

Глава 18. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

18.1. Фотоны

18.1.1. Найдите энергию фотона света: а) красных лучей с частотой $\nu_1 = 4,17 \cdot 10^{15}$ Гц; б) рентгеновских лучей с частотой $\nu_2 = 10^{17}$ Гц; в) γ -лучей с частотой $\nu_3 = 2,4 \cdot 10^{21}$ Гц.

18.1.2. Определите частоту фотона, энергия которого $E_\phi = 3,2 \cdot 10^{19}$ Дж.

18.1.3. Во сколько раз энергия фотона красных лучей ($\lambda_k = 0,76$ мкм) меньше энергии фотона фиолетовых лучей ($\lambda_\phi = 0,40$ мкм)?

• **18.1.4.** Определите массу, импульс и энергию фотона с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.5. Протон движется со скоростью $v = 10^5$ м/с. Определите длину волны фотона, энергия которого равна энергии данного протона.

• **18.1.6.** С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 520$ нм?

18.1.7. Определите длину волны света, кванты которого имеют такую же энергию, которую приобретает электрон, проходя ускоряющую разность потенциалов $\Delta\phi = 3$ В.

18.1.8. Энергия фотона равна кинетической энергии электрона, имевшего начальную скорость $v_0 = 10^5$ м/с и ускоренного разностью потенциалов $\Delta\phi = 8$ В. Определите длину волны фотона.

18.1.9. Во сколько раз энергия фотона с длиной волны $\lambda = 4 \cdot 10^7$ м больше средней энергии атома одноатомного газа при температуре $T = 300$ К?

18.1.10. При какой температуре средняя кинетическая энергия молекулы идеального одноатомного газа равна энергии фотона, соответствующего излучению с длиной волны $\lambda = 800$ нм?

18.1.11. Найдите частоту фотона, импульс которого равен импульсу молекулы водорода при температуре $t = 127$ °С. Скорость молекулы считать равной среднеквадратичной скорости.

18.1.12. Найдите абсолютный показатель преломления среды, в которой свет с энергией фотона $E_\phi = 3,2$ эВ имеет длину волны $\lambda = 2,76 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.13. Поток фотонов падает из вакуума на оптически прозрачное вещество с показателем преломления $n = 1,8$ для данной длины волны. Определите импульс падающего фотона, если его длина волны в веществе $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ м.

• **18.1.14.** Монохроматический пучок фотонов переносит через площадку $S = 2$ см² за время $t = 0,5$ мин импульс $p = 3 \cdot 10^{-9}$ кг · м/с. Найдите для этого пучка энергию E , падающую на единицу площади за единицу времени.

18.1.15. Монохроматический источник излучает свет с длиной волны $\lambda = 331$ нм. Сколько фотонов содержится в порции энергии $E = 6 \cdot 10^{-9}$ Дж?

18.1.16. Свет распространяется в воде. Какому числу фотонов с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм соответствует энергия $E = 1$ Дж?

18.1.17. Определите мощность источника света, если за время $t = 1$ мин он испустил $N = 2 \cdot 10^{21}$ фотонов с длиной волны $\lambda = 500$ нм.

18.1.18. Источник мощностью $P = 100$ Вт испускает $n = 5 \cdot 10^{20}$ фотонов за одну секунду. Найдите среднюю длину волны излучения.

18.1.19. Рубиновый лазер непрерывного действия дает монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 694$ нм. Определите концентрацию фотонов в пучке, если мощность лазера $P = 2$ Вт, а площадь сечения пучка $S = 0,1$ мм².

18.1.20. Сколько фотонов излучает тело за одну минуту, если мощность монохроматического излучения $P = 10^{-12}$ Вт? Длина волны $\lambda = 500$ нм.

18.1.21. Чувствительность сетчатки глаза к красному свету с длиной волны $\lambda = 500$ нм составляет $P = 20,8 \cdot 10^{-18}$ Вт. Сколько фотонов ежесекундно должно падать на сетчатку глаза, чтобы свет был воспринят?

18.1.22. Монохроматический излучатель волн мощностью $P = 2 \cdot 10^{-10}$ Вт помещен в воду. Найдите количество квантов, излучаемых им в течение времени $t = 2$ мин, если им соответствует длина волны в воде $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.23. Источник мощностью $P = 100$ Вт испускает свет с длиной волны $\lambda = 579,1$ нм. Какое количество фотонов испускается в единицу времени, если $\eta = 50\%$ мощности источника идет на излучение?

18.1.24. Рентгеновская трубка, работающая при напряжении $U = 50$ кВ и потребляющая ток $I = 1$ мА, излучает в секунду $n = 2 \cdot 10^{13}$ фотонов со средней длиной волны $\lambda = 100$ нм. Определите коэффициент полезного действия трубки.

• **18.1.25.** Ртутная дуга имеет мощность $P = 125$ Вт. Какое число фотонов испускается в единицу времени в излучении с длинами волн λ , равными 612,1; 579,1; 546,1; 404,7; 365,5; 253,7 нм? Интенсивности этих линий составляют соответственно 2; 4; 4; 2,9; 2,5; 4% интенсивности ртутной дуги. Считать, что 80% мощности дуги идет на излучение.

• **18.1.26.** Мощность электрической лампы $P = 60$ Вт. Лампа испускает $n = 10^{19}$ фотонов в секунду. На излучение лампы затрачивается $\eta = 7\%$ ее мощности. Найдите длину волны излучения, соответствующей средней энергии фотона. Оцените, насколько уменьшится масса нити накаливания за один час работы.

18.1.27. На каплю воды массой $m = 0,4$ г каждую секунду падает $n = 2,4 \cdot 10^{18}$ фотонов, которым соответствует длина волны $\lambda = 5,5 \times 10^{-7}$ м. На сколько градусов нагреется капля за время $t = 30$ с?

18.1.28. Каплю воды объемом $V = 0,4$ мл нагревают монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм. Каждую секунду вода поглощает $n = 10^{18}$ фотонов. За какое время вода нагреется на $\Delta T = 10$ К? Считать, что вся полученная энергия идет на нагревание воды.

18.1.29. Точечный источник монохроматического света с длиной волны λ имеет мощность P . Определите количество фотонов, проходящих за одну секунду через единичную поверхность на сфере радиусом R , в центре которой находится источник.

18.1.30. Лампочка карманного фонаря потребляет мощность $P = 1$ Вт. Считая, что эта мощность рассеивается во всех направлениях в виде излучения с длиной волны $\lambda = 1$ мкм, определите число фотонов, попадающих в течение времени $t = 10$ с на площадку площадью $S = 1$ мм², расположенную перпендикулярно лучам на расстоянии $l = 10$ км.

18.1.31. Луч лазера имеет вид конуса с углом раствора $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ рад. Мощность излучения $P = 3,5$ МВт, длина волны $\lambda = 540$ нм. На каком максимальном расстоянии наблюдатель может увидеть этот луч, если глаз способен «регистрировать» не менее $n = 100$ фотонов в секунду? Диаметр зрачка считать равным $d = 0,4$ см.

Ответы:

18.1.1. $E_{\phi} = h\nu$; а) $E_{\phi} = 1,7$ эВ;
б) $E_{\phi} = 0,4$ кэВ; в) $E_{\phi} = 10$ МэВ.

У к а з а н и е. Здесь и далее h — постоянная Планка.

18.1.2. $\nu = \frac{E_{\phi}}{h} = 4,8 \cdot 10^{16}$ Гц.

18.1.3. $\frac{\lambda_{к}}{\lambda_{\phi}} \approx 1,9$ раза.

18.1.5. $\lambda = \frac{2hc}{m_p v^2} \approx 23,8$ нм.

18.1.7. $\lambda = \frac{hc}{e\Delta\phi} \approx 4,14 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.8.
 $\lambda = \frac{2hc}{m_e v_0^2 + 2e\Delta\phi} = 1,55 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.9. В $n = \frac{2hc}{3\lambda kT} \approx 80$ раз (здесь $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана).

18.1.10. $T = \frac{2hc}{3k\lambda} = 1,2 \cdot 10^4$ К.

18.1.11.
 $\nu = \frac{c}{hN_A} \sqrt{3RTM} \approx 2 \cdot 10^{26}$ Гц.

18.1.12. $n = \frac{hc}{\lambda E_{\phi}} \approx 1,5$.

18.1.13. $p = \frac{h}{\lambda n} = 5,25 \cdot 10^{-26}$ кг·м/с.

18.1.15. $N = \frac{E\lambda}{hc} \approx 10^{10}$.

18.1.16. $N = \frac{n\lambda E}{hc} \approx 3,35 \cdot 10^{18}$.

18.1.17. $P = \frac{Nhc}{\lambda t} \approx 13,25$ Вт.

18.1.18. $\lambda = \frac{nhc}{Pt} \approx 9,94 \cdot 10^{-7}$ м.

18.1.19. $n = \frac{P\lambda}{hc^2 S} = 2,33 \cdot 10^{17}$ м⁻³.

18.1.20. $N = \frac{P\lambda t}{ch} \approx 1,5 \cdot 10^8$.

18.1.21. $n = \frac{P\lambda}{hc} \approx 52$ с⁻¹.

18.1.22. $N = \frac{n\lambda Pt}{ch} = 8 \cdot 10^{10}$.

18.1.23. $n = \frac{\eta P\lambda t}{hc} \approx 1,46 \cdot 10^{20}$.

18.1.24. $\eta = \frac{nhc}{\lambda UI} \approx 7,95 \cdot 10^{-4}$.

18.1.27. $\Delta T = \frac{n h c t}{c_{уд} m \lambda} \approx 15,5$ К ($c_{уд}$ — удельная теплоемкость воды).

18.1.28. $t = \frac{\lambda c_{уд} \rho_b V \Delta T}{n h c} = 42$ с ($c_{уд}$ — удельная теплоемкость воды).

18.1.29. $N = \frac{P\lambda}{4\pi h c R^2}$.

18.1.30. $N = \frac{P\lambda St}{4\pi h c l^2} \approx 4 \cdot 10^4$.

18.1.31. $s_{\max} = \frac{d}{\alpha} \sqrt{\frac{\lambda Pt}{n c h}} \approx 1,96 \cdot 10^8$ м.