

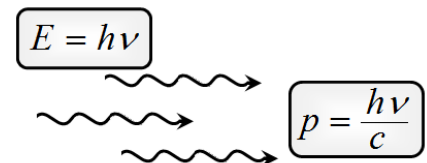
лазерный пинцет

Условие

Задание 2. Оптический пинцет

Оптический пинцет («лазерный пинцет» или «оптическая ловушка») - оптический инструмент, который позволяет передвигать микроскопические объекты с помощью лазерного света. В 2018 году нобелевская премия по физике «за изобретение оптического пинцета и его применение в биологических системах» была присуждена создателю оптического пинцета Артуру Эшкину.

В основу действия таких приборов положено хорошо известное явление – давление света. Световые частицы, фотоны, помимо энергии $E = h\nu$ (h - постоянная Планка, ν - частота света), обладают импульсом, модуль которого определяется формулой



$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad (1)$$

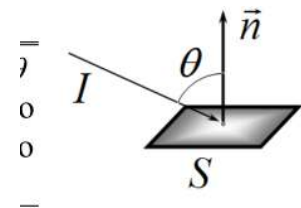
($c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость света в вакууме).

Направление вектора импульса фотона совпадает с направлением распространения света. Передача импульса света телам и обуславливает световое давление.

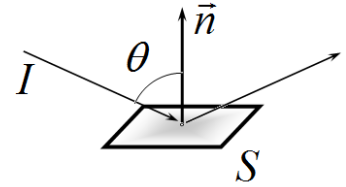
В данном задании используется понятие интенсивности света: энергия, переносимая светом в единицу времени через площадку единичной площади, ориентированную перпендикулярно направлению распространения света.

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta S}. \quad (2)$$

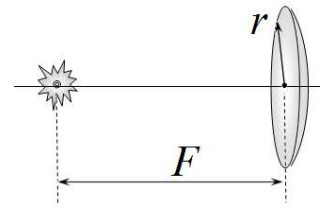
Часть 1. Продольная сила светового давления



1.1 Однородный световой поток интенсивности I падает под углом θ на плоскую абсолютно черную пластинку площади S и полностью поглощается пластинкой. Найдите, чему равен модуль силы светового давления на пластинку. Укажите направление этой силы.



1.2 Однородный световой поток интенсивности I падает под углом θ на плоскую зеркальную пластинку площади S и полностью отражается от нее. Найдите, чему равен модуль силы светового давления на пластинку. Укажите направление этой силы.



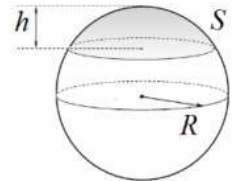
1.3 Точечный изотропный источник света, световая мощность которого равна W_0 , расположен в фокусе тонкой собирающей линзы. Фокусное расстояние линзы равно F , ее радиус равен R . Найдите силу светового давления на линзу f . Укажите направление этой силы. Отражением и поглощением света пренебречь.

Подсказка. Площадь поверхности шарового сегмента равна произведению длины окружности большого круга шара на высоту сегмента:

$$S = 2\pi Rh.$$

(3) *ио*

(3)



Часть 2. Поперечная сила светового давления

В данной части задания рассматривается несколько примеров, когда прозрачный предмет освещается неоднородным световым потоком, интенсивность которого изменяется в поперечном сечении пучка.

Световой поток распространяется вдоль оси X . Его интенсивность зависит от координаты z (ось Z перпендикулярна направлению распространения света оси X). Можно считать, что в пределах освещаемого предмета эта зависимость интенсивности описывается линейным законом

$$I(z) = I_0 + gz \quad (4)$$

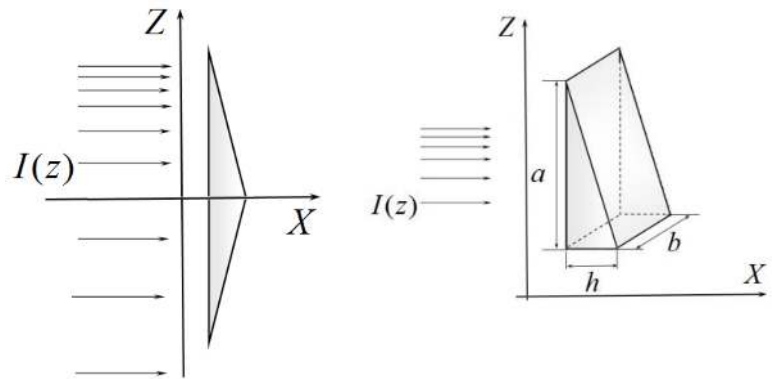
где $g = \frac{dI}{dz}$ - градиент интенсивности светового потока, считайте, что $g > 0$.

В таком световом потоке возможно возникновение силы светового давления, направленной перпендикулярно направлению распространения света, вдоль оси Z . Во всех пунктах этого задания Вы должны рассчитывать именно силу F_z , направленную перпендикулярно лазерному лучу. В реальных устройствах продольная сила светового давления F_x может быть компенсирована другими силами (например, силой реакции со стороны подложки), либо с помощью двух одинаковых световых лучей, распространяющихся навстречу друг другу.

Во всех вопросах данной задачи следует считать углы отклонения световых лучей малыми, так, что можно использовать приближенные значения тригонометрических функций:

$$\cos \alpha \approx 1, \quad \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \quad (5)$$

Кроме того, следует считать, что при описании прохождения света через прозрачные предметы применимо приближение геометрической оптики, т.е. явления дифракции и интерференции света можно не учитывать. Также можно пренебречь поглощением и отражением света.

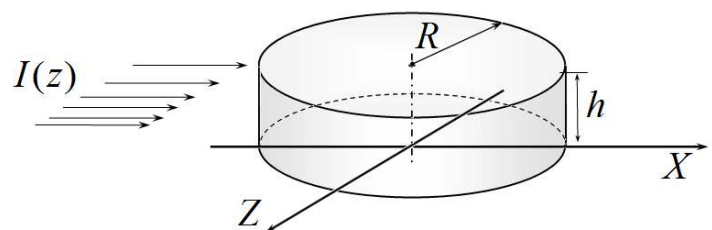


2.1 Симметричная бипризма, состоящая из двух одинаковых треугольных призм, освещается (как показано на рисунке) параллельным неоднородным пучком света, интенсивность которого изменяется по его поперечному сечению и зависит от координаты z по закону (4).

Бипризма находится в воздухе. Показатель преломления материала призмы равен n . Геометрические размеры призмы a, b, h показаны на рисунке. Угол при вершине призмы θ можно считать малым.

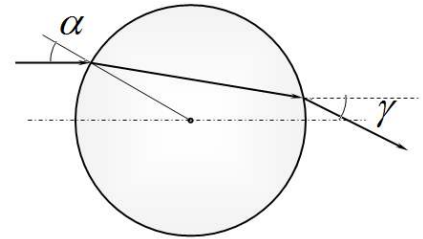
2.1.1 Найдите проекцию силы светового давления F_z , действующей на бипризму, на ось Z (направленную перпендикулярно падающему свету). Ответ выразите через величины I_0, g, c, n и геометрические размеры призмы a, b, h .

2.2 Прозрачный диск радиуса R и



толщины h изготовлен из материала с показателем преломления n . Боковая поверхность освещается параллельным неоднородным пучком света, интенсивность которого изменяется по его поперечному сечению и зависит от координаты z по закону (4).

2.2.1 Рассмотрим луч света, падающий на боковую поверхность диска так, что угол между этим лучом и нормалью в точке падения равен α . Рассчитайте, на какой угол γ отклонится луч после прохождения диска.

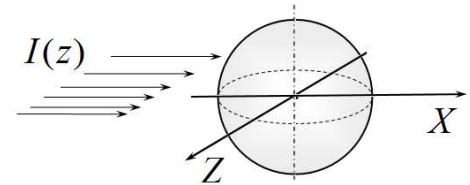


2.2.2 Найдите проекцию силы светового давления, действующей на диск, F_z на ось Z (направленную перпендикулярно падающему свету). Ответ выразите через величины I_0, g, c, n и геометрические размеры диска R, h .

2.3 Прозрачный шарик радиуса R изготовлен из материала с показателем преломления n . Шарик освещается параллельным неоднородным пучком света, интенсивность которого изменяется по его поперечному сечению и зависит от координаты z по закону (4).

2.3.1 Покажите, что проекция силы светового давления, действующей на шарик, F_z на ось Z (направленную перпендикулярно падающему свету) рассчитывается по формуле

$$F_z = \beta \frac{n-1}{n} V \frac{1}{c} \frac{\Delta I}{\Delta z}, \quad (6)$$

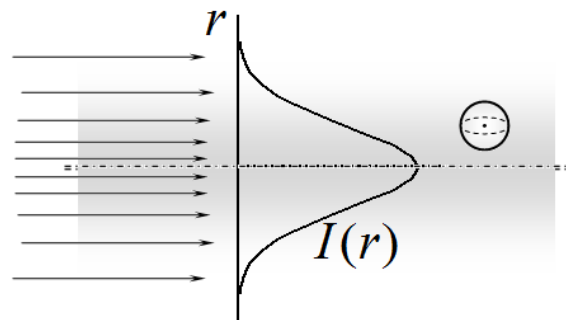


где β - безразмерный коэффициент, V - объем шарика. 2.3.2 Рассчитайте численное значение коэффициента β .

Если Вам не удалось рассчитать значение этого коэффициента, то в последней части задачи используйте значение $\beta = 0,50$.

Часть 3. Перемещение с помощью оптического пинцета.

Стеклянный шарик радиуса $R = 1,31$ мкм с показателем преломления $n = 1,50$ находится в воде, показатель преломления которой равен $n_0 = 1,33$. Шарик передвигают с помощью осесимметричного лазерного пучка, мощность которого равна $P = 19$ мВт в направлении, перпендикулярном направлению распространения света. Распределение интенсивности пучка по его поперечному сечению (зависимость интенсивности от расстояния до оси пучка r) описывается формулой



$$I(r) = \frac{P}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right), \quad (7)$$

где $a = 3,20$ мкм.

При движении шарика в воде со скоростью $\vec{v}$ на него действует сила вязкого трения, которая рассчитывается по формуле Стокса

$$\vec{F} = -6\pi\eta R\vec{v}, \quad (8)$$

где $\eta = 8,90 \cdot 10^{-4}$ Па·с коэффициент вязкости воды.

3.1 Найдите, на каком расстоянии от оси пучка должен находиться шарик, чтобы он мог перемещаться с максимальной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка.

3.2 Рассчитайте, с какой максимальной скоростью можно передвигать шарик с помощью лазерного луча в направлении, перпендикулярном пучку.

Численные значения параметров данной части взяты из работы А. Эшкина.