

Тепловизор (физика, простые)

1. В атомах теллура валентными являются 5p и 6s-орбитали, а в атомах селена – 4p и 5s-орбитали. Следовательно, в атомах теллура валентные орбитали лежат выше по энергии, чем в атомах селена. Это приводит к тому, что когда дырка в кристалле CdSe подходит к кристаллу CdTe, электрон из кристалла CdTe «сваливается» в неё и рекомбинирует (это происходит более интенсивно, чем при движении электронов и дырок в обратном направлении). В кристалле CdTe образуется дырка, которая дрейфует к токосъёмному электроду. Таким образом, *в кристалле CdSe происходит транспорт электронов, а в CdTe – транспорт дырок (по направлению к съёмным электродам)*. То есть, **тепловые фотоны попадают на точки CdTe и взаимодействуют с электронами (вызывают электронные переходы на более высокие уровни, как будет показано ниже), и за счет этого плотность тока через гетеропереход между CdTe и CdSe увеличивается. Свет излучается при рекомбинации электронов и дырок вблизи гетероперехода.** Для увеличения эффективности преобразования возможен вариант создания большого числа слоёв точек CdTe.

Оценим требуемые для работы размеры квантовых точек. Сначала сделаем оценки по энергии. Тепловые фотоны, излучаемые нагретыми телами на Земле, имеют частоты порядка 10^{12} - 10^{13} Гц (это можно грубо оценить, например, из закона Вина, или узнать из шкалы электромагнитных волн). Вообще говоря, инфракрасный диапазон достаточно широкий, но мы возьмём для оценки энергию фотонов порядка $h\nu \sim 6 \cdot 10^{-21}$ Дж $\approx 0,04$ эВ. Эта энергия много меньше ширины запрещённой зоны в обоих материалах. Следовательно, взаимодействие теплового излучения с веществом заключается в возбуждении чисто

электронных уровней. Разность уровней энергии в квантовой точке равна $\Delta E = \frac{\hbar^2}{2md^2}$, где d – характерный размер (диаметр) точек, m – эффективная масса электрона. Отсюда выразим

$$d: d = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m\Delta E}}. \text{ Расчёт даёт } d_{\text{CdTe}} \sim 2,5 \text{ нм.}$$

Энергия фотонов, испускаемых при рекомбинации электронов и дырок в CdSe, равна

$$h\nu_{\text{изл}} = E_g + \frac{\hbar^2}{2m_1 d'^2} + \frac{\hbar^2}{2m_2 d'^2} = E_g + \frac{\hbar^2}{2d'^2} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}, \text{ где } d' \text{ – диаметр точек CdSe, а } m_1 \text{ и } m_2 \text{ –}$$

эффективные массы электрона и дырки соответственно. Предыдущая оценка показывает, что второй член в этой формуле много меньше первого (если диаметры первых и вторых точек

примерно одинаковы). Оценим в этом случае длину волны излучения: $\lambda_{\text{изл}} \approx \frac{hc}{E_g} \approx 690 \text{ нм.}$

Это попадает в область красного света (близко к инфракрасной границе). Человеческий глаз более чувствителен к зелёному свету ($\lambda_3 = 540 \text{ нм}$). Добиться излучения зелёного света можно, уменьшив размеры точек CdSe. Нужный размер точек можно найти из формулы,

приведённой выше, выражая d':
$$d' = \sqrt{\frac{\hbar^2(m_1 + m_2)}{2m_1 m_2 \left(\frac{hc}{\lambda_3} - E_g\right)}}. \text{ Расчёт даёт } d_{\text{CdSe}} \sim 1 \text{ нм.}$$

Для более точного расчёта нужно сравнить ширину запрещённой зоны в объёмном веществе и в квантовых точках соответствующих размеров.

Источник тока нужен для стабилизации тока в цепи (цепь обязательно должна быть замкнута), компенсации тепловых потерь в цепи, а также усиления эффекта преобразования фотонов. Если источника не будет, то вблизи гетероперехода в CdSe быстро образуется избыточная плотность электронов, а в CdTe – плотность дырок, и транспорт электронов через переход прекратится.

2. Порог чувствительности глаза человека по интенсивности (при которой можно различать предметы и сравнивать яркость) составляет порядка $I_0 = 10^{-4}$ Вт/м².

Интенсивность излучения (мощность излучения с единицы площади поверхности) нагретых тел оценим по закону Стефана-Больцмана:

$I = \sigma T^4$, где T – температура в кельвинах, а коэффициент пропорциональности равен

$\sigma = 4,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4}$. Для предметов при $T = 300$ К имеем: $I_1 \approx 380$ Вт/м². Для тела

человека (абсолютно чёрного, но для оценки годится) имеем $I_1 \approx 430$ Вт/м².

Оценим расстояние, с которого можно увидеть круглый экран площадью $S_0 = 1$ м² при температуре 300 К, если окружающие тела нагреты до меньшей температуры. Если это расстояние много больше 1 м, то интенсивность обратно пропорциональна квадрату

расстояния: $I \approx I_1 \frac{S_0}{4\pi R^2}$. Максимальное расстояние найдём из условия $I_0 \approx I_1 \frac{S_0}{8\pi R^2}$, где мы

учли, что КПД тепловизора равен 0,5. Имеем: $R \approx \sqrt{\frac{I_1 S_0}{I_0 8\pi}}$. Расчёт даёт $R \sim 390$ м.

Оценим толщину стены из железа, бетона и кирпича, через которую можно увидеть человека. Показатель поглощения (коэффициент линейного поглощения) инфракрасного излучения для железа имеет порядок $\alpha_{\text{ж}} \sim 10^7$ м⁻¹, а для кирпича и бетона $\alpha_{\text{кб}} \sim 10^2$ м⁻¹ (для кирпича и бетона эта оценка была сделана грубо в предположении, что они состоят в основном из кварца и Al₂O₃; структура вещества не учитывалась). Показатель поглощения – это коэффициент в экспоненте в законе линейного поглощения плоского потока излучения, распространяющегося в направлении оси x :

$I(x) = I_2 e^{-\alpha x}$, где I_2 – интенсивность на входе в среду (будем считать, что человек стоит почти рядом со стеной, сквозь которую его требуется увидеть). Максимальную толщину

стены можно оценить из условия $I_0 = 0,5 I_2 e^{-\alpha x}$, откуда $x = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{I_2}{2I_0}$. Расчёт даёт: для

кирпича и бетона $x_{\text{кб}} \sim 0,15$ м = 15 см, а для железа $x_{\text{ж}} \sim 15 \cdot 10^{-7}$ м = 1,5 мкм.

Видим, что сквозь стену из кирпича человека увидеть в принципе можно, а железо является более серьёзным препятствием.

Угловую разрешающую способность оценим по критерию Рэлея, который имеет вид:

$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$, где θ – минимальное угловое разрешение, λ – длина волны, D – диаметр

объектива. Для инфракрасного излучения с $\lambda \sim 0,1$ мм имеем: $\theta \sim 0,002$ рад = 0,12°.

Примечание: для реальной работы тепловизора нужно учесть ещё ряд факторов, не рассмотренных в задаче (например, схему вычитания шумов или охлаждение, создаваемых самим прибором и человеком-наблюдателем, цифровую обработку сигналов, которая обычно применяется). Реальный тепловизор является дорогим прибором. Его основные элементы – матрица и объектив составляют около 90% общей стоимости. Матрицы весьма сложны в производстве, но со временем, по заверениям экспертов, их цена может снизиться. С объективами ситуация сложнее: их нельзя сделать из обычного стекла, потому что этот материал не пропускает ИК-излучение. По этой причине для создания объективов применяются редкие и дорогие материалы (например, германий). В наши дни активно ведутся поиски более дешёвых материалов. Высокая чувствительность тепловизоров реализуется благодаря наличию высокочувствительных полупроводниковых приемников излучения из антимонида индия InSb, ртуть-кадмий-теллура Hg-Cd-Te и др. В ручной тепловизионный ночной визир человека можно увидеть в полной темноте на расстоянии 300 м, что совпадает с оценкой, сделанной в данной задаче.