

12. Измерители линейных размеров с использованием волновых свойств света

12.1 Лазерные интерферометры

Бесконтактные оптические методы измерения линейных размеров и перемещений в течение многих лет использовали явления интерференции, дифракции и др., однако обычные источники света не позволяли полностью раскрыть возможности этих методов.

Высокая когерентность и монохроматичность лазерного излучения позволяют проводить измерения с большой точностью и на расстояниях, значительно превышающих те, которые доступны системам с обычными источниками света. При использовании обычных (некогерентных) источников света самое большое расстояние, которое может быть измерено интерферометрическим способом, равняется примерно 500 мм. При использовании газового лазера в качестве источника света можно расширить диапазон измерения до 60 м. Этого достаточно для того, чтобы применить интерференционный прибор при монтаже, например, ракеты или самолета, отсчете точных перемещений узлов крупногабаритного прецизионного оборудования и пр.

Лазерные измерительные интерферометры (ЛИИ) обычно строятся по двулучевой схеме Майкельсона, включающей лазер, светоделительное зеркало и два отражателя, один из которых неподвижен, а другой жестко связан с изделием (рис. 12.1).

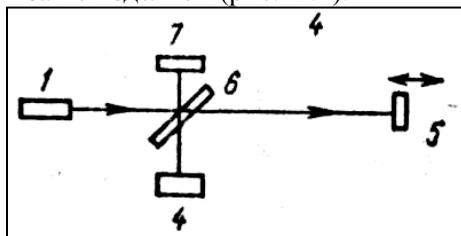


Рис. 12.1 Схема лазерного измерительного интерферометра Майкельсона: 1 – лазер; 4 – фотоприемник; 5 – ОК; 6 – светоделитель; 7 – опорный зеркальный отражатель

Отразившись от эталонного и объектного зеркала, пучки света соединяются и интерферируют. На выходе из прибора с помощью фо-

тометрического счетчика подсчитывается число полос интерференции, пропорциональное перемещению изделия.

В современных интерферометрах вместо светоделительного зеркала часто используют поляризатор, который производит разделение двух составляющих с ортогональными плоскостями поляризации, а перед фотоприемником устанавливается второй поляризатор, который сводит эти колебания в одну плоскость. Он установлен под углом 45° относительно плоскостей исходных колебаний.

Погрешность ЛИИ составляет не более длины волны света, излучаемого лазером (при измерениях в пределах десятков метров и более).

Недостаток ЛИИ – относительно высокая чувствительность к механическим воздействиям, что обусловило их применение, в основном, в прецизионном приборостроении, станкостроении и металлургии. Применение угловых отражателей вместо зеркал существенно уменьшает чувствительность ЛИИ к вибрациям и разбюстировкам. Повышения помехоустойчивости ЛИ можно добиться также, используя схему без подвижного зеркала, роль которого в этом случае выполняет сам объект контроля. Подобное устройство содержит лазер, излучающий синфазное когерентное излучение в двух противоположных направлениях. Один из лучей попадает на объект и после отражения поступает на фотоприемник.

В таблице 6 приведены характеристики некоторых ЛИИ.

Таблица 6 Лазерные интерферометры для измерения расстояний

Тип интерферометра	Страна, фирма	Пределы измерений, м	Дискретность отсчета, мкм	Допустимая скорость перемещений объекта, м/мин
ИПЛ-10М52	СССР, И АиЭ СО АН СССР	10	0,01	10
LW-MS	ГДР, Цейс	20	0,1	18
ЛА-3000	ЧССР, МЕОПТА	10	0,01	6
ЛА-3002		30	0,1	12
МЕТРИЛАС	Франция, СОРО	30	0,03	18
МП5525	США, Хьюлетт-Паккард	60	0,1	18
МП5526		60	0,01	18

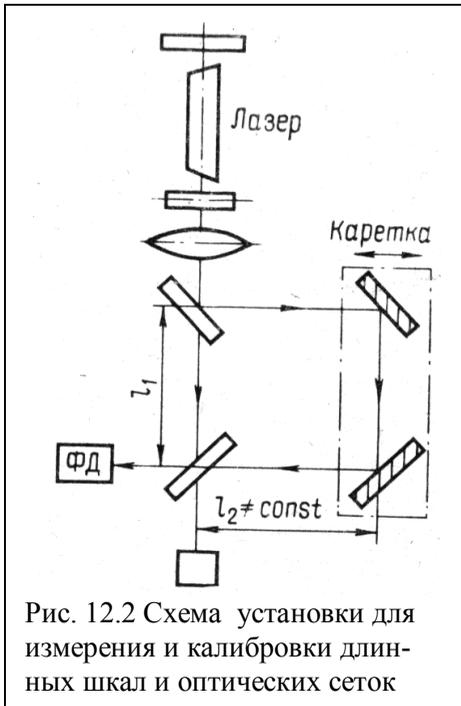


Рис. 12.2 Схема установки для измерения и калибровки длинных шкал и оптических сеток

Применение ЛИИ в измерительных системах рассмотрим на примере установки для измерения и калибровки длинных шкал и оптических сеток (рис. 12.2).

Луч света лазера пропускается через линзу на разделительную пластину. Часть излучения проходит через нее, часть отражается под углом 90° к первоначальному пути. Этот отраженный пучок света двумя полностью отражающими зеркалами, установленными под углом 90° друг к другу на подвижной каретке измерительного прибора, отражается в обратном направлении. На поверхности разделительной пластины два пучка

света снова встречаются.

Пучок света, идущий вдоль продолжения оптической оси лазера, проходит фиксированное расстояние между двумя разделительными пластинами. Другой пучок света проходит различные расстояния по мере того, как движется каретка с зеркалами. Если лучи проходят не в одной фазе, их интенсивность суммируется.

По мере того, как каретка движется, меняется разность оптических путей, приводящая к периодическому изменению освещенности приемника. Другими словами, движение каретки вызывает модуляцию амплитуды излучения, регистрируемого фотоприемником. С помощью электронной аппаратуры можно определить соответствующее число периодов амплитудной модуляции и ввести полученную информацию в компьютер, который определяет расстояние, пройденное подвижной кареткой. Для обеспечения высокой точности измерения следует вводить соответствующую поправку на вели-

чину показателя преломления. Показатель преломления может изменяться с изменением влажности, температуры и давления воздуха.

На рисунке 12.3 показана схема полной системы измерения перемещений узлов станков, учитывающая изменения параметров окружающего воздуха и температуры исследуемой детали.

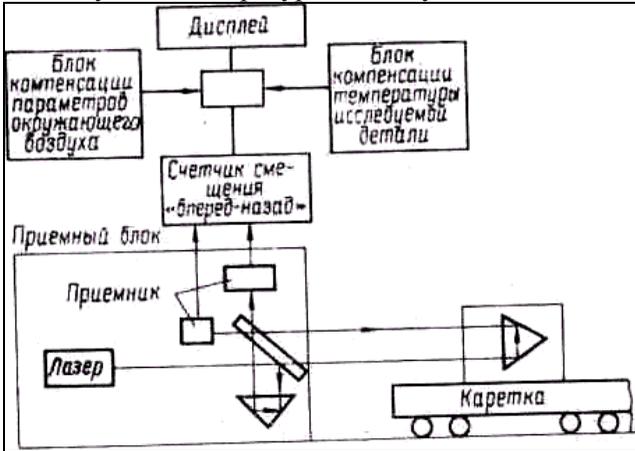


Рис. 12.3. Схема лазерной системы измерения перемещений узлов станка в зависимости от условий окружающей среды и температуры объекта.

Аналогичные системы используются для отсчета действительных перемещений суппорта станка с программным управлением. Установка имеет предел измерений до $25 \div 40$ мм при точности измерений $3\text{--}7$ мкм.

Лазерные интерферометрические системы используются также для измерения уровня вибраций многоэтажных зданий, различных строительных конструкций, для измерения деформации земной коры и т.п.

В ЛИИ с высоким разрешением (до $10^{-3} \div 10^{-5} \lambda$) определение очень малых долей интерферометрической полосы достигается тремя способами.

В первом из них (рис. 12.4), частота, а значит и длина волны лазера 2, изменяется таким образом, что разность хода в интерферометре соответствует целому числу интерферометрических полос. Модуляция f_G от генератора 4, наложенная с помощью зеркала 3 на интерферометрический сигнал, исчезает на приемнике 5 при точном

установление целого числа интерферометрических полос. Частота лазера 2 определяется из разностной частоты, полученной с использованием стабилизированного по частоте лазера 1. Оптическая разность хода в интерферометре получается из частоты лазера 2 и числа целых интерферометрических полос. Достигнутое разрешение - $10^{-5} \lambda$.

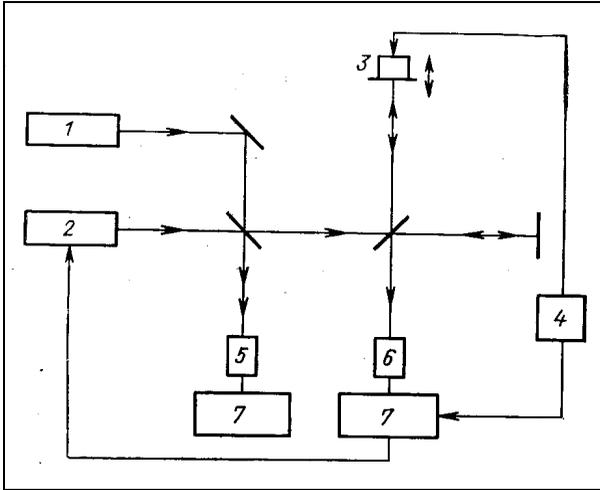


Рис 12.4 Схема интерферометра с высоким разрешением: 1 – стабилизированный по частоте лазер; 2 – нестабилизированный лазер; 3 – зеркало с пьезокерамикой; 4 – генератор; 5, 6 – приемники; 7 – синхронный детектор

При втором способе оптическая разность хода определяется из четырех соседних значений интенсивностей, которые отличаются на одинаковые дробные части λ полосы. Достигнутое разрешение $10^{-3} \lambda$.

В третьем варианте для измерения используется длина волны и фаза сигнала биений двухчастотного лазера. Эта схема рассмотрена в п.6.5 предыдущей лекции. Достигнутое разрешение - $10^{-3} \div 10^{-4} \lambda$.

Лазерные интерферометры с высоким разрешением применяются, например, в следующих случаях:

- определение формы и качества плоских, сферических, асферических и цилиндрических поверхностей в том числе при изготовлении линз, зеркал и призм. Промышленные приборы имеют разрешение порядка $\lambda/10$, лабораторные - $\lambda/600$;

- определение однородности и напряжений оптических материалов (например, контроль лазерных стержней), измерение плоскостности лазерных дисков;
- контроль шариков для шарикоподшипников, головок записи и воспроизведения акустических устройств, форм для литья под давлением, линз из пластмассы и т.д.

12.2 Дифракционные способы измерения

Среди лазерных приборов значительное место занимают дифракционные измерители размеров.

Как известно, различают дифракцию Френеля (сферические электромагнитные волны – ближняя зона наблюдения) и дифракцию Фраунгофера (плоские волны – дальняя зона наблюдения).

Расстояние H , соответствующее дальней зоне наблюдения, оценивается из выражения:

$$H \gg D^2/\lambda,$$

где D – размер объекта, на котором происходит дифракция, λ - длина волны излучения. Следовательно для объектов размерами от единиц до сотен микрометров и при использовании видимого диапазона излучения дифракция Фраунгофера наблюдается уже на расстоянии от микрометров до миллиметров от объекта, на котором происходит дифракция.

Схема наблюдения дифракции Фраунгофера показана на рисунке 12.5. При измерении размера D объекта изменяется положение дифракционных максимумов.

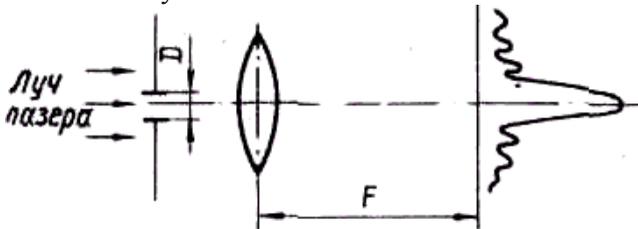


Рис. 12.5 Схема наблюдения дифракции Фраунгофера

Дифракционные способы измерения основаны на анализе линейного или углового размера между экстремальными точками дифракционного распределения. Основными преимуществами такого способа измерения являются повышения чувствительности при умень-

шении измеряемого размера, независимость результата измерения от мощности источника излучения.

В большинстве случаев анализируют дифракционное изображение объекта в фокальной плоскости объектива, что позволяет получить необходимый размер дифракционного изображения и уменьшить влияние положения измеряемого объекта на результат измерения. *Дифракционное распределение интенсивности, получаемое в фокальной плоскости идеального объектива, инвариантно к смещениям измеряемого изделия, расположенного перед ним.*

Наибольшего диапазона измерения объекта при дифракционном способе, основанном на анализе углового или линейного размера дифракционного распределения, можно достигнуть, обеспечивая «привязку» процесса измерения к одному и тому же дифракционному порядку. При этом диапазон измерения может быть значительным в виду монотонной зависимости положения определенного максимума дифракционного распределения от размера объекта.

Дифракционный измеритель обычно состоит из следующих функциональных узлов (рис. 12.6).

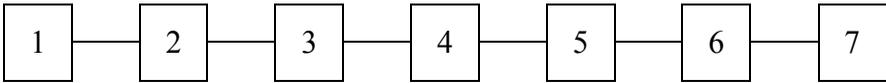


Рис. 12.6 Блок-схема дифракционного измерителя

В качестве лазера 1 используется обычно He - Ne лазер ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$). Формирователь пучка 2, представляющий собой обычно телескопическую систему, обеспечивает получение луча заданной формы и размера. Для формирования дифракционного изображения используется объектив 4, объект контроля 3 при этом располагают перед объективом. В схеме предусмотрен преобразователь 5 оптического сигнала в электрический, блок обработки электрического сигнала 6, с которого сигнал поступает на устройство индикации 7.

Примером *оптического дифрактометра Фраунгофера* служит прибор для измерения диаметра тонких цилиндрических изделий (проволок, волокон и т.д.), функциональная схема которого приведена на рисунке 12.7. Пучок излучения когерентного источника претерпевает дифракцию на изделии и в плоскости сканера образуется

дифракционное изображение изделия, соответствующее дифракции Фраунгофера.

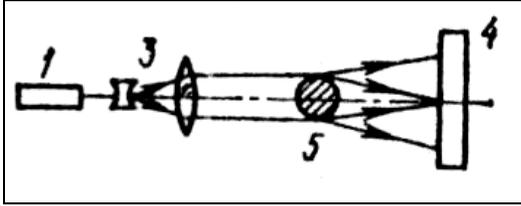


Рис.12.7 Прибор для измерения диаметра тонких цилиндрических изделий дифракционным методом: 1 – лазер; 3 – оптическая система; 4 – фотоприемник; 5 – ОК

Уравнение, описывающее распределение интенсивности в дифракционном изображении, имеет вид:

$$J_{\alpha} = J_0 [\sin(2\pi r \alpha / \lambda) / (2\pi r \alpha / \lambda)]^2,$$

где α - угол дифракции, r – радиус нити, λ - длина волны ОКГ, J_0 , J_{α} - интенсивности падающего и дифрагированного света в направлении α .

Дифракционное распределение интенсивности преобразуется в электрический сигнал, описывающий это распределение. Блок обработки электрического сигнала образует прямоугольный импульс, длительность которого однозначно связана с расстоянием между минимальными точками дифракционного распределения. Обычно в приборе используется объектив, обеспечивающий величину дисторсии в пределах $\pm 0,2\%$ при смещениях объекта измерения в пределах $\pm 0,5$ мм вдоль пучка излучения и $\pm 0,25$ мм - поперек пучка. При этом погрешность измерителя не превышает $\pm 0,5\%$ при смещениях объекта в указанных пределах.

Этот метод можно использовать также для контроля точности изделий типа поршневых колец, лопаток турбин и т.д.

По схеме *оптического дифрактомера Френеля* разработан лазерный оптико-электронный измеритель, который используется для контроля износа режущего инструмента токарных станков с ЧПУ (рис. 12.8). В основу измерителя положены методы спектрального анализа сигналов с помощью систем обработки пространственных сигналов. Перед обработкой резец, закрепленный в суппорте 11, устанавливается в исходное нулевое положение. При этом луч лазера 5 через по-

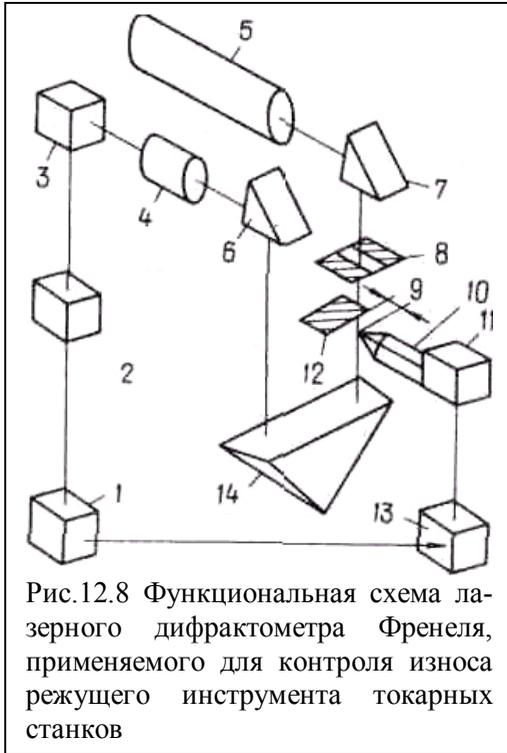


Рис.12.8 Функциональная схема лазерного дифрактометра Френеля, применяемого для контроля износа режущего инструмента токарных станков

воротную призму 7 направляется на щелевую диафрагму 8 (шириной 40 – 20 мкм, длиной 3000 – 3500 мкм). Сформированный диафрагмой пучок прямоугольной формы дифрагирует на щели 9, образованной полуплоскостью 12 и вершиной резца 10. Дифрагировавший пучок призмами 14 и 6 направляется на Фурье-объектив 4, который формирует дифракционное изображение щели 9 в задней фокальной плоскости на фотоприемнике 3. Выходной видеосигнал в приемнике после преобразования в преобразователе 2 в виде цифрового кода поступает в процессор 1.

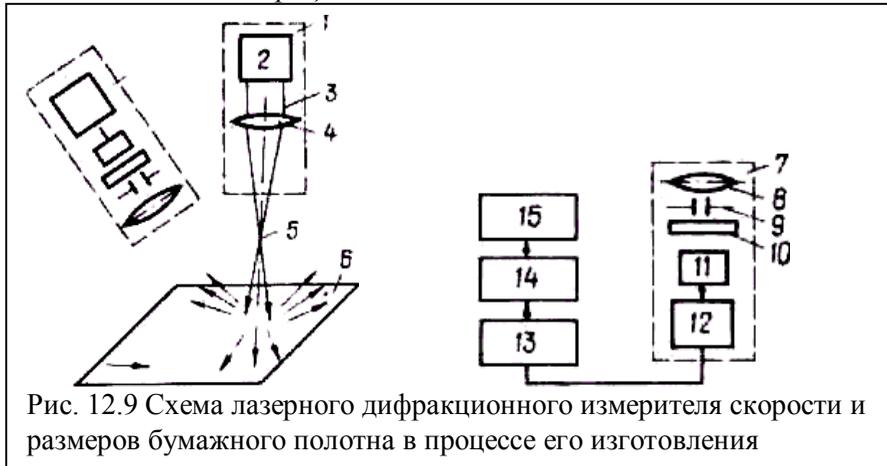
Дифракционное изображение щели состоит из эквидистантно расположенных максимумов светового потока. Расстояние Δl между этими максимумами на линейке фотоприемника зависит от ширины щели 9. При установке системы в нулевое положение процессором фиксируется расстояние между максимумами дифракционного изображения, а суппорт 11 с помощью сервоприводов 13 исполнительного механизма перемещается на такую величину, чтобы расстояние Δl соответствовало заданному значению, пропорциональному определенной ширине щели (зазору) 9.

В процессе обработки детали резец изнашивается. Для определения величины износа процессор 1 возвращает суппорт 11 в исходное нулевое положение. Микропроцессор определяет расстояние Δl , пропорциональное ширине щели 9, увеличенной на величину износа ин-

струмента. Для получения требуемого размера детали проводится коррекция поперечной передачи на величину размерного износа.

Рассмотренная система используется в оборудовании с адаптивным управлением токарной обработки для изготовления прецизионных деталей. Погрешность диаметра детали составляет 1 – 3 мкм. Время одного измерения не превышает 6 с, диапазон измерения размерного износа 50 – 400 мкм.

Дифракционный измеритель (рис. 12.9) может быть использован также для *бесконтактной оценки скорости, длины и площади бумажного полотна в процессе его изготовления.*



В основе работы такого измерителя лежат физические явления перемещения пятнистой дифракционной картины в результате рассеяния пучка когерентного лазерного излучения движущейся неоднородной (диффузной) поверхностью. Измеритель состоит из бесконтактного чувствительного элемента (датчика перемещения), в который входят оптические блоки источника излучения 1 и приемный блок 7, формирователь импульсов 13, системы обработки информации 14 и регистрирующее устройство 15. Блок источника включает гелий-неоновый лазер 2, генерирующий излучение на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Излучение 3 проходит через формирователь пучка, представляющий собой линзу 4 или систему линз. На пути рассеянного (отраженного 6 или проходящего 5) излучения устанавливается приемный блок датчика перемещений 7.

Рассеянное излучение проходит оптическую систему 8, с помощью которой устанавливается масштаб дифракционной картины в плоскости фотоэлектрической регистрации. Далее излучение проходит через узкополосный интерференционный фильтр 9 с максимумом пропускания на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. За интерференционным фильтром в плоскости регистрации дифракционной картины установлен фотоэлектрический преобразователь (блоки 10 – 12).

При контроле относительно тонких видов бумаги с большой величиной светопропускаемости (например, при контроле конденсаторной бумаги) блок источника излучения и приемный блок датчика перемещения расположены по разные стороны относительно контролируемого бумажного полотна. В этом случае лазерный измеритель работает в проходящем излучении. В отраженном излучении измеритель работает при контроле относительно толстых видов бумаги с малой величиной светопропускаемости. Тогда блок источника и приемный блок датчика перемещения расположены по одну сторону относительно бумажного полотна.

12.3 Лазерная эллипсометрия

Лазерная эллипсометрия основана на анализе изменений состояния поляризации света, отраженного от поверхности изделия. Метод позволяет контролировать с высокой точностью толщину ОК ($10^{-2} - 2 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$) и его показатель преломления (до 10^{-5}). Применение лазеров позволило резко поднять чувствительность и информативность эллипсометрического метода, так как они определяются главным образом монохроматичностью и степенью направленности источника излучения.

На ОК (обычно это тонкая пленка прозрачного вещества) направляют под некоторым углом φ_0 монохроматический плоскополяризованный луч света (рис. 12.10). Вектор амплитуды электрического поля этого луча может быть разложен на составляющие E_p и E_s , ориентированные соответственно параллельно и нормально к плоскости падения. После отражения света от ОК (или прохождения через ОК) E_p и E_s изменяют свою амплитуду и фазу. Луч становится эллиптически поляризованным, т.е. конец вектора \mathbf{E} описывает эллипс в плоскости, нормальной направлению распространения.

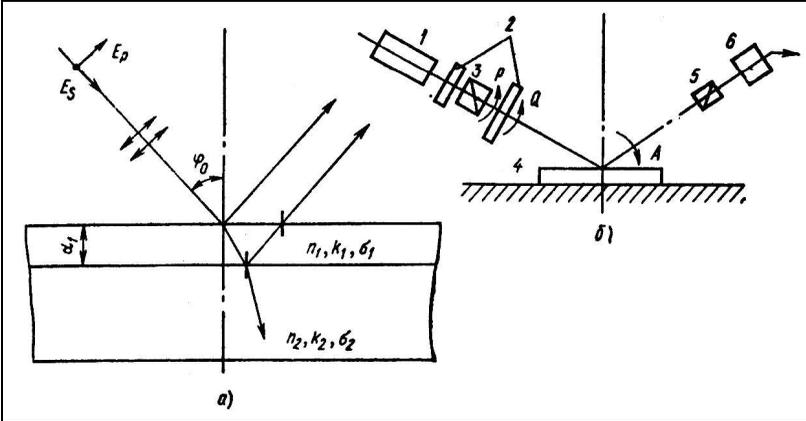


Рис 12.10 Расчетная (а) и функциональная (б) схемы лазерного эллипсометра: 1 – лазер; 2 – компенсатор; 3 – поляризатор; 4 – ОК; 5 – анализатор; 6 – детектор; P , Q , A – углы поворота поляриоида, компенсатора и анализатора соответственно; n_1 , k_1 , σ_1 и n_2 , k_2 , σ_2 – показатели преломления, поглощения и проводимости пленки и подложки соответственно

Состояние эллиптической поляризации принято оценивать двумя эллипсометрическими параметрами Ψ и Δ :

$$\Psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_p}{R_s} \right),$$

где R_p и R_s – коэффициенты отражения для ортогональных компонент вектора \mathbf{E} и

$$\Delta = \delta_p - \delta_s.$$

Δ имеет смысл разности фаз между p и s компонентами вектора \mathbf{E} .

Отношение комплексных (с учетом поглощения) коэффициентов отражения имеет вид

$$\rho = \frac{\overline{R_p}}{R_s} = \frac{R_p}{R_s} e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}.$$

и носит название фундаментального уравнения эллипсометрии.

Для наиболее часто встречающихся в практике случаев прозрачной диэлектрической пленки на поверхности отражающего вещества ρ является функцией толщины пленки d_f , показателей преломления и

подложки n_1 и n_2 , показателя поглощения подложки k_2 , длины волны лазера λ , угла падения луча на образец φ_0 , т.е.

$$\rho = \rho(n_1, n_2, k_2, d_1, \lambda, \varphi_0).$$

Поэтому для определения, например толщины пленки d_1 необходимо фиксировать значения остальных параметров.

Формулы, связывающие измеряемые в эксперименте величины (углы поворота P , Q и A поляризатора, компенсатора и анализатора в момент гашения яркости луча ОКГ) с параметрами Ψ и Δ , достаточно сложны и зависят от конкретной схемы прибора.

В современных эллипсометрах применяют газовые лазеры на гелиево-неоновой смеси ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) и CO_2 ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$).

Применение инфракрасного лазера позволяет расширить диапазон измерений в сторону больших толщин. Например, ИК-эллипсометр УИТ – ТЭС ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$) измеряет толщины эпитаксиальных слоев в диапазоне $0,01 - 1,6 \text{ мкм}$ с погрешностью $0,01 \text{ мкм}$. Точность отсчета углов порядка $0,1^\circ$. Пластины компенсатора выполнены из монокристалла сернистого кадмия, прозрачного в ИК-лучах. В качестве поляризатора и анализатора применены дифракционные решетки на полиэтилене (число штрихов 1200 мм^{-1}). Время одного измерения $1-3 \text{ с}$.

Применение лазеров позволило создать эллипсометрический микроскоп для непосредственного визуального контроля неоднородностей толщин пленок в областях порядка 10^{-6} см^2 . Различия толщин пленок и показателей преломления преобразуются в изменения яркости соответствующих элементов поверхности, проектируемых микрообъективом в плоскость наблюдения. Возможна количественная оценка этих различий. Эллипсометрические изображения можно сфотографировать или наблюдать на телевизиорном мониторе.

Чувствительность, например, эллипсометрического микроскопа ЛЭМ-2 порядка 10^{-7} мм , увеличение до 400 раз. В нем использован гелиево-неоновый лазер ЛГ-56.

Лазерная эллипсометрия успешно применяется в электронике для контроля толщины эпитаксиальных слоев, изучения адгезии и адсорбции, других задач.