

# ЛЕКЦИЯ 1. Введение в оптический неразрушающий контроль

## 1.1. Основные представления об оптическом неразрушающем контроле

Оптический неразрушающий контроль (ОНК) основан на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля. *Объектом контроля* (ОК) может служить любой естественный или искусственный объект (изделие, прибор и т.п.), либо процессы в нем происходящие.

Методы и средства ОНК используются в настоящее время практически во всех областях науки и техники (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Область применения	Вид контроля
Металлургия	Контроль геометрии проката (проволоки, листов, труб, прутков, профилей), качества внутренней поверхности труб
Химическая промышленность	Спектральный анализ, контроль структуры пластмасс и полимеров, колориметрический контроль растворов
Стекольное производство	Контроль геометрии стеклянных листов и труб, обнаружение инородных включений, определение напряжений и фотометрических характеристик
Текстильная промышленность	Контроль цветности материала, диаметра нитей, структуры ткани, люминесцентный контроль наличия жировых плен
Пожарная техника	Пожарные извещатели
Контроль окружающей среды	Определение степени запыленности и задымленности
Производство цемента	Гранулометрический анализ исходных материалов
Строительство	Контроль геометрии строительных конструкций, колориметрические измерения цвета плиток и т.д.
Маркшейдерия и горное дело	Контроль геометрии шахтных стволов, штреков, контроль абразивного износа тросов, определение степени запыленности и задымленности
Авиастроение	Контроль геометрии, визуальная эндоскопия двигателей
Электронная промышленность	Контроль двулучепреломления и других характеристик полупроводниковых материалов, контроль геометрии полупроводниковых структур (эллипсометрия)
Радиопромышленность	Контроль качества печатных плат на телевизионных и оптических проекторах, контроль геометрии фотошаблонов и др.
Электровacuумная промышленность	Контроль напряжений в корпусах кинескопов, фотометрических характеристик люминофоров и источников света, геометрии элементов вакуумных приборов и т.д.
Производство фотоматериалов	Контроль однородности фотоэмульсии в ИК-лучах и толщины основы, спектрометрия, сенситометрия, резольвометрия
Нефтехимическая промышленность	Обнаружение мест утечки газа и нефти, анализ состава нефти
Пищевая промышленность	Люминесцентный контроль качества продуктов, визуальная микроскопия, спектральный анализ
Сельское хозяйство	Автоматическая сортировка семян и плодов по цвету, контроль качества молока, разделение клубней от комков земли, определение содержания белка в зерне, белизны муки, качества яиц и т.п.
Полиграфическая промышленность	Контроль колориметрических характеристик репродукций, денситометрия

В настоящем курсе мы ознакомимся с физическими основами методов, алгоритмов, а также первичных преобразователей, приборов и систем ОНК. Они используются с целью выделения *информационных диагностических параметров* и на этой основе принятия решений относительно результатов контроля геометрических, физических и химических характеристик объекта контроля, дефектов его структуры и свойств, а также причин возникновения этих нарушений. Методы ОНК обеспечивают локальность, экспрессность и неконтактность контроля, надежно работают в автоматизированных системах контроля и, наконец, позволяют получать информацию наиболее удобным для человека образом.

К числу дефектов, обнаруживаемых неразрушающими оптическими методами, относятся пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменение структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д. С помощью оптических методов *внутренние дефекты* выявляются только в изделиях из материалов, прозрачных в оптической области спектра (это один из немногих недостатков ОНК).

В системах ОНК носителем диагностической информации является *оптическое излучение*. В широком смысле слова ОИ – это электромагнитное излучение с длинами волн  $\lambda$ , лежащими в диапазоне от  $10^{-5}$  мкм до  $10^3$  мкм. В ОИ принято выделять три области спектра:

- ультрафиолетовое ОИ (УФ излучение) –  $10^{-3} \text{ мкм} \leq \lambda < 0,38 \text{ мкм}$
- видимый свет –  $0,38 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,78 \text{ мкм}$
- инфракрасное ОИ (ИК излучение) –  $0,78 \text{ мкм} < \lambda \leq 10^3 \text{ мкм}$

В настоящем курсе мы в основном рассмотрим методики ОНК, где применяется видимый свет, вопросы применения ИК и УФ излучений будут затронуты лишь частично, например, при изучении интроскопии.

Использование оптического излучения как носителя информации перспективно. Электромагнитное поле по природе многомерно, что позволяет вести многоканальную (многомерную) обработку информации одним устройством с большой скоростью, определяемой скоростью света в данной среде. Особенно перспективно использование резонансных эффектов взаимодействия ОИ с ОК, в том числе нелинейных, основанных на использовании сверхмощного лазерного излучения.

## 1.2. Оптическая информационная система

Процесс ОНК по существу представляет собой физический эксперимент, в котором в качестве носителя информации используется ОИ. *Информационными параметрами ОИ* служат пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности.

Получение сведений об ОК, т.е. определение его информационных параметров, происходит в процессе обработки оптического сигнала, который сформировался в результате взаимодействия ОИ с ОК. Основными *информационными параметрами объектов оптического контроля* являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны. Одним из важных информационных параметров, который определяет эффективность ОНК в дефектоскопии, является также контраст дефекта.

Для получения контрольной информации используют изменения параметров ОИ при взаимодействии с ОК, вызванные явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеяния, дисперсии света, а также небольшие изменения характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люминесценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений.

В ряде случаев ОНК используется для изучения свойств самосветящихся тел (тела раскаленные до высокой температуры, например, расплавленный металл; плазменные образования, такие как фронт детонации при взрыве, высокотемпературная плазма в установках управляемого термоядерного синтеза; и т.п.). В системах, где реализуется подобный контроль объект контроля и источник ОИ составляют одно целое, оптический сигнал формируется непосредственно в процессе генерации ОИ. Т.е. здесь объект контроля – свойства излучателя, а его информационные параметры создаются при возникновении ОИ.

Общая структурно–логическая схема *оптической информационной системы (ОИС)*, т.е. системы, в которой реализуется процесс ОНК, представлена на рис. 1.1.

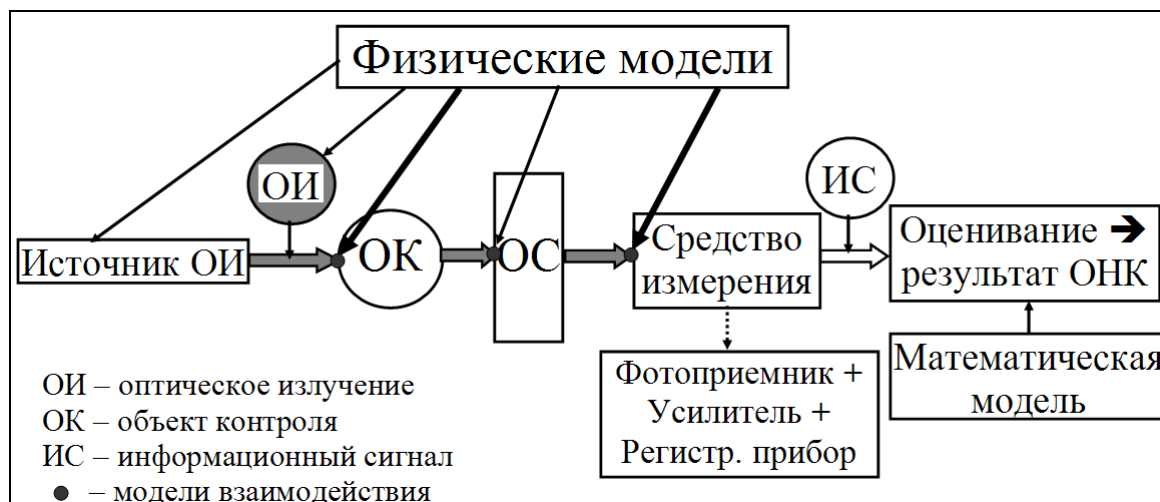


Рис. 1.1

Работа ОИС может быть описана следующим образом. Оптический сигнал от источника ОИ взаимодействует с ОК и результирующий оптический сигнал поступает в средство измерения (прибор, установку). В средстве измерений с использованием выбранного физического явления и под влиянием внешних по отношению к ОК и неучтенных в физической модели погрешностей формируется результат наблюдений в виде непрерывного или дискретного информационного сигнала (показания прибора). Результат наблюдений подвергается процедуре оценивания, которая позволяет получить результат ОНК – суждение о состоянии ОК. При этом важную роль играет адекватность математической модели измерения, которая дает возможность оценить погрешность (и достоверность) результата ОНК.

Из рис. 1.1 видно, что классифицировать ОИС можно четырьмя разными способами:

- по виду ОК,
- по физической модели взаимодействия ОИ с ОК,
- по используемому средству измерений,
- по процедуре оценивания.

Классифицируя ОИС по виду ОК, получаем системы для измерения размеров, шероховатостей, дефектоскопы и т.д. (табл.1.1). Однако понимания основных методов ОНК можно достичь, только рассмотрев принципы работы ОИС, исходя из используемых средств измерений (СИ).

Если СИ определяет фотометрические характеристики и содержит в качестве окончательного элемента человеческий глаз, то ОИС называется *визуальной (ВОИС)*. Процедура оценивания в таких системах производится непосредственно наблюдателем. С помощью ВОИС можно главным образом определить форму и размеры ОК, а фактически все расчеты производятся на основе *геометрической оптики*. Однако уже в визуальных ОИС для оценки некоторых параметров ОК полученного результата приходится привлекать волновую модель ОИ. Аналогично происходит работа *фотометрических* ОИС, единственным отличием которых является использование в средстве измерения фотоэлектрических приемников.

В *интерференционных* ОИС производится измерение пространственного распределения амплитуды, фазы и степени когерентности ОИ, а в основе процедуры оценивания лежит скалярная волновая теория ОИ. При этом контроль, как правило, производится на некоторой фиксированной частоте. Это достигается либо за счет монохроматичности источника ОИ, либо за счет выделения монохроматической составляющей оптического сигнала в ОС (например, с помощью светофильтров). Средство измерения в интерференционных ОИС обязательно содержит *интерферометр*.

*Поляризационные* ОИС в качестве основного информационного параметра используют изменение поляризации оптического сигнала вследствие его взаимодействия с ОК. Основным элементом СИ в таких ОИС является *поляриметр*.

*Спектральные* ОИС содержат СИ, в котором исследуется изменение распределения мощности светового потока по частоте вследствие его взаимодействия с ОК. В таких системах для анализа формируются световые волны с одинаковыми направлениями волновых векторов, т.е. пространственное распределение ОИ в расчет не принимается. Обязательный элемент СИ в спектральной ОИС – *спектроанализатор*, т.е. устройство, способное пространственно разделить световые волны разных частот (призма, дифракционная решетка).

Для расчетов результата ОНК по результатам измерений в поляризационной и спектральной ОИС как правило достаточно использовать электромагнитную теорию света, однако, для понимания природы спектров поглощения (излучения) тел необходимо привлекать квантовые соображения.

Применение лазеров, которые способны создавать ОИ с высокой степенью когерентности, позволило внедрить в практику и другие виды ОИС. К ним относятся системы, где используются дифракционные эффекты, измерения степени когерентности световых потоков, голография и т.д.

### **1.3. Физические величины, применяемые для описания электромагнитного излучения и его взаимодействия с веществом**

Для описания электромагнитного, в т.ч. оптического, излучения используется большое количество физических величин, которые можно разбить на три группы:

- энергетические величины, которые содержат нижний индекс «*e*» в обозначении;
- световые или фотометрические величины (индекс «*v*» в обозначении);
- фотонные величины (индекс «*p*» в обозначении).

Энергетические и фотонные величины можно использовать для описания любого ОИ, в то время как световые – только в видимой области спектра. Это связано с тем, что последние вводятся на основании зрительного ощущения человеческого глаза с учетом его спектральной чувствительности. Переход от энергетической величины  $X_e$  к соответствующей ей световой –  $X_v$ , осуществляется по формуле

$$X_v = K_m \int V(\lambda) X_{e,\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где  $K_m = 683$  лм/Вт – максимальная спектральная световая эффективность (соответствует монохроматическому излучению на частоте  $540 \cdot 10^{12}$  Гц или  $\lambda \approx 0,55$  мкм),  $V(\lambda)$  – относительная спектральная световая эффективность (значения этой функции стандартизованы),  $X_{e,\lambda}$  – спектральная плотность величины  $X_e$  ( $X_{e,\lambda} = \frac{dX_e}{d\lambda}$ ).

В таблице 1.2 приведены наиболее часто применяемые для описания ОИ энергетические величины и соответствующие им световые величины и их единицы. Соответствующие фотонные величины и единицы в таблице не указаны вследствие их редкого использования в ОНК.

Таблица 1.2

Энергетические величины			Световые величины		
Название	Определение	Единица	Название	Определение	Единица
Мощность излучения, поток энергии излучения	$\Phi_e, (P)$	Вт	Световой поток	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	1 лм=1 кд·ср (люмен)
Энергетическая сила излучения	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт/ср	Сила света	$I_v$	кд (кандела)
Энергетическая яркость, лучистость	$L_e = \frac{dI_e}{dS}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$	Яркость	$L_v = \frac{dI_v}{dS}$	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$
Энергетическая светимость, излучаемость	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Светимость	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	$\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$
Энергетическая освещенность, облученность	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Освещенность	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	1 лк=1 $\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ (люкс)
–	–	–	Световая эффективность (светоотдача)	$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}$	лм/Вт

В скалярной оптике часто используются еще две величины, однако в большинстве учебных изданий они не имеют точного определения.

Амплитуда световой волны –  $(E, A, a)$  – скалярная физическая величина, равная модулю светового вектора, т.е. вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны. Введение названия «световой вектор» связано с тем, что действия света, измеряемые опытным путем (зрительное, тепловое и т.д.) вызывает именно электрическое поле световой волны.

Интенсивность света –  $(I)$  – физическая величина, определяемая соотношением

$$I = \overline{E^2} = \frac{K_I}{2\tau} \int E^2 dt, \quad (2)$$

где черта над  $E^2$ , означает операцию, описанную в правой части равенства (2), т.е. усреднение по времени разделения (срабатывания) приемника  $\tau$ ,  $K_I = \varepsilon_0 c n$ ,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления.

Единицей определенной таким образом интенсивности света является 1 Вт/м<sup>2</sup>.

Время срабатывания  $\tau$  любого реального приемника света (глаз, фотопленка ФЭУ и т.д.) всегда намного больше, чем наибольший период колебаний светового вектора, поэтому в расчетах можно считать, что  $\tau \rightarrow \infty$ . Тогда, на основании эргодической теоремы, среднее по времени в (2) равно среднему по ансамблю для статистического распределения, описывающего световое поле, созданное стационарным источником. Т.е. формула (2) дает для интенсивности света  $I$  определение, *не зависящее* от свойств приемника света.