



117296 Москва, Ленинский проспект, 64-А, «Квант»
тел. : [095] 930-56-48
e-mail: bquantum@sovam.com (с пометкой «Квант»).

№ 3 - 2000 г.

С. Обухов

Лазерная указка

© «Квант»

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>
<http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>
<http://vivovoco.rsl.ru>

Лазерная указка

Ñ. Î Á Ó Õ Î Â

ЭТА ИГРУШКА РАЗМЕРОМ С авторучку или даже меньше, сделанная, например, в форме брелка для ключей, вызывает необъяснимое восхищение. Я знаю взрослых уважаемых людей, которые, увидев эту игрушку в первый раз, немедленно купили ее и теперь не могут с ней расстаться.

Фонарик

Все мы знаем, что фонарик может осветить предметы, находящиеся в 5—20 метрах от нас. Результат во многом зависит от того, насколько

хорошо фонарик сфокусирован. В идеально сфокусированном фонарике светящаяся вольфрамовая нить электрической лампочки должна находиться в фокусе параболического отражателя. Чтобы этого добиться, мы подкручиваем отражатель, двигая его туда-сюда, или, сняв отражатель, слегка подкручиваем лампочку в гнезде и, надев отражатель, проверяем, стало ли лучше. Размер нити электрической лампочки — несколько миллиметров, и если только одна какая-то точка ее находится в фокусе, все остальное будет не в фокусе,

поэтому луч фонарика всегда расходится. Угол расходимости луча фонарика, измеренный в радианах, примерно равен отношению размера нити накаливания к диаметру отражателя (несколько сантиметров): $\alpha \approx 4 \text{ мм} / 4 \text{ см} = 0,1 \text{ рад}$, что составляет примерно 5 угловых градусов.

В обычной жизни мы редко сталкиваемся с необходимостью определять угол «на глаз», за исключением быть может прямого угла, угла в 45° и т.п. Как представить себе угол в 5° ? Астрономы-любители пользуются для этого прибором, который всегда с собой, — соб-

ственной рукой. Выдвинем прямую руку перед собой и, раздвинув указательный и средний пальцы, изобразим ими знак победы — латинскую букву V. Теперь, прищурившись, посмотрим одним глазом на эту букву V. Угол, под которым вы увидите раздвинутые пальцы вытянутой руки, и будет углом примерно в 5° , или в $1/10$ рад.

Я часто пользуюсь этим способом, измеряя угол между Солнцем и горизонтом, чтобы определить время, оставшееся до захода Солнца. Кстати, угловой размер Солнца — примерно $0,5^\circ$ (или $30'$), такой же, как и угловой размер Луны. Угол, под которым вы увидите ноготь указательного пальца вытянутой руки, будет примерно в три раза больше — $1,5^\circ$.

Можно найти фонарик с большим отражателем — сантиметров 10–12. Угол расхождения луча у такого фонарика будет, соответственно, примерно в 3 раза меньше. На Западе распространены фонарики с маленькими лампочками большой мощности. Они позволяют еще лучше сфокусировать пучок.

А на каком расстоянии можно увидеть луч фонарика? Обычный фонарик потребляет мощность примерно 1 Вт. Только $1/20$ часть этой мощности излучается как видимый свет — остальное теряется на нагрев и тепловое излучение. Мощность W , излучаемая фонариком, сконцентрирована внутри телесного угла $\Omega = \pi\alpha^2$. На расстоянии R от фонарика мощность излучения, приходящаяся на единицу площади поверхности, равна $W/(\Omega R^2)$. Мощность w света, попадающего в глаз с расстояния R , равна $WS_{\text{гл}}/(\Omega R^2)$, где $S_{\text{гл}}$ — площадь зрачка глаза. Зрачок глаза человека в темноте имеет диаметр около 7 мм, т.е. площадь зрачка $S_{\text{гл}} \approx 0,5 \text{ см}^2$. Если мощность w превышает некоторый порог w_{min} , мы видим свет. Минимальная пороговая мощность w_{min} глаза человека может быть очень мала — около 10^{-18} Вт, что соответствует нескольким фотонам в секунду. Такая чувствительность возможна только после длительной адаптации глаза к темноте — если бы можно было поставить эксперимент в полной темноте и при отсутствии рассеяния света в атмосфере, мы смогли бы увидеть свет фонарика на расстоянии в десять тысяч километров. Реальная пороговая мощность глаза на много порядков выше, в

основном это связано с присутствием ярких посторонних объектов, находящихся в поле зрения глаза, — уличных фонарей, ночных огней, звезд, Луны и т.д. В дальнейшем для обсуждения экспериментов, проводимых на открытом воздухе в безлунную ночь, мы будем использовать значение $w_{\text{min}} = 10^{-13}$ Вт. Подставляя числовые значения в формулу

$$R = \sqrt{\frac{WS_{\text{гл}}}{w_{\text{min}}\Omega}}, \quad (1)$$

получим $R = 27$ км.

А как далеко можно осветить что-нибудь с помощью фонарика? Оказывается, это расстояние не превышает нескольких десятков метров. Когда мы освещаем предмет (например, кошку), мы хотим увидеть свет, отраженный от этого предмета. Полная мощность света, который попадает на предмет, находящийся на расстоянии R , описывается формулой $WS/(\Omega R^2)$, где S — это площадь поверхности предмета (для кошки $S_{\text{к}} \approx 200 \text{ см}^2$). Мы будем считать, что кошка белая (не серая и не черная), т.е. большая часть света рассеивается, а не поглощается. Если этот свет рассеивается во все стороны, то нам в глаз попадает только незначительная часть рассеянного света. Эта доля равна отношению площади поверхности глаза к $1/4$ площади сферы радиусом R , т.е. отношению $S_{\text{гл}}/(\pi R^2)$. (Множитель $1/4$ получается для случая, если рассеивающая поверхность перпендикулярна к направлению пучка и к наблюдателю. При его получении было учтено, что полный поток света от рассеивающей поверхности пропорционален телесному углу, под которым эта поверхность видна наблюдателю.) Мощность света, попадающего в глаз наблюдателю, равна $WS_{\text{к}}S_{\text{гл}}/(\pi\Omega R^4)$. Приравнивая эту величину к w_{min} , получим

$$R = \sqrt[4]{\frac{WS_{\text{к}}S_{\text{гл}}}{w_{\text{min}}\pi\Omega}} = 45 \text{ м}. \quad (2)$$

Получается, что кошка может увидеть луч фонарика за десятки километров, а мы можем осветить ее, только подойдя на 45 метров. (Похожая ситуация возникает с полицейскими радаром для измерения скорости автомобилей. Полицейский сидит в засаде и, используя радиоло-

катор, пытается получить сигнал, отраженный от машин на шоссе. Если у вас в машине есть прибор, который обнаруживает излучение полицейского радара, вы можете узнать о засаде гораздо раньше, чем попадете в зону действия радара.) Из формулы (2) видно, что если вы хотите увеличить вдвое радиус обнаружения кошки, вам придется увеличить мощность фонарика в $2^4 = 16$ раз. При этом кошка сможет заметить ваш более мощный фонарик с расстояния, в 4 раза большего, чем прежде.

Лазерная указка

Самая дешевая лазерная указка (ЛУ) может спроектировать «зайчик» на предметы, отстоящие от нас в темноте на сотни метров. На упаковке может быть указано, например, 200, 500, 800 или даже 1200 м. Причем мощность ЛУ ничтожна. В Америке разрешены ЛУ мощностью 5 мВт, в Европе — мощностью 1 мВт. Обычно указывается мощность, которую лазер потребляет. Мощность же, которую он излучает, составляет примерно 60% от входной мощности.

Фантастическая способность такого маломощного прибора «ставить точку» почти на любом доме на слабо освещенной улице вызывает искреннее изумление. Причина такой способности связана, конечно, с необычайно малой расходимостью лазерного пучка. Теоретически угол расходимости α определяется только диаметром начального пучка D и длиной волны λ :

$$\alpha = \lambda/D. \quad (3)$$

Для ЛУ красного цвета (длина волны 600–700 нм) можно пользоваться формулой

$$\alpha \text{ (в миллирадианах)} = 1/D \text{ (в миллиметрах)}. \quad (4)$$

Примечательно, что эта же формула определяет и теоретическое угловое разрешение человеческого глаза, только под D надо понимать диаметр зрачка глаза. Поскольку и диаметр лазерного пучка, и размер зрачка составляют несколько миллиметров и примерно равны, угол расходимости пучка примерно равен углу разрешения глаза. Практически лазерный пучок расходится несколько сильнее — примерно на 1 см каждые

10 м пути. На расстоянии 1 км пучок будет иметь размер 1 м. Тем не менее, для человеческого глаза на любом расстоянии «зайчик» выглядит как точечный объект, угловой размер которого примерно такой же, как угловой размер планеты Юпитер на ночном небе.

Теперь мы можем объяснить, почему формулу (2) нельзя применять для лазера. При выводе этой формулы мы предполагали, что размер пучка от фонарика больше размера предмета, который мы освещаем, и что только малая доля света, излучаемого фонариком, попадает на предмет. Если же мы освещаем удаленный предмет, угловой размер которого больше угла разрешения нашего глаза с помощью ЛУ, все излучение лазера попадает на предмет и рассеивается. Таким образом, множитель $S_k / (\Omega R^2)$ надо заменить на единицу, и мы получим

$$w = \frac{WS_{\text{гл}}}{\pi R^2}. \quad (5)$$

Эту формулу можно понять таким образом. Представим, что на конце лазерного луча «прикреплена» маленькая лампочка мощностью $W = 0,003$ Вт. На какой бы предмет мы ни направили луч ЛУ, лампочка, «прикрепленная» к концу луча, оказывается на этом предмете и светит в нашу сторону. Если мы видим свет этой лампочки, мы считаем, что видим отраженный луч ЛУ. Формула для предельного расстояния, на котором можно увидеть отраженный луч, будет такой же, как и формула для предельного расстояния, на котором можно увидеть лампочку, «прикрепленную» к концу луча:

$$R = \sqrt{\frac{WS_{\text{гл}}}{\pi w_{\text{min}}}}. \quad (6)$$

Подставляя численные значения, получим $R = 700$ м.

Эта формула отличается от формулы (2) тем, что для удвоения расстояния достаточно увеличить мощность в 4 раза, а не в 16.

Яркость луча

Как мы уже знаем, мощность свободных продаваемых лазеров жестко ограничена. Почему же некоторые из них кажутся более яркими, чем другие? Дело в том, что чувствительность глаза сильно зависит от длины

волны света, а она для имеющихся в продаже ЛУ может быть 680, 670, 650 или 633 нм. Луч ЛУ с длиной волны 650 нм кажется в 5–10 раз ярче, чем луч с длиной волны 670–680 нм, а луч с длиной волны 633 нм кажется еще в 2 раза ярче. Чувствительность глаза максимальна к зеленому свету с длиной волны 555 нм — лазеры с такой длиной волны были бы самыми яркими. И действительно, наиболее яркие ЛУ, появившиеся недавно в продаже, дают зеленый луч с длиной волны 532 нм и имеют яркость примерно в 8 раз больше, чем при 650 нм. Зависимость видимой яркости от длины волны можно учесть в оценках для расстояния, на котором виден луч лазера, считая, что чувствительность w_{min} меняется в зависимости от длины волны излучения. Рекламные утверждения, что такой-то лазер дает луч, видимый на расстоянии X сотен метров ($X = 2, 5, 8, 12 \dots$), являются, мягко говоря, условными, поскольку w_{min} сильно зависит также от яркости фонового света от звезд, Луны, уличных фонарей и т.п.

Очень многое зависит также от свойств отражающей поверхности. Мы предполагали, что облучаемая поверхность рассеивает отраженный свет во все стороны. Есть специальные краски, которые используются для покрытия дорожных знаков, одежды дорожных рабочих, пожарных машин и т.п. Поверхность, покрытая такой краской, отражает свет почти в том же направлении, откуда свет пришел (с углом между этими направлениями, не превышающим 3°). Яркость отраженного света в этом случае примерно в $\pi/(\pi\alpha^2) \approx 400$ раз больше, чем яркость света, отраженного от рассеивающей поверхности. При отражении от такой поверхности пучка мощностью 3 мВт мы увидим столько же света, как если бы на конце лазерного пучка находился хорошо сфокусированный фонарик с углом расхождения 3° , направленный на нас. К сожалению, на больших расстояниях диаметр пучка может стать больше, чем размер поверхности, покрытой отражающей краской. Если на расстоянии 1 км размер пучка 1 м, а размер отражающей мишени, дорожного знака например, всего 0,5 м, то только одна четверть всего светового пучка отразится в нашем направле-

нии. Для оценки расстояния, на котором будет виден отраженный свет, можно воспользоваться формулой, похожей на формулу для фонарика:

$$R = \sqrt[4]{\frac{WS_k S_{\text{гл}}}{w_{\text{min}} \pi \Omega \Omega'}}. \quad (7)$$

В этой формуле для телесного угла $\Omega = \pi\alpha^2$ надо взять $\alpha = d/\lambda = 0,0005$, в знаменатель формулы ввести дополнительный множитель $\Omega' = 1/400$, описывающий фокусировку отраженного пучка, а вместо S_k подставить площадь поверхности дорожного знака, равную приблизительно $0,2 \text{ м}^2$. Получим $R \approx 3,5$ км.

ЛУ и прибор ночного видения

Замечательный результат получается, если наблюдать за отраженным светом с помощью прибора ночного видения. Для этого лучше всего прикрепить ЛУ эластичной резинкой к корпусу прибора так, чтобы их оптические оси были примерно параллельны.

Прибор ночного видения является комбинацией из бинокля и катодной трубки, усиливающей интенсивность попадающего в нее света.

Бинокль сам по себе может существенно увеличить дальность обзора в условиях слабой освещенности: весь свет, собираемый входной апертурой бинокля, попадает нам в глаз.

Например, если мы пользуемся биноклем с диаметром входной линзы 50 мм, а диаметр зрачка глаза 7 мм, то собирающая поверхность увеличивается в $(50/7)^2 \approx 50$ раз. Для ночных наблюдений лучше всего подходят бинокли с большими входными линзами, но увеличение бинокля лучше выбрать минимальным. Например, бинокль с семикратным приближением 50×7 лучше, чем двенадцатикратный бинокль 50×12 . Световые потоки, улавливаемые обоими биноклями, одинаковы, но в двенадцатикратном бинокле дрожание изображения более сильное, чем в семикратном. (Первая цифра в характеристике бинокля всегда указывает размер входной апертуры бинокля, вторая цифра — его кратность.) Размер выходной апертуры бинокля можно определить, если разделить входной диаметр бинокля на его кратность. Так, для бинокля с семикратным приближением 50×7 размер выходной апертуры равен $50 \text{ мм} / 7 = 7,1 \text{ мм}$. Это примерно равно диаметру зрачка человека в темноте. Семикратный бинокль 35×7 имеет диаметр выходной апертуры $35 \text{ мм} / 7 = 5 \text{ мм}$ и дает, соот-

ветственно, меньше света. Днем разница между этими двумя биноклями незначительна, потому что размер зрачка глаза днем всего 2 — 3 мм, что меньше апертуры обоих биноклей.

Если невооруженным глазом мы видим ночью какой-то объект на максимальном расстоянии Z , то с помощью бинокля 50×7 можно наблюдать объекты, удаленные на расстояние $7Z$. Так например, если бы все звезды были одинаковой яркости и невооруженным глазом были бы видны все звезды в радиусе Z световых лет, то с помощью бинокля 50×7 мы смогли бы увидеть звезды в радиусе $7Z$. Объем Вселенной, доступный для наблюдения, при этом увеличился бы в $7^3 = 343$ раз. И во столько же раз увеличилось бы число наблюдаемых звезд! В действительности звезды распределены во Вселенной неравномерно и имеют разную яркость, но предыдущий вывод об увеличении числа наблюдаемых объектов в триста с лишним раз при использовании бинокля остается в силе.

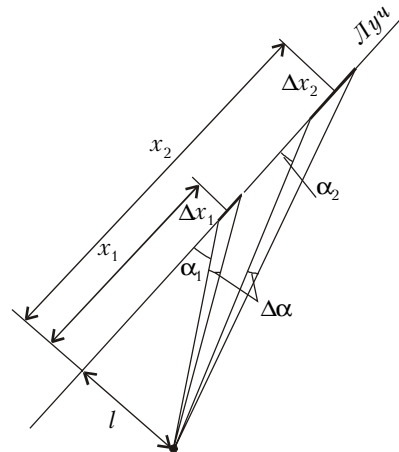
Катодная трубка прибора ночного видения увеличивает собранный световой поток в несколько тысяч или даже десятков тысяч раз. Максимум чувствительности у катодной трубки находится в области красного и ближнего инфракрасного спектра, что очень удобно для наблюдения красного света ЛУ. Если пользоваться прибором ночного видения, то все ЛУ от самых дешевых до самых дорогих, дающие разные оттенки красного света, практически неразличимы по яркости. Наблюдатель, вооруженный прибором ночного видения, способен заметить свет от точечного источника, если всего несколько фотонов в секунду попадут на входную поверхность пробора. Полная адаптация глаза к темноте при этом не обязательна. Реальный порог чувствительности может быть в десятки раз ниже за счет того, что собирающая поверхность прибора больше собирающей поверхности глаза человека. Используя прибор ночного видения, мне удавалось наблюдать свет ЛУ, отраженный от низколежащих облаков.

Можно ли точно нацелить луч ЛУ на очень далекий предмет, например на спутник на орбите или на корабль в ночном море, настолько далекий, что не видно отраженного света? Оказывается, да. И сделать это можно с помощью прибора ночного видения — чувствительность прибора такова, что становится виден сам луч лазера в воздухе. Это и не очень

удивительно. Мы все наблюдали лучи мощных прожекторов в ночном небе. Иногда в условиях тумана можно видеть и луч фонарика. То, что мы видим луч, означает, что часть энергии луча рассеивается на флуктуациях плотности воздуха или на микроскопических частицах, плавающих в воздухе.

Протяженность участка пути, на котором луч прожектора или фонарика виден со стороны, всегда ограничена — мы видим луч только там, где он достаточно концентрированный, а на большом расстоянии интенсивность луча падает из-за его расходимости и луч как бы теряется. Для лазерного луча это не так. Из-за того что угловая расходимость луча примерно равна угловому разрешению глаза, на больших расстояниях луч виден как очень тонкая линия. И эта линия видна на любом расстоянии от наблюдателя! Даже если мы не видим свет, отраженный от далекого корабля, мы увидим луч нашей ЛУ, упирающийся в корабль или в спутник.

Для того чтобы понять, почему яркость траектории лазерного луча не зависит от расстояния, посмотрим на рисунок. На нем показаны два участка пути луча Δx_1 и Δx_2 , длины которых подобраны так, чтобы они были видны наблюдателю под одним и тем же углом $\Delta\alpha$. Расстояния, на которых находятся эти участки, равны примерно $x_1 = l/\alpha_1$ и $x_2 = l/\alpha_2$, откуда имеем $\Delta x_1 = l\Delta\alpha/\alpha_1^2$ и $\Delta x_2 = l\Delta\alpha/\alpha_2^2$, или $\Delta x_1 = \Delta\alpha x_1^2/l$ и $\Delta x_2 = \Delta\alpha x_2^2/l$. Будем считать, что мощность рассеиваемого света на единицу длины пробега луча не зависит от расстояния x . Тогда мощности $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ света, рассеянного на



участках 1 и 2, пропорциональны их протяженностям, или квадратам расстояний до них: $\Delta\omega_1 \sim \Delta\alpha x_1^2$ и $\Delta\omega_2 \sim \Delta\alpha x_2^2$. Но мощности света, приходящего к наблюдателю от участков 1 и 2, обратно пропорциональны квадратам расстояний до них. Таким образом, мощности света, приходящего к наблюдателю от участков 1 и 2 траектории луча, имеющих с точки зрения наблюдателя одинаковую угловую протяженность, не зависят от расстояния до этих участков. Это означает, что траектория луча имеет равномерную яркость!

На расстояниях порядка десяти километров приближения, с помощью которых мы пришли к этим выводам, неизбежно нарушаются. Это связано с тем, что на таком расстоянии интенсивность луча уменьшается из-за рассеяния и он становится менее ярким. Кроме того, если луч света направлен вертикально, ослабление яркости луча усугубляется и уменьшением плотности воздуха, а вместе с ней и интенсивности рассеивания. Если считать, что длина пути, на которой луч виден наблюдателю, равна 10 км, можно оценить, что для наблюдателя, находящегося в стороне от ЛУ на 1 м, угловая погрешность лазерной указки составляет 10^{-4} рад, что меньше угловой расходимости лазерного луча.

Можно ли со спутника увидеть свет от ЛУ, направленный с Земли? По-видимому, можно. Оценка с использованием формулы (7) дает дальность видимости около двух тысяч километров. Околоземные спутники летают гораздо ниже, на высотах порядка сотен километров. Рассеяние луча на флуктуациях плотности воздуха существенно только в нижних слоях атмосферы и не может повлиять на эту оценку.

Зададимся вопросом: если мы видим спутник в ночном небе, значит ли это, что и со спутника можно увидеть свет нашего ЛУ? Чтобы ответить на этот вопрос, сравним мощности света, получаемого наблюдателем с Земли и наблюдателем со спутника. Если мы видим спутник, это значит, что солнечный свет, отраженный спутником и рассеянный во все стороны, попадает нам в глаз в достаточном количестве. Пусть размер спутника 3 м. Интенсивность солнечного света у поверхности спутника 1 — 2 мВт/мм². Наша мало-

мощная ЛУ производит столько же света, сколько отражается с 1 мм^2 поверхности спутника, т.е. $(1/300)^2 \approx 10^{-5}$ долю его излучения. Но это излучение сконцентрировано в телесном угле, в 10^6 раз меньше, чем излучение спутника. Поэтому, если мы смогли заметить спутник, то и со спутника можно заметить луч ЛУ.

«Не смотри в лазер оставшимся глазом»

Эту надпись можно увидеть практически в любой лаборатории, в которой есть лазеры. Все знают, что лазерное излучение может нанести необратимые повреждения глазу. Для того чтобы понять, насколько может быть опасен для здоровья луч ЛУ, оценим сначала его интенсивность, т.е. мощность, приходящуюся на квадратный миллиметр поверхности, освещенной лазерным

лучом. Считая диаметр пучка равным 3 мм, а мощность 3 мВт, для интенсивности получим $I_{\text{ЛУ}} = 0,3 \text{ мВт/мм}^2$. Для сравнения вспомним, что интенсивность солнечного излучения составляет примерно 1 кВт на квадратный метр поверхности Земли, или $I_{\text{С}} = 1 \text{ мВт/мм}^2$. Таким образом, наблюдать за зайчиком лазерной указки не опаснее, чем наблюдать за солнечным зайчиком. По-видимому, это соображение и послужило основой для установления верхнего предела мощности бытовых лазеров. Напомним, что лазерная указка существует для того, чтобы направлять ее как обычную деревянную указку на предметы. Ни при каких обстоятельствах нельзя направлять ее в глаза. Точно так же, как обычной деревянной указкой можно поранить глаз при неосторожном обращении, можно серьезно повредить глаз и лазерной указкой. Дело в том, что хрусталик нашего глаза — это оптическая линза с переменным фокусным расстоянием, которая, так же, как линза фотоаппарата, создает изображение на сетчатке глаза. Если пучок света, приходящий в глаз, является строго параллельным, а линза сфокусирована «на бесконечность», то весь свет пучка фокусируется линзой хрусталика на какое-то одно место сетчатки, размер которого около одного микрометра (порядка длины волны света). Если хрусталик в этот момент сфокусирован на предмете, находящемся на расстоянии 1 м, то точной фокусировки пучка на сетчатке не произойдет и размер размытого пятна на сетчатке будет около 30 микрон. Посчитаем интенсивность света, попадающего на сетчатку глаза. В случае точной фокусировки $I_{\text{F}} = 3 \text{ кВт/мм}^2$, в случае несфокусированного, размытого пятна $I = 3 \text{ Вт/мм}^2$. Для сравнения можно рассчитать, какой будет интенсивность света на сетчатке, если глаз смотрит прямо на Солнце. Угловой размер Солнца примерно $1/100$ рад, фокусное расстояние хрусталика около 1 мм, поэтому размер изображения Солнца на сетчатке примерно 0,1 мм. Считая, что весь свет от Солнца, попадающий в зрачок глаза (размер 2 мм), концентрируется в круге диаметром 0,1 мм, получим интенсивность света на сетчатке глаза $I_{\text{С}} =$

$= 0,4 \text{ Вт/мм}^2$. Эти цифры убедительно показывают, что смотреть прямо в лазер, даже слабomощный, не стоит — интенсивность света на сетчатке может быть в 10^4 раз выше, чем максимальная интенсивность, которая возможна в естественных условиях (при прямом наблюдении Солнца). С другой стороны, если луч случайно «мазнул» по глазам, которые сфокусированы на какой-то другой предмет, то возможно кратковременное ослепление без необратимого повреждения глаза.

Искать границу между этими предельными случаями не стоит. Лучше всего взять за правило ни в коем случае не направлять ЛУ в сторону людей. В течение предыдущего десятилетия, когда ЛУ были очень дорогие, они в основном использовались как целеуказатели для огнестрельного оружия. Поэтому человек, увидевший, что на него направлен луч лазера, может подумать, что на него направлено оружие, и повести себя соответственно — например, направить на вас ствол собственного оружия (автор этой статьи живет в штате Флорида, где многие жители имеют разрешение на скрытое ношение оружия). В последнее время законодательства многих американских штатов рассматривают злоупотребление ЛУ как хулиганство. Так, в Калифорнии попытка направить ЛУ на людей «в угрожающей манере» наказывается тюремным сроком до 30 дней.

Вопрос для обдумывания

Что ярче: 5-милливаттная ЛУ, Солнце или 1000-ваттная лампочка? По определению, яркость — это световой поток, излучаемый в единичный телесный угол с единицы поверхности излучающего тела. Возьмите листок бумаги и направьте на него поочередно луч ЛУ, луч Солнца или свет мощной лампы с рефлектором с расстояния 10 см, рассчитайте мощность, приходящуюся на единицу площади освещенной поверхности, и сравните полученные величины. Теперь представьте себе, что вместо листа бумаги находится маленькая фокусирующая линза. Оцените отношение освещенностей в фокусе линзы для всех трех случаев и покажите, что вы получили отношение яркостей трех источников. Так почему же яркость лазера в десятки тысяч раз больше яркости Солнца?