

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  $w_{\text{min}}$  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  $w_{\text{min}}$  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  $3^\circ$ ). 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  $3^\circ$ , 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  $0,2$  м<sup>2</sup>. 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  $50 \times 7$  лучше, чем двенадцатикратный бинокль  $50 \times 12$ . 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  $50 \times 7$  размер выходной апертуры равен  $50 \text{ мм} / 7 = 7,1$  мм. Это примерно равно диаметру зрачка человека в темноте. Семикратный бинокль  $35 \times 7$  имеет диаметр выходной апертуры  $35 \text{ мм} / 7 = 5$  мм и дает, соот-