойном прохождении измеряемого расстояния D . Тогда

$$D = \frac{c}{4\pi \cdot \nu_M} \cdot \Delta\varphi = \frac{c}{2\nu_M} \left\{ M + \frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} \right\},$$

где c – скорость света, ν_M – частота модуляции, M – целое число, $\Delta\varphi_1$ – «дробная часть» фазового сдвига ($0 \leq \Delta\varphi_1 \leq 2\pi$). Для определения M измерения D производят на нескольких частотах.

Этот метод зависит от атмосферных воздействий.

Двухчастотный метод.

Применяется двухчастотный лазер с частотами линейно поляризованных сигналов f_n и f_s и взаимноперпендикулярными плоскостями поляризации (рис.11.9). На приемнике 2, после сведения плоскостей поляризации в одну, возникает сигнал биений на частоте модуляции $f_n - f_s$ с постоянной фазой, а на приемнике 3 – с фазой, зависящей от удаления до цели. С помощью фазового дискриминатора 5 измеряется разность фаз между сигналами, поступающими на приемники 2 и 3. кратные длины волны биений, соответствующие изме-

ряемому расстоянию, определяются путем изменения длины биений. Достижимая $\Delta D \sim 0,1 \div 1 \text{ мм}$ для $D \sim 1 \div 10^3 \text{ м}$.

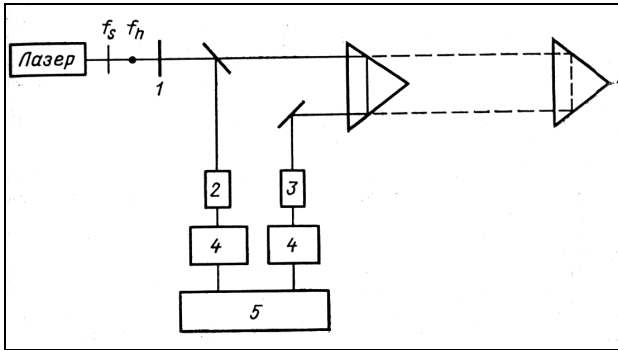


Рис.11.9 Схема применения двухчастотного метода для измерения расстояний: 1 – поляризатор; 2, 3 – приемники; 4 – усилитель; 5 – фазовый дискриминатор

Применения:

- геодезическое измерение расстояний при визуальной связи между конечными точками измеряемого отрезка $D \sim 1 \div 10^3 \text{ м}$;
- измерение изменений высоты поверхностей, например, масла, воды и т.д.

11.6 Лазерный телевизионный проектор светового сечения

Высокая степень направленности светового пучка поозволяет создавать эффективные системы контроля профиля изделий сложной формы, например, лопаток турбин. Плоский лазерный луч, сформированный специальной оптической системой, при пересечении с контролируемой деталью образует на ее поверхности светящуюся полоску, форма которой точно соответствует профилю объекта. Телевизионная камера формирует изображение светового сечения лопатки на экране телевизионного дисплея. Одновременно видеосигнал поступает в электронный блок, состоящий из аналого-цифрового преобразователя, мини-ЭВМ и устройств регистрации данных. В памяти ЭВМ хранятся данные о координатах сечения эталонной лопатки, и при перемещении лопатки происходит их непрерывное сравнение с координатами контролируемого объекта. При превышении разности этих координат допустимого значения лопатка бракуется. В устройствах использован газовый лазер мощностью 5 мВт. Телекамера обеспечивает не менее 2000 отсчетов по любой

строке изображения. Созданы аналогичные системы для контроля профиля проката в процессе изготовления и ряда других изделий.