

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Факультет технологии и исследования материалов

Кафедра «Сварка и Лазерные Технологии»

Соловьёв В.Д.

Введение в специальность

Текст лекций (1 курс)

Санкт-Петербург

2012

Содержание курса

Введение.....	3
Прямолинейное распространение света.....	3
Волновая природа света	4
Суперпозиция (наложение, совмещение) колебаний.....	4
Понятие волнового движения	5
Использование интерферометра Майкельсона для измерения малых смещений	7
Электромагнитный спектр.....	8
Почему лазер? Зеркало Архимеда и гиперболоид инженера Гарина	9
Важнейшие характеристики лазеров.....	11
Физические процессы, лежащие в основе работы лазера	11
Свойства спонтанного и вынужденного излучения.....	12
Получения оптических импульсов малой длительности	13
Направленность лазерного излучения	14
Как осуществили лазерную локацию Луны?	15
Примеры применения лазеров	16
Materials processing.....	16
Метрология	16
Телекоммуникация.....	16
Лазеры в медицине	17
Военное применение лазеров.....	17
Лазерный контроль атмосферы	17
Голография	18
Волоконная оптика	19

Введение

В лекциях, посвященных истории лазерной техники и технологии, кратко рассказывается не только история изобретения лазеров. Дело в том, что **открытие лазеров является самым впечатляющим достижением современной оптики, но отнюдь не единственным её достижением**. Здесь следует говорить о новом облике оптики, который сформировался как в результате возникновения ряда её разделов, так и развития уже существующих разделов, причем это развитие было взаимосвязанным. Конечно, здесь **речь идёт о физической оптике** – описании оптических явлений, базирующемся на волновой природе света. В свою очередь световые волны описываются **уравнениями Максвелла**.

В чём причина такого революционного преобразования оптики? Дело в том, что **развитие физической оптики спровоцировало возникновение квантовой механики**, которая, в свою очередь изменила облик оптики. Поэтому можно утверждать, что **лазерная физика – это раздел физической оптики**.

Здесь к месту будет упоминание того факта, что и возникновение **специальной теории относительности** связано с проблемами трактовки оптических явлений. Отдельного упоминания заслуживают величайшие **открытия современной астрономии**, сделанные при помощи совершенных оптических инструментов. Наконец, говоря о поразительной эффективности оптических измерений можно привести высказывание С. Толанского: **с помощью всего двух зеркал, расположенных определённым образом, можно измерить диаметр звезды, а расположив те же зеркала по-иному, можно измерить поперечник атома!**

Следует ещё раз подчеркнуть: даже в узко понимаемой дисциплине, называемой лазерной технологией, вы столкнётесь с такими разделами современной оптики, как **физика лазеров, волоконная оптика, инструментальная оптика (телескопические системы, объективы), оптико-электронные приборы**.

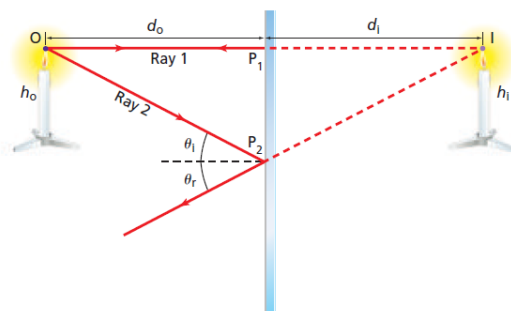
Если не ограничиваться только лазерной резкой и сваркой, то, возможно, вам придётся иметь дело с **адаптивной оптикой, специальными оптическими элементами формирования лазерного пучка (профилирование пучка), голографическими интерферометрами, лазерными дальномерами и др. измерительными приборами**.

Прямолинейное распространение света

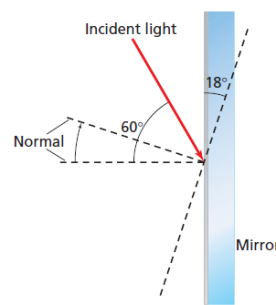
Идея прямолинейного распространения света проистекает из наблюдения тени, отбрасываемой предметом. Объяснение этой картины становится очевидным, если представить, что свет выглядит как поток каких-то частиц летящих по прямой линии.

В рамках этой картины распространения света вводится **понятие лучей** – как траекторий световых частиц. Открытый древними греками закон отражения позволяет строить **изображение (?)** объекта плоским зеркалом.

Задача: каковы параметры изображения свечи в плоском зеркале?

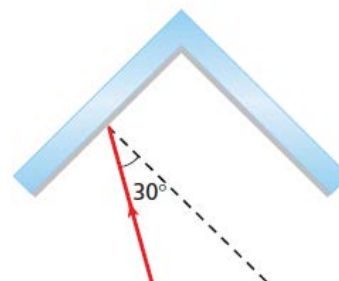


Задача: Луч падает на зеркало под углом 60° к нормали. Затем зеркало поворачивается на 18° по часовой стрелке. Под каким углом к нормали зеркала распространяется отраженный луч? На какой угол повернулся луч из-за вращения зеркала?



Задача: Два касающихся плоских зеркала образуют прямой угол. Луч света падает на зеркало под углом 30° к нормали.

1. Под каким углом отразится луч от второго зеркала?
2. Ретрорефлектор – это прибор, отражающий падающий луч точно назад. Покажите на рисунке диапазон углов падения на первое зеркало, при котором система зеркал работает как ретрорефлектор.



Переходя к обсуждению волновой природы света, следует отметить, что **описание распространения света в виде волны не противоречит картине распространения света в виде лучей, даваемое геометрической оптикой. Это – более точное описание процесса распространения света, используемое тогда, когда геометрическая оптика перестаёт адекватно описывать явление.**

Поэтому, например, для описания отражения света от зеркала, преломления в призме и т.д. обычно можно пользоваться законами геометрической оптики.

Волновая природа света

Гримальди в 1665 году обнаружил отклонение света от прямолинейного распространения при прохождении около острого края. Он назвал это явление «дифракцией».

В 1664 г. подобный эффект наблюдал **Гук**, который и высказал предположение, что свет распространяется в виде волн.

Гюйгенс, в результате не очень убедительных рассуждений в 1690 г. Пишет, что «нельзя сомневаться в том, что свет состоит в движении какого-то вещества». В дальнейшем, рассматривая распространение волн в этом странном веществе от такого источника света, как пламя свечи, он формулирует **принцип огибающей** световых волн. Уточнением этого принципа в дальнейшем станет принцип **суперпозиции (интерференции) волн**, предложенный **Юнгом**. Гюйгенсом же было исследовано открытое Бартолинусом в 1669 году расщепление пучка света, прошедшего сквозь кристалл кальцита (исландского шпата) и введено **понятие поляризации** света.

Рассмотрим подробнее понятие суперпозиции волн, проистекающее из суперпозиции гармонических колебаний, наблюдаемых в некоторой точке пространства.

Суперпозиция (наложение, совмещение) колебаний

Рассмотрим результат суперпозиции (наложение, совмещение) двух гармонических колебаний одинаковой амплитуды, отличающихся по фазе на величину ϕ радиан:

$$\mathcal{E}_1(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi/2); \quad \mathcal{E}_2(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t + \phi/2)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_\Sigma(t) &= \mathcal{E}_1(t) + \mathcal{E}_2(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi/2) + \mathcal{E}_0 \cos(\omega t + \phi/2) = \\ &= \mathcal{E}_0 \cos(\omega t) \cos(\phi/2) + \mathcal{E}_0 \sin(\omega t) \sin(\phi/2) + \mathcal{E}_0 \cos(\omega t) \cos(\phi/2) - \mathcal{E}_0 \sin(\omega t) \sin(\phi/2) = \\ &= 2\mathcal{E}_0 \cos(\omega t) \cos(\phi/2) = \mathcal{E}_\Sigma \cos(\omega t)\end{aligned}$$

Итак, видим, что результатом наложения является гармоническое колебание той же частоты, с амплитудой, зависящей от разности фаз суммируемых колебаний:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 2\mathcal{E}_0 \cos(\phi/2)$$

Если колебания складываются в фазе, то суммарная амплитуда равна сумме амплитуд. Если же колебания складываются в противофазе ($\phi = \pm \pi$), то суммарная амплитуда равна нулю, то есть колебания гасят друг друга.

Когда имеем дело со светом, то частота колебаний оказывается столь большой, что отсутствует возможность наблюдения и измерения амплитуды колебаний. Однако приборы и глаз позволяют отслеживать **интенсивность света**, которая определяется следующим образом:

$$I \propto \left\langle \left(\mathcal{E}_0 \cos(\omega t) \right)^2 \right\rangle_t = \mathcal{E}_0^2 / 2 \Rightarrow I \propto \mathcal{E}_0^2.$$

То есть интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световых колебаний и является энергетической характеристикой световой волны.

Таким образом, рассмотренное нами сложение колебаний приводит к интенсивности суммарного колебания

$$I_\Sigma \propto 4\mathcal{E}_0^2 \cos^2(\phi/2),$$

изменяющегося от 0 до $I_\Sigma = 4I$, где I - интенсивность каждого из складываемых колебаний.

Пояснение

Записи двух колебаний с одинаковыми по величине и противоположными по знаку фазами следует из записи двух колебаний с произвольными фазами при соответствующем сдвиге начала отсчета времени:

$$\mathcal{E}_1(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t' - \varphi_1); \quad \mathcal{E}_2(t)(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t' - \varphi_2)$$

$$t' = t + \tau \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \omega(t + \tau) - \varphi_1 = \omega t - \phi/2 \\ \omega(t + \tau) - \varphi_2 = \omega t + \phi/2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \omega \tau - \varphi_1 = -\phi/2 \\ \omega \tau - \varphi_2 = \phi/2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \phi = \varphi_1 - \varphi_2 \\ \omega \tau = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 \end{cases}$$

Понятие волнового движения

Итак, сначала рассмотрим, как математически описывается волна. В качестве примера обратимся к волне, распространяющейся по натянутой верёвке.

Волна – это некоторое возмущение, распространяющееся в той или иной среде, причём сама эта среда при этом не перемещается. Численной характеристикой этого возмущения в рассматриваемом случае есть величина смещения верёвки в точке z в момент времени t от положения невозмущённой струны в этой точке. Эту величину смещения будем описывать функцией $\mathcal{E}(z, t)$.

Особое значение имеют волны, вызванные **гармоническим** возмущением – синусоидальные волны. Световая волна, излучаемая лазером, как раз относится к такому типу волн. В этом случае возмущение в точке пространства с координатой $z = 0$ описывается **периодической** зависимостью, например

$$\mathcal{E}(0, t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t)$$

Это колебание, в случае верёвки, вызвано движением руки, смещающей конец верёвки в соответствии с таким законом. При таком характере возбуждения и в точке, отстоящей от начала координат на расстоянии “z” в результате распространения возмущения (волны) получаем гармоническое колебание

$$\mathcal{E}(z, t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - kz) \equiv \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi)$$

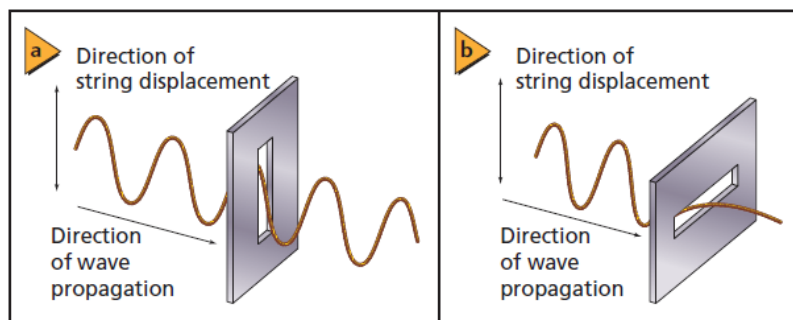
Как видим это колебание повторяет то, что имели в начале координат, но оно не синхронно с этим колебанием, а **имеет фазовую задержку** $\phi = kz$, зависящую от расстояния “z”.

Здесь \mathcal{E}_0 – **амплитуда**, ω – **круговая частота**, $k = \omega/v \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$ – **волновое число**. В этом случае фазовая задержка записывается так:

$$\phi = kz = 2\pi \frac{z}{\lambda}$$

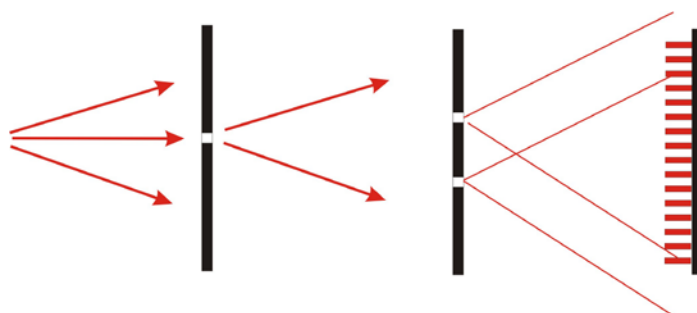
Итак, для получения величины фазовая задержка нужно вычислить, сколько длин волн укладывается на расстоянии z и умножить полученное число на 2π .

Гук предположил, что свет представляет собой **поперечную волну**, сходную с рассмотренной волной в натянутой верёвке, что объясняло поляризационные свойства света. Рассмотрим это свойство волн, используя в качестве модели световой волны «верёвочную модель». В поперечной волне колебания происходят в плоскости, перпендикулярной распространению волны, то есть **поперёк её распространения**.



Такая модель объясняет работу поляризатора.

В 1801 г. Томасу Юнгу удалось доказать правильность волновой теории с помощью простых опытов. Единственными «приборами» в его эксперименте были узкие щели в непрозрачном экране, засвечиваемые монохроматическим светом, прошедшим через маленькое отверстие.



На экране возникла чередующаяся картина светлых и тёмных полос. Подобная картина имеет простое объяснение только в том случае, если **свет представляет собой монохроматическую волну**. В этом случае на экране наблюдаем т.н. интерференционную картину – сумму двух волн, прошедших сквозь щели. Рассмотрим подробнее этот эксперимент.

В каждой точке экрана происходит сложение световых колебаний, приходящих от щелей в экране.

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_1(t) + \mathcal{E}_2(t); \quad \mathcal{E}_1(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t); \quad \mathcal{E}_2(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi);$$

Здесь снова слагаемые колебания отличаются по фазе на величину ϕ , зависящую от разности расстояний от этих щелей до точки наблюдения на экране.

Задача: Пусть расстояние между щелями равно d , расстояние до экрана равно L . Найдите величину разности расстояний от этих щелей до точки наблюдения на экране, смещённой на расстояние x от оси системы.

Ответ:

$$L_2 - L_1 = \sqrt{L^2 + \left(\frac{d}{2} + x\right)^2} - \sqrt{L^2 + \left(\frac{d}{2} - x\right)^2} \approx$$

$$\approx L + \frac{1}{2L} \left(\frac{d}{2} + x\right)^2 - L - \frac{1}{2L} \left(\frac{d}{2} - x\right)^2 = \frac{x \cdot d}{L}$$

При условии, что колебания в щелях происходят в фазе, вычисленная разность расстояний приводит к фазовой задержке ϕ , равной

$$\phi = 2\pi \frac{L_2 - L_1}{\lambda} = 2\pi \frac{x \cdot d}{\lambda L}$$

Тогда

$$I = \left\langle \left(\mathcal{E}_0 \cos(\omega t) + \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi) \right)^2 \right\rangle_t = \frac{1}{2} (\mathcal{E}_0)^2 + \frac{1}{2} (\mathcal{E}_0)^2 + 2 \left\langle \mathcal{E}_0 \cos(\omega t) \cdot \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi) \right\rangle_t =$$

$$= 1 + 2 (\mathcal{E}_0)^2 \frac{1}{2} \left\langle \cos(2\omega t - \phi) + \cos(\phi) \right\rangle_t = (\mathcal{E}_0)^2 (1 + \cos(\phi)) = I_{\max} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{x \cdot d}{\lambda L} \right) \right)$$

Период получающейся интерференционной картины Λ равен расстоянию от оси системы до первого порядка интерференции – первого максимума:

$$2\pi \frac{\Lambda \cdot d}{\lambda \cdot L} = 2\pi \Rightarrow \Lambda = \frac{\lambda \cdot L}{d}$$

Задача: Эксперимент Юнга с геометрическими размерами установки $d=19.0 \mu\text{m}$, $L=80.0 \text{ cm}$ дал расстояние от центральной яркой полосы до соседней яркой полосы $x=1.90 \text{ cm}$. Какова длина волны используемого света?

Ответ: $0.45 \mu\text{m}$

Использование интерферометра Майкельсона для измерения малых смещений

Распространённой схемой, где используется двухлучевая интерференция, является **схема Майкельсона**. Впервые эта схема была использована в опыте Майкельсона-Морли, способствовавшем признанию справедливости **специальной теории относительности**. В настоящее время эта схема используется в экспериментах по **обнаружения гравитационных волн**, в **Фурье-спектроскопии**, **для исследования качества оптических деталей**, систем. Мы рассмотрим применение этой схемы для обнаружения **малых смещений**, например – регистрации смещений ледников.

$$\mathcal{E}_1(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi_1);$$

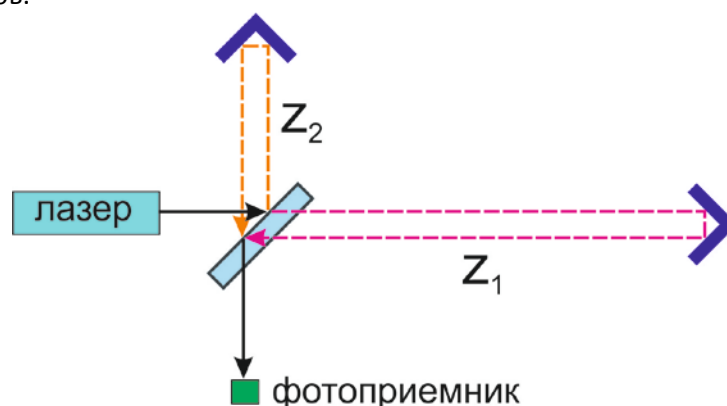
$$\mathcal{E}_2(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - \phi_2);$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (z_1 - z_2)$$

где $(z_1 - z_2)$ – разность длин плеч интерферометра.

$z_1 = z_1(t)$ – изменяется

z_2 – не изменяется



Интенсивность света, регистрируемая приемником,

$$I = I_{\max} \cos^2(\phi/2) = I_{\max} \cos^2\left[\frac{\pi}{\lambda}(z_1 - z_2)\right].$$

Из последнего выражения видно, что при изменении длины z_1 на величину λ фотоприемник регистрирует прохождение одного максимума интенсивности. Следовательно, прохождение одного максимума интенсивности будет при смещении объекта на величину $\lambda/2$.

Электромагнитный спектр

В 1867 году Джеймс Клерк Максвелл завершил разработку электромагнитной волновой теории света. Из этой теории следует, что свет является электромагнитной волной. Измеренная скорость света позволила связать измеренную длину волны и частоту света:

$$\nu \cdot \lambda = c$$

где c – скорость света. ($3 \cdot 10^{10}$ см/сек).

Степень	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
Префикс	atto	femto	pico	nano	micro	milli	centi	deci	kilo	mega	giga	tera
Сокращ.	a	f	p	n	μ	m	c	d	k	M	G	T

Длины волн некоторых участков электромагнитного спектра

Инфракрасный диапазон	>800 нм
Видимый диапазон (глаз человека)	400÷800 нм (0.4÷0.8 мкм)
Ультрафиолет (УФ)	10÷400 нм
Рентген	0.1 ÷10 нм

Fixed-wavelength commercial lasers.

Laser	Wavelength	Average Power Range
Carbon dioxide	10.6 micron	Milliwatts to tens of kilowatts
Nd:YAG	1.06 micron	Milliwatts to hundreds of watts
Nd:glass	1.06 micron	Pulsed only
GaAs (semiconductor diode lasers)	870 nm (near infrared)	as high as 1 W
Cr:ruby	694.3 nm (visual)	Pulsed only
Helium-neon	632.8 nm (visual)	Microwatts to tens of milliwatts
Argon-ion	514.5 nm (visual) 488.0 nm (visual)	Milliwatts to tens of watts Milliwatts to watts
Krypton-fluoride excimer	248.0 nm	Milliwatts to a hundred watts

Задача: Сколько волн «желтого» света ($\lambda = 580 \text{ nm}$) уложится на расстоянии, равном толщине листа бумаги ($\approx 0.01 \text{ cm}$)? Тот же вопрос – для микроволнового излучения с частотой 10 GHz .

Задача: Какова частота света, излучаемого He-Ne лазером ($\lambda = 0.63 \text{ мкм}$)?

Задача: Ультрафиолетовое излучение. Различают две области ультрафиолетового спектра: ближний ультрафиолет UVA, занимающий диапазон длин волн от 320 nm до 400 nm . Он не особенно опасен для кожи человека и необходим для выработки витамина D в организме. ультрафиолет UVB, занимающий диапазон длин волн от 280 nm до 320 nm является опасным, поскольку вызывает рак кожи. Найти частоты, соответствующие UVA и UVB.

Почему лазер? Зеркало Архимеда и гиперболоид инженера Гарина

Зеркало Архимеда

При обороне Сиракуз от осаждавших этот город римских войск Архимед создал подъемные и метательные машины, а зажигательное зеркало, с помощью которого он якобы сжег корабли Марцелла, доныне остается загадкой, волнующей умы исследователей. В дошедших до нас трудах античных историков, писавших вскоре после взятия Сиракуз, упоминания о зеркале нет. Существует несколько ссылок на сожжение Архимедом римских кораблей, сделанных вскользь, как на факт общеизвестный, не требующий пояснений. Описание зеркала сохранилось в двух произведениях византийских ученых, пересказавших - каждый на свой лад - не дошедшую до нас часть Римской истории Диодора Сицилийского, историка, жившего на рубеже нашей эры.

Вот эти описания:

1. Архимед... самым невероятным образом сжег римский флот. Направив особого рода зеркало на Солнце, он собрал пучки его лучей и, благодаря толщине и гладкости зеркала, сумел зажечь солнечным светом воздух так, что возникло колоссальное пламя. Он направил лучи на стоявшие на якоре корабли, и они сгорели дотла.

2. Когда Марцелл убрал корабли на расстояние, превышающее полет стрелы, старик соорудил особое шестиугольное зеркало; на расстоянии, пропорциональном размеру зеркала, он расположил похожие четырехугольные зеркала, которые можно было перемещать с помощью специальных рычагов и шарниров. Зеркало он обратил к полуденному солнцу - зимнему или летнему - и, когда пучки лучей отразились в нем, огромное пламя вспыхнуло на кораблях и с расстояния полета стрелы превратило их в пепел.

Единственным известным нам аналогом Архимедова зеркала может служить конструкция, созданная жившим в VI веке н. э. византийским архитектором и математиком Анфимием, использовавшим не дошедшие до нас источники, содержавшие, видимо, более подробную информацию об изобретении сиракузского ученого. Анфимий применил систему из 24 отдельных зеркал, закрепленных в раме. Подставляя это механизм солнечным лучам, - пишет он, - надо правильно установить центральное зеркало, а потом и остальные, быстро и ловко наклоняя их, ... так, чтобы солнечные лучи, отраженные этими различными зеркалами, направлялись в ту же точку... Конструкции, подобные созданной Анфимием, в современной технике носят название **гелиоконцентраторов**. Сам Анфимий, по слухам, поссорившись с соседом, сжег его дом с помощью составного зеркала. Не было ли зеркало Анфимия тождественно зеркалу Архимеда?

Рассказы о зеркале Архимеда долгое время вызывали недоверие ученых нового времени, особенно историков. А Рене Декарт теоретически опроверг возможность поджечь корабли с помощью зеркал так, как это описывал Диодор Сицилийский и его интерпретаторы. Однако в 1747

г. французский ученый Бюффон построил систему из 128 плоских зеркал, с помощью которой воспламенил просмоленную доску на расстоянии 150 футов. Конечно, никакой эксперимент не даст ответа на вопрос, действительно ли были сожжены Архимедом корабли Марцелла, хотя, вполне вероятно, дело обстояло именно так.

В конце XX века нашелся человек, решивший еще раз поставить опыт, так сказать, в натуре. На этот раз им оказался греческий инженер-механик Иоанис Сакас. Набрал в ноябре 1973 года 70 помощников, он расставил их на берегу бухты с щитообразными зеркалами размером 91 на 50 сантиметров. По команде Сакаса, помощники несколько раз поднимали зеркала, пытаясь сфокусировать солнечные зайчики на лодке, груженной смолой. Наконец, когда лучи удалось совместить в одной точке, лодка в этом месте задымилась и через три минуты вспыхнула!

Аналогичный опыт (правда, на суше) 30 сентября 2005 года провели студенты и профессора Массачусетского технологического института. Правда, дело пошло не так гладко, как у греков: студенты никак не могли навести в одну точку все 129 квадратных зеркал, закупленных для эксперимента. Вскоре небо затянули облака, и продолжение эксперимента стало невозможным.

Вторая попытка увенчалась полным успехом - на этот раз профессора решили обойтись без растяп-студентов и сделали все сами. С помощью зеркала, дающего крестообразный 'зайчик-мишень' на макет римского корабля, они поочередно навели в одно место все 129 зеркал, предварительно задрапированных тканью (чтобы свет одного зеркала не мешал наводить другое). Наконец, когда все было сфокусировано, ученые скинули покрывала. Через несколько минут от макета из красного дуба повалил густой дым, а затем на месте фокусировки вспыхнуло пламя. Полюбовавшись на дело рук своих и затушив огонь, ученые обнаружили, что их гигантский солнечный 'заяц' прожег доску толщиной 2,54 сантиметра насквозь.

В общем и целом проведенные в разные времена опыты убедительно доказали: Архимед вполне мог для поджога римских кораблей использовать систему зеркал собственной конструкции.

Создание гиперблоида

После революции, в годы гражданской войны, Гарин проживает в Петрограде и работает над созданием гиперблоида — устройства, превращающего световую энергию в тончайший луч, способный разрезать или расплавить все, что угодно. Принцип гиперблоида невероятно прост — весь секрет в системе всего из двух параболических зеркал, поставленных друг против друга. Устройство и постройка аппарата тоже не представляют особых сложностей. Единственная проблема состоит в нахождении компактного и мощного источника световой энергии, причем электричество тут не годится. Таким источником становятся пирамидки из прессованного угля. Их поставляет Гарину некто Стась Тыклинский, в обмен на долю в прибылях. Однако, его попытка проследить за Гариным оканчивается неудачей — Гарин едва не убивает Тыклинского лучом, и скрывается.

Однажды у Толстого спросили, почему его роман называется «Гиперблоид инженера Гарина», ведь в основе прибора - параболическое зеркало? Алексей Николаевич задумался только на секунду: «а так страшнее!»

В известном романе А. Толстого «Гиперблоид инженера Гарина» описан прибор огромной разрушающей силы, основанный на концентрации световой энергии в весьма узком (параллельном) световом пучке (схема прибора дана на рис. 169). Рассмотрите действие прибора и объясните, почему он не может дать тот эффект, который приписывает ему автор?

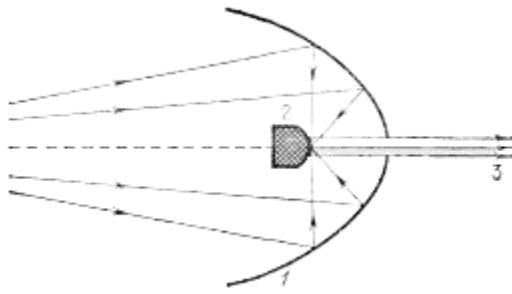


Рис. 169. Схема «гиперboloида»: 1 — собирающее гиперболическое зеркало, 2 — отражающий гиперboloид, 3 — параллельный пучок лучей

Важнейшие характеристики лазеров

1. Уникальные энергетические характеристики излучения
2. Монохроматичность излучения
3. Когерентность излучения
4. Возможность управления временными характеристиками излучения
5. Направленность лазерного излучения

Эти характеристики по-отдельности и в сочетании друг с другом обуславливают их широкое применение в различных областях человеческой деятельности. Не пытаясь хоть в какой-то мере перечислить области применения лазеров, рассмотрим лишь некоторые примеры их применения, которые проистекают из уникальности свойств лазерного излучения.

Физические процессы, лежащие в основе работы лазера

Чтобы понять принцип работы лазера, следует кратко остановиться на картине взаимодействия света с веществом. Представления, положенные в *основу теории*, описывающей оптические свойства вещества:

1. атом при взаимодействии с полем световой волны **проявляет резонансные свойства на некоторой дискретной совокупности частот**, присущей этому атому. Эти резонансы ответственны за линейчатый спектр излучения и поглощения;
2. при воздействии поля световой волны на атом у атома возникает электрический дипольный момент. Этот диполь ведёт себя как гармонический осциллятор (антенна), колеблющийся с частотой вынуждающей силы, обусловленной полем световой волны;

Эта классическая картина взаимодействия света с веществом была дополнена картиной строения атома. В ней объяснялось происхождение резонансных частот: атом обладает некоторым **набором состояний** с дискретными значениями энергии E_n , $n = 0, 1, \dots$ и проявляет **резонансные свойства на частотах, зависящих от разности энергий этих состояний** $\hbar\omega_{mn} = E_m - E_n$. Наконец, Эйнштейн выдвинул предположение, что при взаимодействии света с атомом происходят **три сорта процессов**:

- Во-первых, имеется **поглощение света**, приводящее к переходу атома из состояния с меньшей энергией E_1 в состояние с большей энергией E_2 , причем вероятность такого перехода за 1 сек. пропорциональна величине плотности мощности излучения на частоте перехода атома между состояниями.

- Во-вторых, имеется излучение света при переходе атома из состояния с большей энергией E_2 , в состояние с меньшей энергией E_1 , причем вероятность такого перехода за 1 сек. пропорциональна величине плотности мощности излучения на частоте перехода. Таким образом, Эйнштейном вводится понятие **вынужденного излучения**.
- В-третьих, имеется **спонтанное излучение**. Вероятность спонтанного перехода за 1 сек. не зависит от интенсивности света.

Свойства спонтанного и вынужденного излучения

Итак, имеются два различных типа переходов атомов с верхнего уровня энергии на нижний уровень, сопровождаемых излучением.

Первый тип переходов атомов носит случайный (**спонтанный**) характер. В результате **спонтанно** излучённая каждым атомом волна распространяется независимо от того, куда распространяются волны, излученные другими атомами. Случайными оказываются направления распространения каждой из этих элементарных волн, их фазы, поляризация и частота в пределах линии атомного перехода. Суммарное излучение всех этих элементарных волн оказывается **некогерентным**.

Совсем другими свойствами обладает вынужденное излучение, являющееся **когерентным**. В этом случае все параметры волны излучённой атомом, за исключением амплитуды, совпадают с параметрами сигнальной волны, вызвавшей переход. Важно отметить, что совпадение параметров подразумевает, в частности, совпадение фазы волны, излученной атомом с фазой сигнальной волны, вызвавшей переход. Вследствие этого факта происходит их конструктивная интерференция, приводящая к усилению сигнальной волны.

Здесь следует напомнить, что выполняется так называемый принцип суперпозиции – суммарное электромагнитное поле, излученное несколькими атомами равно сумме полей. При этом возможны два крайних случая.

1. Отдельные волны имеют случайные фазы
2. Все волны имеют одинаковые фазы.

Если в некоторый момент времени в точке наблюдения присутствуют все волны, то в первом случае имеем результатом сложение интенсивностей отдельных волн, а во втором – сложение амплитуд отдельных волн. Первый случай реализуется при спонтанном излучении атомов, а второй – при вынужденном излучении.

Следующие две картинки иллюстрируют процесс испускания волн атомами в обычных некогерентных источниках света и в лазере. Следует обратить внимание на то, что **согласованность (когерентность) всех параметров элементарных волн** (цугов волн), испускаемых атомами во втором случае. Причина этого – в первом случае – спонтанное излучение, а во втором - вынужденное излучение.

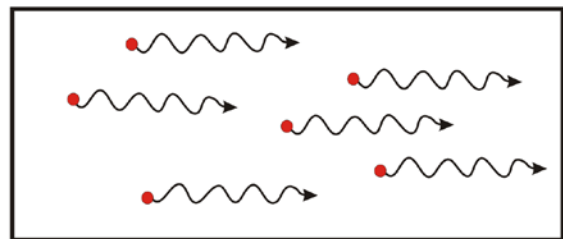
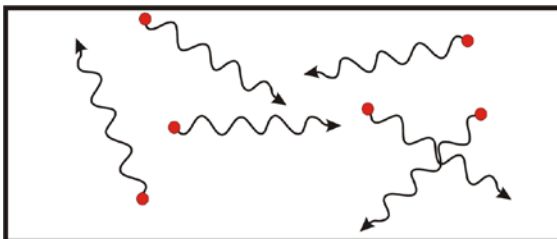
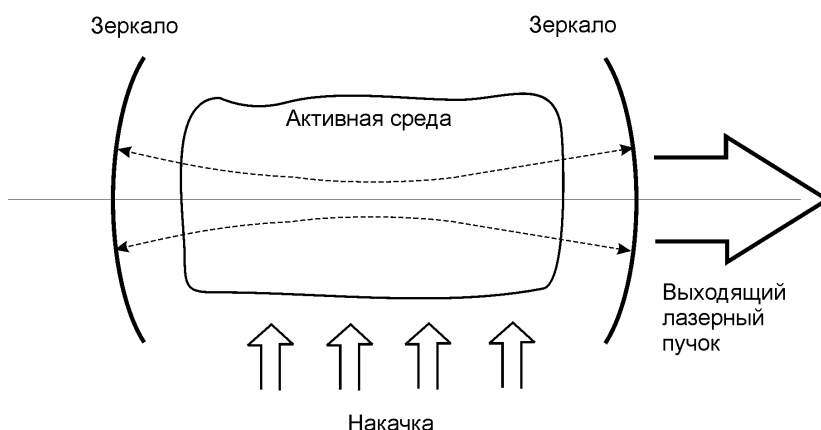


Схема лазера

Ниже приведена принципиальная схема лазера, где представлены его основные элементы.



Активная среда представляет собой совокупность атомов, молекул, ионов или кристалл (полупроводниковый лазер).

Накачка возбуждает атомы активной среды, переводя их из основного (нижнего) энергетического состояния на верхний (возбуждённый) уровень. Накачка обеспечивает условия, когда проходящий через среду свет будет усиливаться и возможно возникновение **генерации**.

Зеркала образуют так называемый **оптический резонатор** лазера. Задача оптического резонатора – обеспечение необходимого уровня обратной связи для возникновения генерации.

Свойства генерируемого лазерного излучения:

- **монохроматичность излучаемого света**,
- **возможность получения высокой направленности излучения**.

Направленность излучения лазера определяющим образом сказывается на возможности сфокусировать луч в пятно малого диаметра. Она характеризуется численной величиной, называемой **расходимостью пучка**.

Получения оптических импульсов малой длительности

Уже в первые годы развития лазерной техники исследователи стали искать пути получения оптических импульсов как можно меньшей длительности. Такие импульсы требуются во многих областях науки и техники. С их помощью можно изучать быстротекущие процессы, происходящие при взаимодействии света с веществом, в химических и фотохимических реакциях, в физике плазмы... Кроме фундаментальных исследований существует и немало чисто технических, прикладных задач, требующих возможно более коротких импульсов - например, для создания точных систем измерения времени или длины. Ведь если оптические импульсы использовать как метки времени, то чем меньше их длительность, тем точнее можно измерить интервал между ними. Очевидное применение – лазерные локаторы, например для измерения расстояния до Луны. "Сжимаемая" импульс в сотни и тысячи раз, получают соответствующий рост его мощности.

История создания коротких световых импульсов начинается с 1962 года (уже через два года после постройки первого лазера), когда были получены импульсы наносекундного диапазона ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$). Импульсы длительностью в десятки наносекунд излучали твердотельные лазеры с оптической накачкой при работе в так называемом режиме модуляции добротности резонатора.

Пикосекундные и особенно фемтосекундные оптические импульсы открывают широкие возможности для исследования быстротекущих процессов в физике, химии, биологии и

других областях науки. Фемтосекундные импульсы, например, используют для создания электромагнитных полей с напряженностью выше внутриаомного. Ведутся интенсивные исследования по созданию оптических компьютеров, в которых применение фемтосекундных импульсов с гигагерцовой частотой повторения сулит резкое увеличение объема и быстродействия компьютерной памяти.

В настоящее время мы находимся на пороге очередного прорыва в следующий диапазон - аттосекундный. Аттосекунда в тысячу раз меньше фемтосекунды, то есть $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$. В видимом диапазоне спектра продвинуться в аттосекундную область принципиально невозможно, однако это вполне реально в дальнем ультрафиолете и мягком рентгеновском излучении.

Направленность лазерного излучения

Появление лазеров привело к появлению множество областей их применения и, в частности, в технологических применениях. Причина их широкого применения заключается в том, что излучение лазеров может обладать такими **свойствами**, как

- чрезвычайно высокая направленность,
- высокие достижимые мощности
- возможность получения очень коротких длительностей импульсов.

Направленности излучения лазера определяющим образом сказывается на возможности сфокусировать луч в пятно малого диаметра. Она характеризуется численной величиной, называемой **расходимостью пучка**.

Рассмотрим, с какими проблемами мы сталкиваемся при **фокусировке излучения нелазерного источника света**. Пусть это будет круглая излучающая площадка диаметром D . Каждая точка площадки работает как независимый точечный источник света. Из построения изображения следует, что для того, чтобы получить при фокусировке маленькое пятно, которое в нашем случае является «размером» рабочего инструмента, нужно как можно дальше отодвигать источник от линзы. Если источник находится на расстоянии L , значительно превышающем фокусное расстояние линзы f , то изображения оказывается почти в фокальной плоскости линзы, а его размер равен $\varnothing \approx f \cdot D/L$. Однако, при увеличении расстояния L будем перехватывать всё меньшую долю излучаемого светового потока $\propto (D_{\text{линза}}/L)^2$.

При **фокусировке лазерного источника** - иная картина. В идеальном случае у круглого пучка диаметром D с плоским волновым фронтом расходимость излучения

$$\theta \propto 2 \frac{\lambda}{D}$$

Это – т.н. **дифракционная расходимость**.

При фокусировке линзой с фокусным расстоянием f лазерного пучка размер пятна даётся выражением

$$\varnothing \approx \theta \times f$$

Пучок Nd:YAG лазера диаметром 2мм фокусируется линзой с фокусным расстоянием $f = 10 \text{ см}$ в пятно диаметром

$$\varnothing \approx 2 \frac{\lambda}{D} \times f = 2 \frac{1 \mu}{2 \cdot 10^3 \mu} 10 \text{ см} \approx 0.1 \text{ мм}$$

Поскольку можно изготовить фокусирующую систему с относительной апертурой (или F-числом $F^\# = f/D$) линзы близким к единице, то из последнего выражения следует возможность получения сфокусированного пятна радиусом, равным длине волны:

$$\varnothing_{\min} \approx 2\lambda \times \frac{f}{D} = 2\lambda \times F^\# \approx 2\lambda$$

Вся мощность лазера оказывается сконцентрированной в пределах такой маленькой площадки. В результате при невысоких энергиях лазерного импульса не представляет труда испарять металл, керамику, что используется в лазерной технологии. Столь большие плотности мощности света могут приводить к таким напряженностям поля, что происходит электрический пробой воздуха – лазерная искра.

Высока направленность излучения лазера (малая расходимость излучения) позволяют использовать его для локации удалённых объектов, когда требуется, чтобы на объект падала как можно большая интенсивность света. В этом случае и отраженный сигнал будет обладать большей интенсивностью.

В качестве примера рассмотрим пучок He-Ne лазера, прошедший через диафрагму диаметром 1 мм. Оценим расстояние L , на котором диаметр пучка увеличится вдвое.

$$D + 2 \frac{\lambda}{D} \times L \approx 2D \Rightarrow L \approx \frac{D^2}{2\lambda} = \frac{(10^{-3} m)^2}{2 \cdot 0.63 \cdot 10^{-6} m} \approx 1 m$$

Таким образом, лишь на расстоянии порядка 1 метра пучок станет в 2 раза шире.

Как осуществили лазерную локацию Луны?

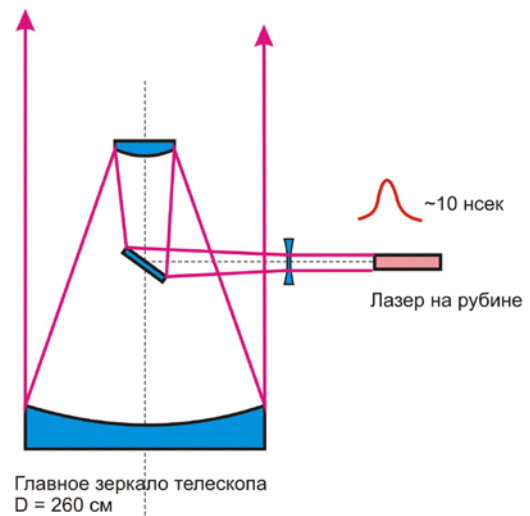
На рисунке приведена упрощенная схема лазерно-локационной системы космического назначения. Расстояние до Луны $L \approx 380000$ км. Если диаметр лазерного луча d , а диаметр зеркала телескопа D , то на Луне приблизительные размеры пятен от лазера без телескопа и с телескопом равны

$$\varnothing_{laser} \approx \frac{\lambda}{d} L; \quad \varnothing_{tel} \approx \frac{\lambda}{D} L. \text{ Таким образом}$$

$$\frac{\varnothing_{laser}}{\varnothing_{tel}} \approx \frac{D}{d} \text{ и при } d \approx 0.5 \text{ см получаем}$$

уменьшение размера пятна в ≈ 500 раз, при этом

$$\varnothing_{tel} \approx \frac{0.7 \mu}{260 \cdot 10^4 \mu} 380000 km \approx 100 \text{ м.}$$



Примеры применения лазеров

Materials processing

Область лазерной технологии со временем расширяется, охватывая не только лазерную резку, сварку, маркировку. Лазерным лучом раскраивают ткани, его используют в химии для разделения изотопов

При этом нужно четко понимать, что теория лазеров и описание свойств лазерных пучков – это раздел **физической оптики, который занимается описанием оптических явлений с волновой точки зрения.**

Термином «**лазерная технология**» традиционно обозначается **область применения лазеров в промышленности.**

Сварка, резка, изготовление отверстий, термообработка – лазерная закалка, лазерное легирование (легирующая присадка в виде порошка предварительно наносится на обрабатываемую лазерным лучем поверхность).

Используется для металлов и неметаллов (пластмассы, ткани).

Лазерная сварка и резка хорошо сочетается с роботами, создавая в результате полностью автоматизированные обрабатывающие центры, например, в автомобильной промышленности.

Обработка хрупких материалов (керамика, стекло, кремниевые пластины) – скрайбирование – нанесение на поверхности материала канавок или близко расположенных отверстий. После этой операции материал легко надламывается (раскалывается) вдоль нанесённых канавок.

Метрология

Лазеры широко применяются в контрольно-измерительной технике. Они используются при лазерной локации, в частности для мониторинга загрязнения окружающей среды.

Особо стоит рассказать о лазерных стандартах частоты - лазерах, в которых приняты специальные меры для стабилизации частоты их излучения. Они имеют уникально высокую стабильность частоты, возможность создания в одном приборе эталонов частоты (то есть времени) и длины (интерферометрические измерения длины волны).

Оптические стандарты частоты широко применяются сейчас в спектроскопии сверхвысокого разрешения и в прецизионных физических экспериментах, находят практическое приложение в метрологии, локации, геофизике, связи, машиностроении, космических исследованиях и других областях.

Телекоммуникация

Используют диодные лазеры, излучение которых модулируется тем или иным образом, а затем передается по оптическому волокну. Отметим, что использование волоконной оптики сыграло определяющую роль в возникновении высокоскоростного интернета.

Приём, использующий пропускание через одно и тоже оптическое волокно совокупности лазерных пучков с равноотстоящими частотами - техника, называемая *wavelength division multiplexing*. Развитие этой технологии передачи информации в совокупности с совершенствованием усилителей на оптическом волокне, легированном эрбием – магистральное направление в современной телекоммуникации.

Лазеры в медицине

Здесь особо следует отметить использование в качестве лазерного скальпеля лазер на двуокиси углерода. Уникальной особенностью этого инструмента является бескровность получаемого разреза, поскольку при разрезе происходит прижигание сосудов. Чтобы добиться этого эффекта, в средние века врачи оперировали раскалёнными хирургическими ножами. Кроме того, подобный инструмент принципиально не может занести инфекцию в силу очевидной стерильности.

Особую роль играет лазер в операциях на глазу. Лазерный пучок проходит сквозь зрачок глаза и фокусируется на сетчатке, прижигая её – то есть операция по ликвидации отслоения сетчатки проходит без вскрытия глаза, не на открытом глазном яблоке, как было в долазерную эпоху.

Использование лазерной **ангиопластики** (операции на сосудах) позволило упростить этот тип коронарной хирургии и увеличить число оперированных пациентов до сотен тысяч в год.

Военное применение лазеров

Основное их применение – обнаружение и нацеливание. Здесь лазеры работают в качестве локаторов (лидаров) в связке с различными опто-электронными устройствами и компьютерами.

Лазерный контроль атмосферы

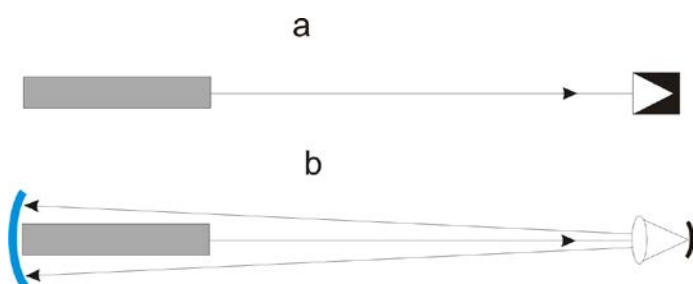
Актуальность этой проблемы очевидна. Для обнаружения в атмосфере тех или иных загрязнений проводят химический анализ проб воздуха. Понятно, что эта процедура требует больших затрат времени и не всегда возможна. Например, требуется взять пробу воздуха позади только что пролетевшего лайнера на высоте в несколько километров. Или требуется проводить мониторинг воздуха вблизи заводской трубы.

В таких ситуациях зондирование атмосферы лазерным лучом является чрезвычайно удобным. Действительно, этот **метод контроля является дистанционным** (не надо брать пробы) и обладает **высокой чувствительностью** (доля загрязнения может быть $10^{-9} \div 10^{-10}$). Наконец, анализ проводится **очень быстро**, так что обеспечивается **мониторинг ситуации**.

На практике применяют две оптические схемы лазерного зондирования.

№1.

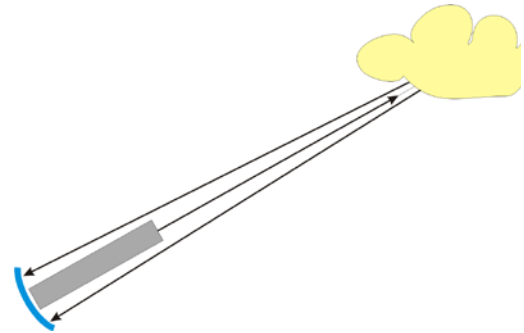
Лазерный луч посылают по трассе, в конце которой находится фотоприемник (а) или ретрорефлектор (b)



Измерение выполняется **для различных частот лазерного излучения**, для чего используется лазер с перестройкой частоты (на красителях или параметрический). Измеряя частотную зависимость интенсивности прошедшего света можно, как в спектрометре, наблюдать линии поглощения, характерные для тех или иных химических соединений.

№2.

Лазерный луч посылают в контролируруемую область, а фотоприемник, совмещенный с излучателем, улавливает излучение, рассеянное зондируемой областью. В этом случае лазерную систему контроля называют **лидаром**. Лидар можно рассматривать как разновидность лазерного локатора.



В такой схеме используется свет одной **определённой частоты**. Фотоприемником регистрируется рассеянное объектом лазерное излучение. Причинами рассеяния могут быть аэрозоли (то есть достаточно крупные частица или капельки) или отдельные молекулы. Характер рассеяния лазерного света на этих рассеивающих элементах – различный. Рассеяние на аэрозольных частицах не приводит к изменению частоты рассеянного света. При рассеянии света на молекулах имеется смещение частоты рассеянного света по отношению к частоте падающего света - это **комбинационное рассеяние света**. Обычно наблюдаются т.н. стоксовские компоненты рассеянного излучения, у которых частота меньше частоты падающего света (а длина волны - больше).

Так, для рубинового лазера с $\lambda = 694 \text{ nm}$ будут зарегистрированы компоненты рассеянного излучения с длиной волны $\lambda = 798 \text{ nm}$ при наличии CO (угарный газ) и $\lambda = 785 \text{ nm}$ при наличии NO (окись азота).

На практике для контроля атмосферы по комбинационному рассеянию применяют вторую гармонику рубинового лазера (0.347 мкм) и четвертую гармонику лазера на гранате с неодимом (0.266 мкм).

С помощью лидаров измеряют также стандартные **метеорологические параметры атмосферы: температуру, влажность, плотность, скорость ветра**.

С помощью лидаров производят **зондирование моря или океана с борта самолёта** с целью обнаружения загрязнения нефтепродуктами или исследования планктона.

Голография

Голография была создана в 1948 г., когда Д. Габор предложил метод, позволяющий получать **изображение объекта с помощью дифракционной картины**, даваемой объектом. Голографический процесс разделяется на два этапа.

1. Фотографирование дифракционной картины, даваемой волной, рассеиваемой объектом совместно с опорной волной. В результате получаем голограмму.
2. Освещаем голограмму опорной волной. В следствии дифракции опорной волны на голограмме получаем совокупность волн, одна из которых совпадает с сигнальной волной, которую рассеивал объект.

Кроме поражающего воображение трёхмерного изображения, голография внесла существенный вклад в такие области, как **оптические вычисления** (optical computing), **микроскопию, спектроскопию, интегральную оптику, распознавание изображений, неразрушающий контроль, оптическое хранение данных и оптоволоконную связь**.

При записи голограмм, как мы видели, **возникают «ненужные» решетки**, которые на этапе воспроизведения могут давать «посторонние» изображения. Лейт и Упатниекс предложили использовать так называемую **внеосевую схему**, в которой происходит пространственное разделение мнимого и действительного изображений и нулевого порядка. Суть предложения –

использовать наклонное падение опорной волны. Получаемая голограмма является **пропускающей**.

Принципиально иным подходом является использование схемы Денисюка. В этом случае получаем объёмную голограмму (решетку) и, как было показано в предыдущей лекции, при восстановлении изображения «лишние» порядки дифракции отсутствуют. На следующем рисунке представлены эти две голографические схемы. Получаемая голограмма является **отражательной**.

Отметим одно из важных свойств голограмм – **каждая точка объекта записана на всей поверхности фотопластины**. Поэтому, например, кусок первоначально записанной голограммы при воспроизведении даст изображение всего объекта, правда менее подробное. То есть голограмма оказывается **надежнее фотографии при хранении информации**.

Волоконная оптика

Оптические волокна используются для **транспортировки** света. Легко реализуется **изогнутость пути** - без применения специальной оптики. Оптические волокна могут передавать энергию на **короткие расстояния**, как в медицине или в технических применениях, или на **длинные расстояния** – для осуществления высокоскоростной передачи сигналов в системах коммуникации. Волокна могут быть объединены в **жгуты** для освещения или передачи изображения. В последнем случае волокна должны быть расположены одинаковым образом на обоих концах жгута. Оптические волокна могут выполнять и более сложные функции **элементов усилителей** или **активных элементов** лазеров. Они могут выступать в качестве **сенсоров** для мониторинга условий, допустим напряжений, давления или температуры.

На простейшем уровне, возможность светопередачи определяется **принципом полного внутреннего отражения**, ограничивающего пучок размерами сердцевинки волокна световода.

Полное отражение

Пусть волна падает из среды оптически более плотной в менее плотную среду, то есть $n_1 > n_2$. Тогда, в соответствии с законом Снелла, угол преломления оказывается больше угла падения. С ростом угла падения наступает такой момент, когда угол преломления становится равным 90° и этот **критический угол** падения θ_c находится из соотношения.

$$n_1 \cdot \sin \theta_c = n_2 \cdot \sin 90^\circ = n_2 \quad \Rightarrow \quad \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Для перехода «стекло-воздух» критический угол $\theta_c = 0.72973 = 41.8^\circ$. При угле падения $\theta_i \geq \theta_c$ **свет полностью отражается** от границы раздела.

Хотя принцип очень прост, его реализация требует использования очень чистых материалов и изготовления очень гладких отражающих поверхностей. Действительно, использовать в практических целях лишь одно волокно невозможно в силу следующих причин. Свет утекает там, где нарушается полное внутреннее отражение: это м. б. касание с другим материалом, царапины или банальные отпечатки пальцев. Чтобы избежать этих эффектов, применяется покрытие сердцевинки, по которой должен распространяться свет, дополнительной оболочкой с меньшим показателем преломления. В результате поверхность, где происходит полное внутреннее отражение, оказывается изолированной от внешнего воздействия.

Разница в показателях преломления центра и оболочки не должна очень большой. Так, **при разнице в показателях преломления 1% критический угол оказывается равным 82°** .

Попытка использовать струю, как световод для доставки излучения на обрабатываемую деталь.