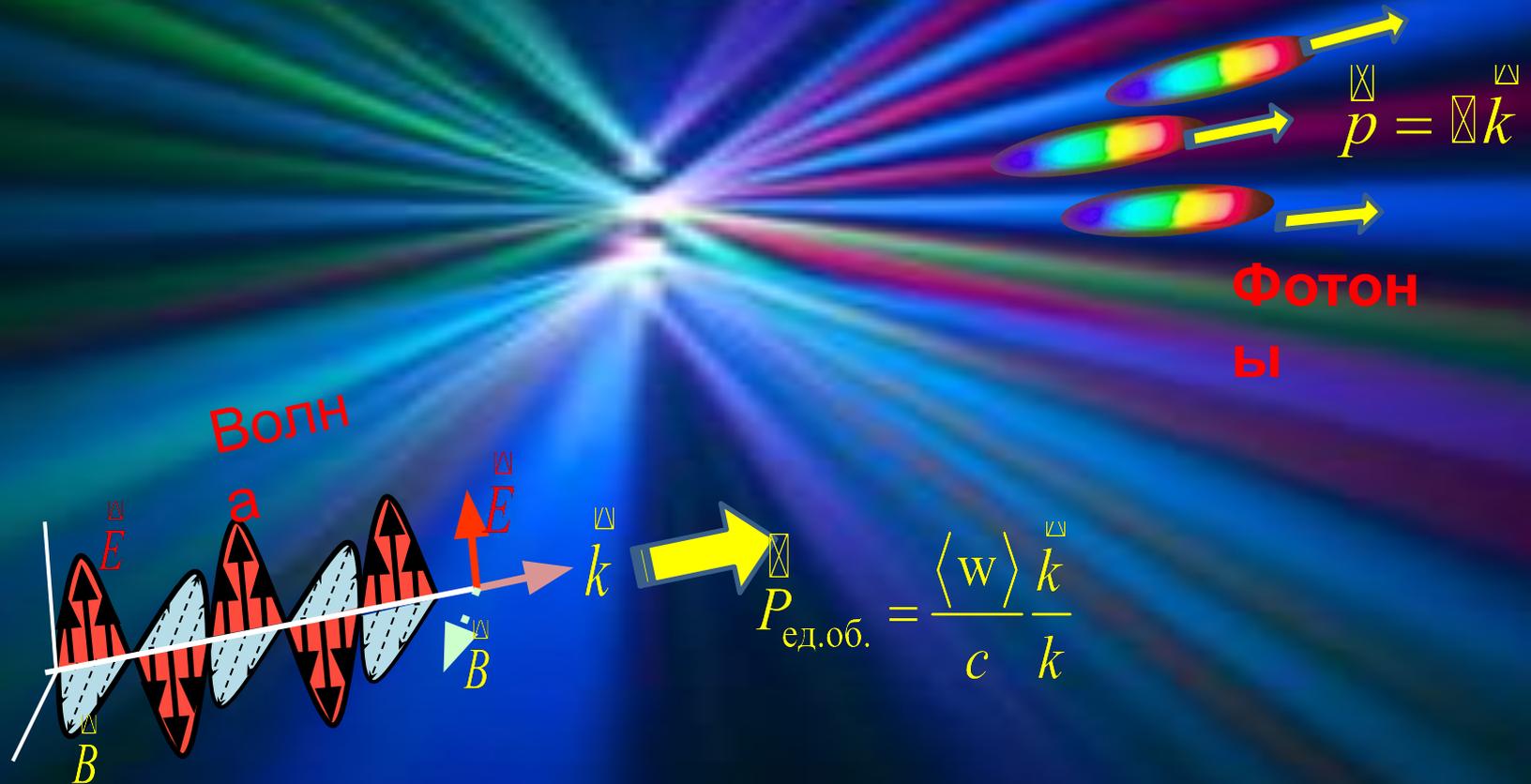


Давление света

МИЭТ. Кафедра общей физики. Л.
В.В.

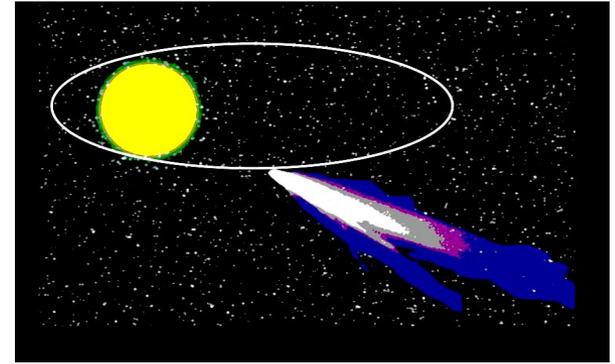




Историческая справка

Немецкий ученый **И. Кеплер**

объяснил отклонение хвостов комет, пролетающих



И. Кеплер

1773г. **Дж. Максвелл** предсказал, что свет должен оказывать давление при освещении поверхности тела.

Под действием электрического поля волны электроны в телах совершают колебания – **образуется переменный электрический ток**.

Этот ток направлен вдоль напряженности

На упорядоченно движущиеся электроны действует

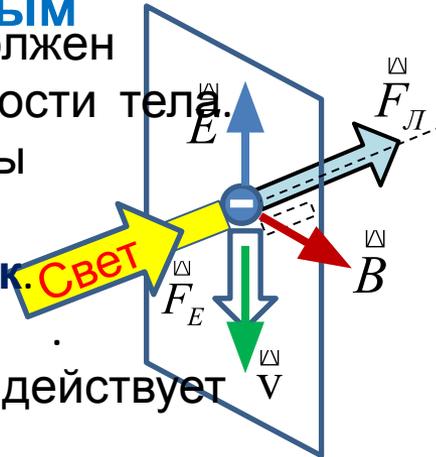
сила Лоренца

$$\vec{F}_L = -e \left[\vec{v}, \vec{B} \right]$$

со стороны магнитного поля световой волны.

Сила F_L , направленная в сторону распространения волны,

и есть сила светового давления.



Дж. Максвелл

1899г. Классические опыты П. Н. Лебедева.

Прибор Лебедева состоит из легкого стержня на кварцевой нити. По краям стержня прикреплены легкие

«крылышки» 1 и 2. Вся система находится в вакууме.

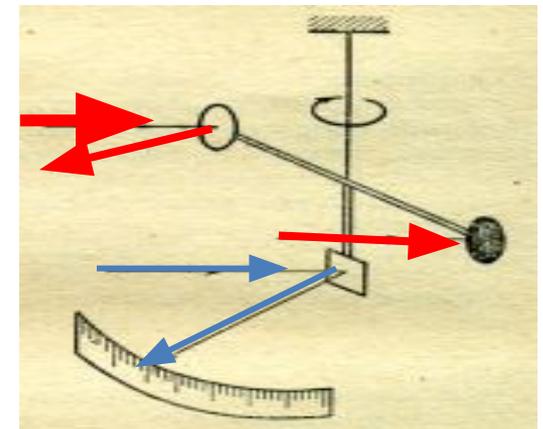
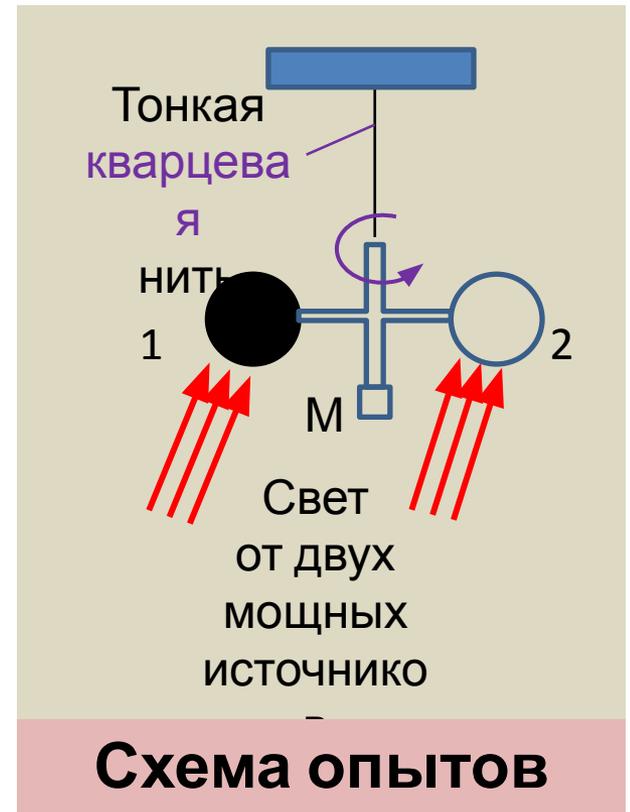
Давление света зависит от коэффициента отражения поверхности.

- 1) Поверхность черного крылышка 1 поглощает свет и получает импульс ϵp .
- 2) При отражении от зеркальной поверхности «крылышко» 2 получает

Направление поворота системы показано на схеме опытов **стрелкой**. **Угол поворота** фиксировался по световому зайчику, отраженному от зеркала М.

а **модуль кручения нити** определялся по

Значения светового давления, полученные в опытах, в пределах погрешностей измерения согласовывались



Импульс электромагнитной волны.

Давление света с волновой точки зрения

С электромагнитной волной связан не только **перенос энергии**, но и **перенос импульса**. **Плотность потока энергии** определяется

вектором Пойнтинга $\vec{j}_w = \vec{E} \times \vec{H}$, модуль которого равен w .

Здесь E и H – напряженности электрического и магнитного полей, $w = I$ – плотность электромагнитной энергии (энергия в единице объема).

Интенсивность волны определяется как среднее значение модуля плотности потока энергии:

Импульс единицы объема электромагнитной волны выражается через $p_{\text{ед.об}} = j/c^2$ $p_{\text{ед.об}} = \langle w \rangle / c$

вектор Пойнтинга как $\vec{p}_{\text{ед.об}} = \vec{j}_w / c^2$. модуль которого равен $p_{\text{ед.об}} = \langle w \rangle / c$.

Импульс Δp_{\perp} , переданный при отражении и поглощении волны единице

поверхности в единицу времени $\Delta p_{\perp} / \Delta t$, приводит к возникновению давления света $P_D = \Delta p_{\perp} / S \Delta t$

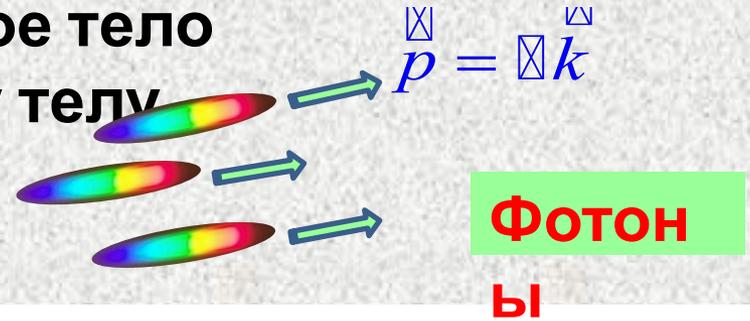
на поверхность: $P_D = \langle j_{w\perp} \rangle / c$, где $j_{w\perp}$ и S – проекции силы

Расчет давления при нормальном падении света на поверхность тела $P_D = \langle w \rangle (1 + R)$ R

приводит к формуле $P_D = \langle w \rangle (1 + R)$, где R – коэффициент

Давление света с корпускулярной точки зрения

Давление света на освещаемое тело объясняется **передачей** этому телу **импульса** при отражении и поглощении **фотонов**.



Импульс фотона равен $\hbar k$, модуль которого $p = \hbar \omega / c$, энергия фотона $E = \hbar \omega = pc$

Давление света P_D определяется как

$$P_D = \frac{F_{\perp}}{S \cdot \Delta t} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{поверхности}} = F/S \\ F_{\perp} = \Delta p_{\perp} / \Delta t \\ \text{силы,} \end{array} \right. \left\| \begin{array}{l} \text{Здесь } S - \text{площадь освещенной} \\ F_{\perp} - \text{перпендикулярная составляющая} \\ \Delta p_{\perp} - \text{действующей на поверхность;} \\ - \text{перпендикулярная} \end{array} \right.$$

Давление при нормальном падении

Свет монохроматический свет падает по нормали к поверхности тела с коэффициентом отражения R .

Среднее число фотонов $\langle n \rangle$ в единице объема равно $\langle n \rangle = \langle w \rangle / \hbar \omega$

, $\langle w \rangle$

где $\langle w \rangle$ - средняя плотность энергии излучения. Каждый из фотонов выводит импульс, равный $\hbar k = \hbar \omega / c$

$$N_0 = \langle n \rangle \cdot V$$

Число фотонов в этом объеме N_0 , и они все за

время Δt

доставят импульс $N_0 \hbar k$ к поверхности в области площадки S . Часть фотонов

Передача импульса телу

от одного отраженного фотона внутри тела.



Изменение импульса фотона:
 $\Delta p_\phi = (-p) - p = -2p$

сохранения импульса:
 $\Delta p_\phi + \Delta p_{отр} = 0$

Передача импульса телу

от одного поглощенного фотона.

Изменение импульса фотона:
 $\Delta p_\phi = 0 - p$

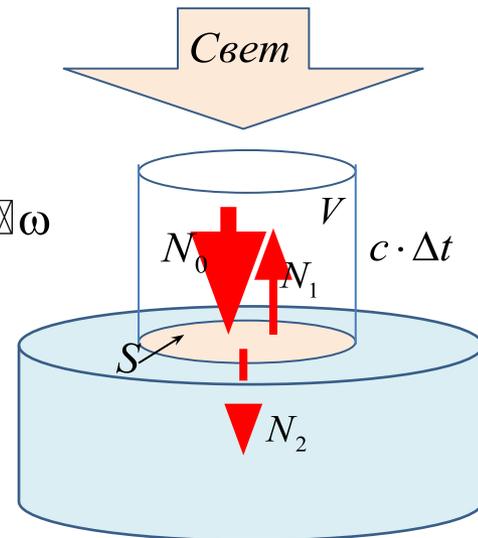


В результате:

$$\Delta p_\perp = N_1 \Delta p_{отр} + N_2 \Delta p_{погл} = N_1 2p + N_2 p = R \langle n \rangle V \cdot 2 \frac{\hbar \omega}{c} + (1-R) \langle n \rangle V \cdot \frac{\hbar \omega}{c}$$

и учитывая, что $\langle n \rangle \hbar \omega = \langle w \rangle$ и $V = S \cdot c \Delta t$

$$P_D = \langle w \rangle (1+R)$$



Давление при наклонном падении света на плоскую

Пусть на поверхность тела падает поток излучения под углом θ к нормали.

Выделим наклонный цилиндр в падающем свете с площадью основания S , высотой h и длиной $c \cdot \Delta t$

боковой образующей, равной $h / \cos \theta$. На верхнем

Объем цилиндра $V = Sh = S \cdot c \Delta t \cos \theta$. В этом объеме содержится $\langle n \rangle V$ фотонов,

где $\langle n \rangle$ - среднее число фотонов в единице объема.

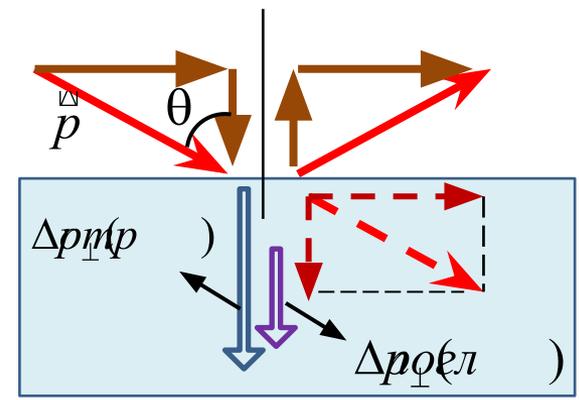
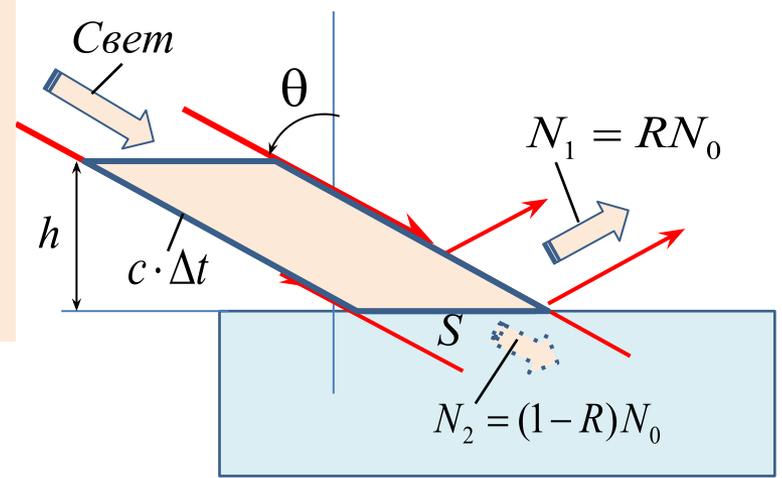
Все $\langle n \rangle V$ фотонов за время Δt достигнут поверхности S . Часть из них $N_1 = RN_0$

отразится от поверхности, имеющей коэффициент отражения R . Другая часть $N_2 = (1-R)N_0$

проникает внутрь тела и поглощается.

$$\Delta p_{\perp} = R \cdot N_0 V \cdot \left(2 \frac{\hbar \omega}{c} \cos \theta\right) + (1-R) \cdot N_0 V \cdot \left(\frac{\hbar \omega}{c} \cos \theta\right)$$

$$\langle w \rangle = \langle n \rangle \hbar \omega$$



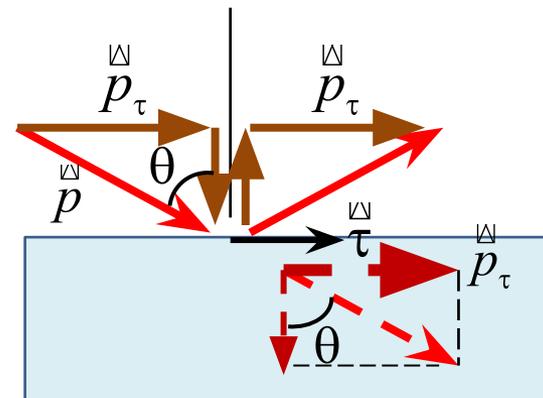
$$P_D = \frac{\Delta p_{\perp}}{S \Delta t} = \langle w \rangle (1+R) \cos^2 \theta$$

Тангенциальная составляющая силы, действующей при поглощении света

Пусть свет падает на плоскую пластинку под углом θ к его нормали. Коэффициенты отражения R и поглощения $1 - R$

и соответственно равны R и $1 - R$. Исходя из корпускулярных представлений о свете как потока фотонов, определим тангенциальную силу F_τ

действующую со стороны падающего излучения на единицу поверхности пластинки. Сила возникает в результате поглощения фотонов, имеющих тангенциальную составляющую импульса (рисунок).



Введем **единичный вектор** $\vec{\tau}$, касательный к поверхности. При отражении каждого фотона **компоненты импульса**, перпендикулярные поверхности дают вклад в давление света, а компоненты импульса \vec{p}_τ , параллельные поверхности, дают вклад в суммарный переданный пластинке импульс Δp_τ и в тангенциальную составляющую силы F_τ , действующей на

поверхности.

При отражении каждого фотона **компоненты импульса**, перпендикулярные поверхности дают вклад в давление

света, а компоненты импульса \vec{p}_τ , параллельные поверхности,

дают вклад в суммарный переданный пластинке импульс

и в тангенциальную составляющую силы F_τ ,

действующей на

Расчет величины силы $f_{\tau} = F_{\tau}/S$

Выделим в падающем световом пучке цилиндр с площадью основания S и длиной образующей $c\Delta t$. Высота наклонного цилиндра $h = c\Delta t \cos \theta$, где θ - угол падения света.

Объем цилиндра равен $V = S \cdot c\Delta t \cos \theta$

Если $\langle n \rangle$ - число фотонов в единице объема, то внутри выделенного цилиндра содержится $\langle n \rangle V$ фотонов.

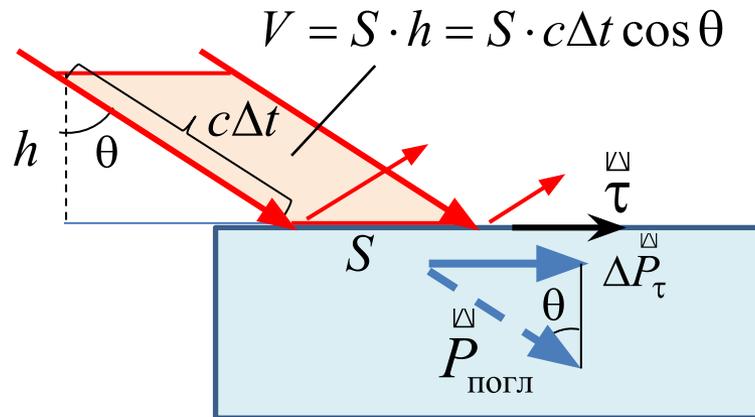
Часть фотонов, равная $(1-R)\langle n \rangle V$, поглотится, остальные фотоны отразятся от поверхности. Поглощенные фотоны передадут $P_{\text{погл}} = (1-R)\langle n \rangle V (\hbar \omega / c)$ зеркалу импульс.

$$\Delta P_{\tau} = P_{\text{погл}} \sin \theta$$

Горизонтальная проекция **определяет величину**

Таким образом:

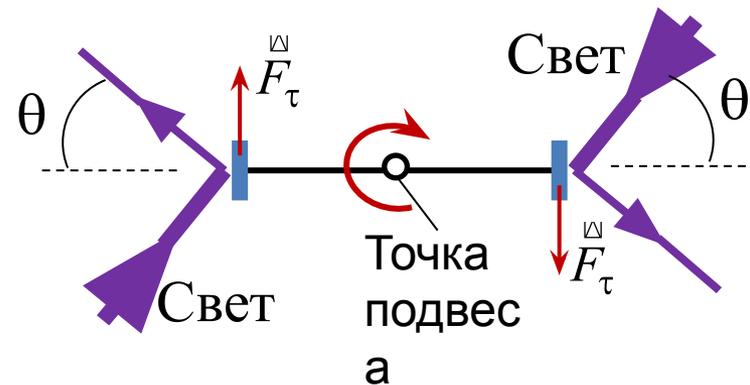
$$f_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta P_{\tau}}{\Delta t} = (1-R) \langle w \rangle \sin \theta \cos \theta$$



Измерение тангенциальной силы

в эксперименте

Схема прибора, с помощью которого можно измерить горизонтальную составляющую силы, действующей со стороны направленного пучка света, показана на рисунке.



Световой пучок падает на легкие пластиночки, укрепленные перпендикулярно на несущем стержне.

Угол падения выбирается равным

$$F_{\tau} \propto \cos \theta \sin \theta$$

, так как

Тангенциальные составляющие силы создают вращающий момент относительно точки подвеса, тогда как нормальные силы давления не

Давление лазерного излучения

Интерес к световому давлению снова появился после изобретения

На рисунке показана схема эксперимента с лазером мощностью 250 МВт. Прозрачная стеклянная сфера диаметром 20 мкм висит в воздухе над стеклянной пластиной на высоте около 1 см над её поверхностью. Хотя частица очень мала и еле различима невооруженным глазом, в опыте она легко обнаруживается по яркому сиянию из-за рассеяния на ней света лазера.

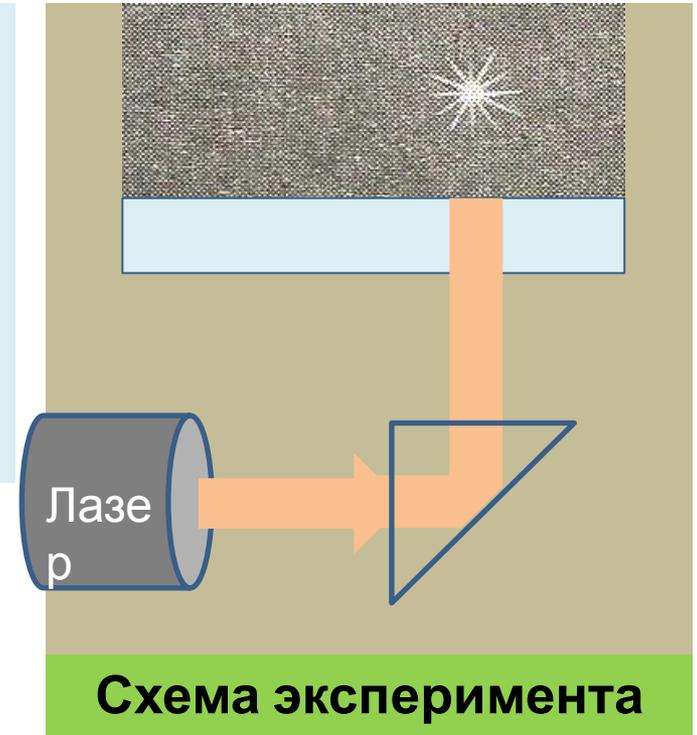
Лазерное излучение можно сфокусировать в область с площадью поперечного сечения с радиусом порядка длины волны генерации . Давление в фокусе

Пример. Лазер на рубине излучает в импульсе длительностью 0,5 нс лазерного излучения может достигать сотен атмосфер энергию 1 Дж на длине волны $\lambda = 694$ нм в виде почти параллельного

$$S = 1 \text{ м}^2$$

пучка света с сечением . Давление сфокусированного пучка

света при нормальном падении на черную поверхность тела



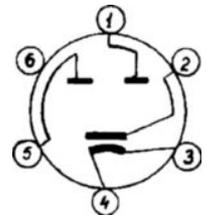
Световое **давление лазерного** излучения достигает значительной величины, и частицы диаметром от 0,1 до 100 мкм в лазерном луче могут получать ускорение, в десятки тысяч раз превышающее ускорение свободного падения.

Давление лазерного излучения может использоваться для решения многих актуальных задач атомной физики, например для ускорения в высоком вакууме малых частиц до очень больших скоростей, разделения газов разной массы.

Датчики давления

Механотроны

Помимо крутильных весов по методу Лебедева для измерения светового давления используются механотроны, которые представляют собой электровакуумный прибор с механически управляемыми электродами. При воздействии внешнего механического сигнала в механотроне происходит перемещение одного или нескольких подвижных электродов, что вызывает соответствующее изменение анодного тока.

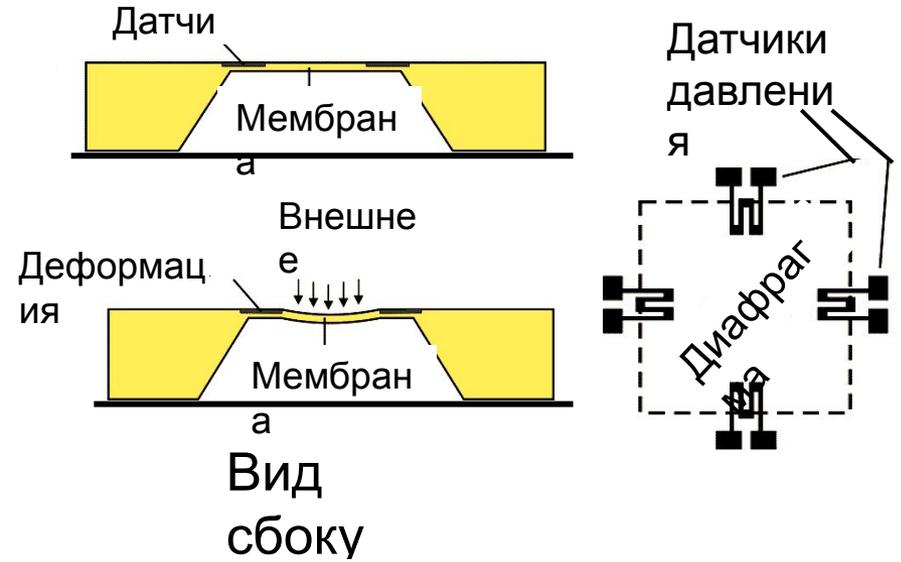


Механотроны обычно применяют для измерения больших уровней мощности и энергии импульсов лазерного излучения, например непрерывного излучения мощных СО₂-лазеров и импульсного на стекле с неодимом. Современные устройства позволяют измерять мощность лазерного излучения, начиная с мощности от единиц милливатт.

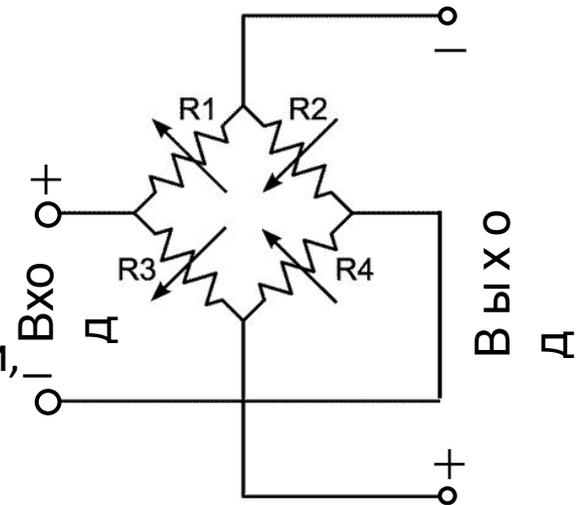
Микроэлектронный датчик давления лазерного излучения

Для измерения внешнего лазерного давления используются пьезорезистивный датчики давления, изготавливаемые по технологии микро-электро-механических систем (МЭМС) на кремниевой подложке.

Датчик имеет тонкую кремниевую мембрану, герметично закрывающую расположенную под ней полость, и четыре сформированных на ее поверхности пьезорезистора, сопротивление которых зависит от давления и температуры.



Любое отклонение внешнего давления от давления внутри полости вызывает деформацию мембраны и изменение сопротивления пьезорезисторов, которые соединяются по мостовой схеме. Усилители, сформированные на общей с датчиком кремниевой подложке, формируют выходной сигнал.



Примеры решения задач

Задача 1. Лазер излучил в импульсе длительностью $\tau = 0,13 \text{ мс}$ пучок света с энергией $E = 10 \text{ Дж}$. Какое среднее давление будет оказывать такой световой импульс, если его сфокусировать в пятно с радиусом $r = 5 \text{ мкм}$ на поверхность, перпендикулярную к пучку, с коэффициентом отражения $R = 0,50$.

Решение. Форма светового пучка вблизи фокуса показана на рисунке.

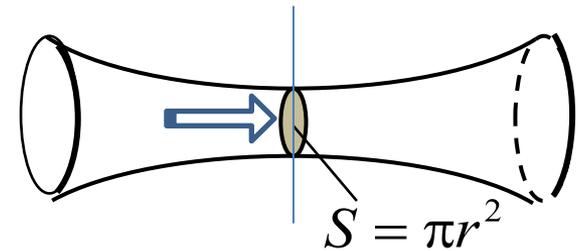
Давление света P_D при нормальном падении на поверхность с площадкой S вычисляется по формуле

$$P_D = \langle w \rangle (1 + R) = \frac{I}{c} (1 + R) ,$$

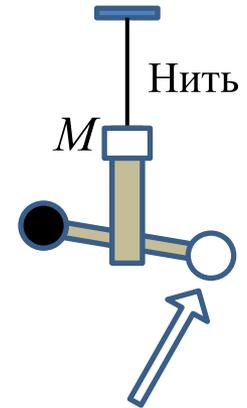
где $\langle w \rangle = \frac{E}{\tau S}$,

В результате получаем :

$$P_D = \frac{E}{\tau \pi r^2 c} (1 + R) = \frac{10}{0,13 \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 3 \cdot 10^8} (1 + 0,5) \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па} .$$



Задача 2. В опыте Лебедева крестовина подвешена на тонкой кварцевой нити. Момент силы кручения $M_F = k \cdot \alpha$, где постоянная кручения нити $k = 2 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$, α - угол поворота крестовины, измеряемый по отклонению светового зайчика, отраженного от зеркала M . На крестовине закреплены два кружка из платиновой фольги, один из них зачернен, другой оставлен блестящим с коэффициентом отражения света $R=0,5$.



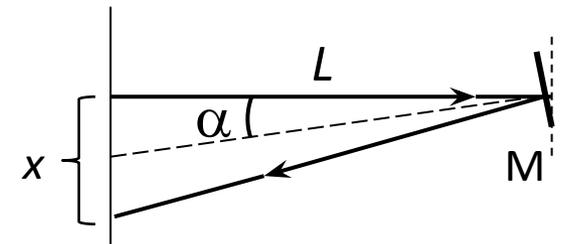
Диаметр кружков $d=5 \text{ мм}$, Расстояние от центра кружков до оси вращения $l = 0,2 \text{ м}$. Какое давление оказывает свет от дуговой лампы, если при освещении блестящего кружка отклонение зайчика от зеркала M равно $x=76 \text{ мм}$ по шкале, удаленной на расстояние $L=1200 \text{ мм}$.

Решение. Световое давление $P_D = F/S$. Из условия равенства моментов при отклонении на угол α $F \cdot l = k \cdot \alpha$ найдем силу светового давления:

$$F = k \cdot \alpha / l$$

Из рисунка следует, что при малых углах поворота:

$$\text{tg} \alpha \approx \alpha, \quad \alpha = x / 2L \rightarrow$$



Учитывая, что $S = \pi d^2 / 4$, окончательно получаем

$$P_D = \frac{2k x}{l L \pi d^2} (\text{МкПа}) = 5,8$$