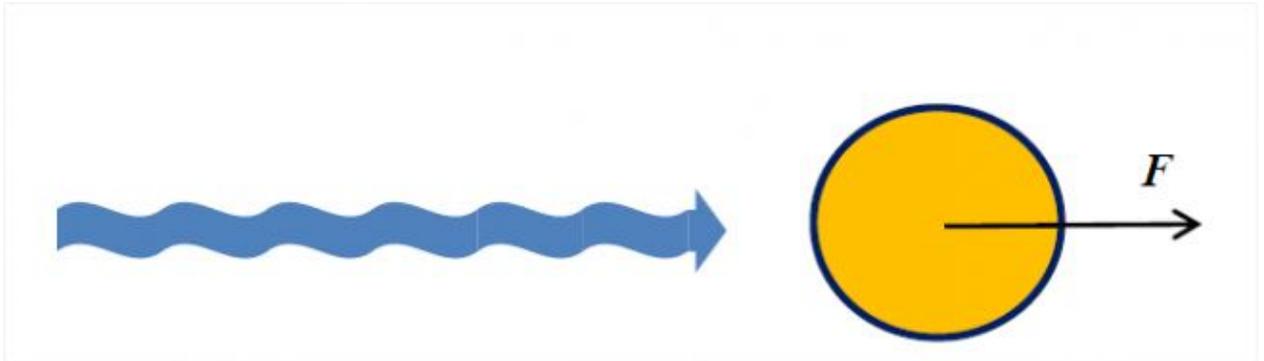


Физика

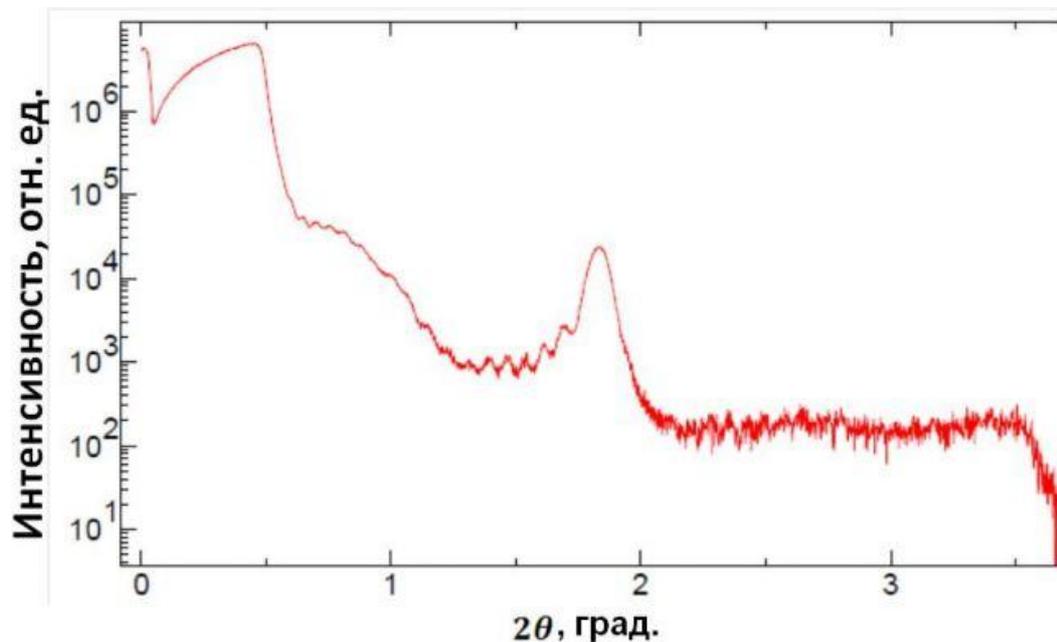
Задача 1. Давление света на наночастицу



Как известно, первые опыты по измерению светового давления были осуществлены П.Н.Лебедевым в 1899 году с использованием крутильных весов. Какое среднее давление $P_{\text{ср}}$ оказывает монохроматический свет с интенсивностью $I = 1 \text{ Вт/см}^2$ на наночастицу диаметром $d = 5 \text{ нм}$, если его эффективное сечение поглощения составляет $\sigma = 10^{-14} \text{ см}^2$? (5 баллов).

Во сколько раз k это давление отличается от давления света той же интенсивности на идеально зеркальную поверхность при его нормальном падении? (2 балла).

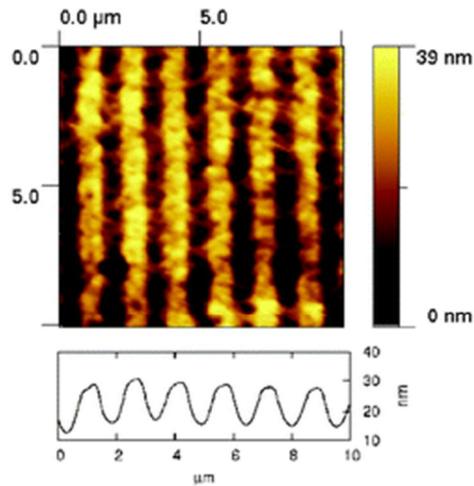
Задача 2. Дифракция рентгеновских лучей на многослойной пленке



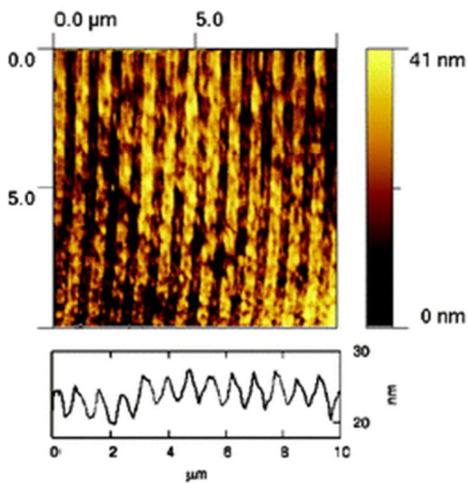
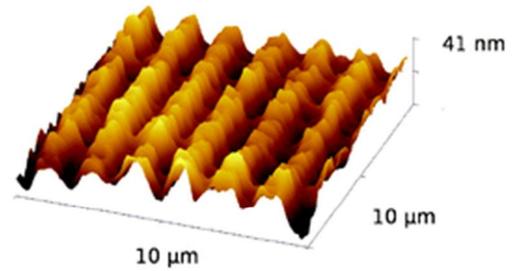
На рисунке приведена картина дифракции рентгеновских лучей от многослойной пленки, осажденной на подложку, причем известно, что при осаждении чередовались слои двух различных составов. Длина волны рентгеновских лучей составляла 1.54 \AA , а по оси x отложен удвоенный брэгговский угол 2θ . Какую информацию о пленке можно извлечь из представленного скана? (3 балла).

Пользуясь графиком, оцените основные параметры пленки в нанометрах (7 баллов).

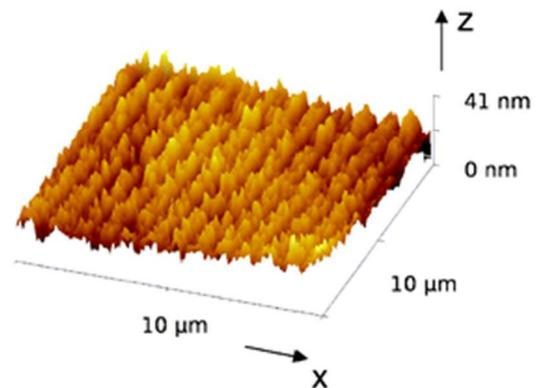
Задача 3. Нанорельеф



CD



DVD

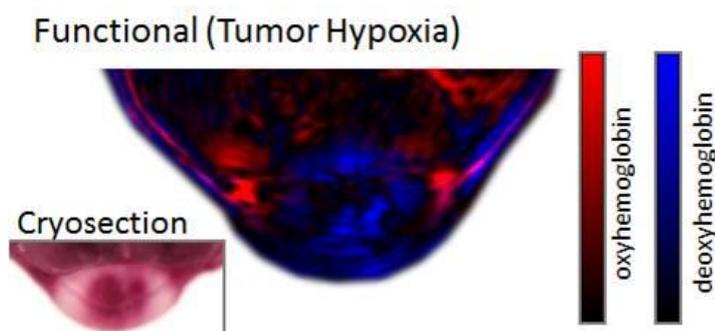


На изображении представлены результаты исследования поверхности компакт диска (CD) и DVD методом атомно-силовой микроскопии. По данным этих исследований определите расстояние между дорожками и глубину (**1 балл**).

Какую картину будет наблюдать ученик в отраженном свете на экране, если он посветит на поверхность дисков лазерной указкой? Угол падения считайте близким к 0, длина волны излучения $\lambda = 630$ нм. Расстояние от диска до экрана 1 м. Схематически изобразите зависимость интенсивности от координаты (**5 баллов**).

Задача 4. Оптоакустическая спектроскопия

Современный метод оптоакустической спектроскопии позволяет определить состав некоторых жидкостей (например, крови), опираясь на спектральные отличия оптического поглощения компонентов. В частности, отличие спектров поглощения гемоглобина (белка, переносящего кислород в организме) в окисленной и неокисленной форме позволяет рассчитать концентрацию кислорода в крови без вмешательства в организм пациента (см. рис.) Метод использует эффект теплового расширения тел, которые эффективно поглощают свет, что, в свою очередь, приводит к испусканию ультразвуковой волны, если интенсивность света изменяется по периодическому закону (т. е. свет «модулирован»). Измеряя интенсивность ультразвука в разных точках при помощи матрицы микрофонов, учёные восстанавливают 3D-изображение биологических объектов.



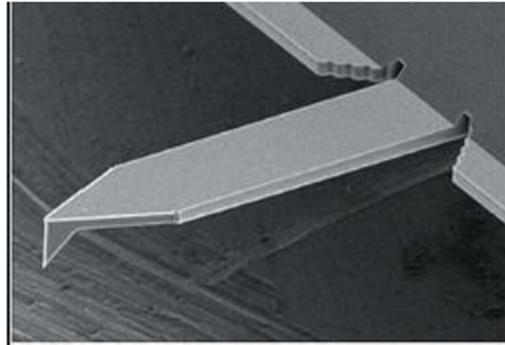
Томографическое изображение распределения кислорода в раковой опухоли. Красный — окисленный гемоглобин, синий — неокисленный. В углу — фотография самой опухоли. (Radiology, 2012)

Юная изобретательница Даниэла разработала новое контрастное вещество, которое представляет из себя наночастицы с высоким показателем поглощения света $\alpha = 100 \text{ см}^{-1}$ и плотностью 2 г/см^3 . Она приготовила водную суспензию наночастиц с концентрацией $C_{\text{NP}} = 1 \text{ г/л}$ и направила на неё источник световых прямоугольных импульсов с интенсивностью $I_0 = 1 \text{ кВт/м}^2$, частотой $f = 1 \text{ МГц}$ и скважностью 2 (так называемые, меандры).

1. Найдите звуковое давление ультразвуковой волны (**10 баллов**). Сжимаемость воды принять равной $5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, а коэффициент объёмного расширения воды $1.5 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.
2. Насколько отличается уровень давления звука, испускаемого суспензией, от звука разговора Даниэлы и её научного руководителя (50 дБ) (**4 балла**)?

Задача 5. Потенциал взаимодействия

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) используют зондовые датчики, которые представляют собой упругую консоль с острым зондом на конце.



Можно считать, что энергия взаимодействия зонда с поверхностью описывается функцией

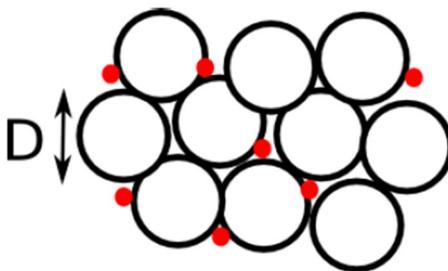
$$U(r) = U_0 \left(-\left(\frac{a}{r}\right)^6 + \left(\frac{\sqrt{2}a}{r}\right)^{12} \right)$$

где r – расстояние до поверхности.

1. Представьте графически зависимость потенциальной энергии от расстояния. **(1 балл)**
2. Известно, что минимум потенциальной энергии достигается при $r_{min} = 1 \text{ \AA}$. Найдите a . **(2 балла)**
3. Найдите минимальное значение потенциальной энергии, если известно, что максимальная сила притяжения, действующая между зондом и поверхностью, $F_{max} = 10^{-9} \text{ Н}$. **(5 баллов)**.

Задача 6. Нанорубины

Любительницы ювелирных украшений особенно ценят рубины – драгоценные камни, представляющие собой кристаллы корунда (Al_2O_3) с примесью хрома (Cr), который и придаёт характерную красную окраску минералу.



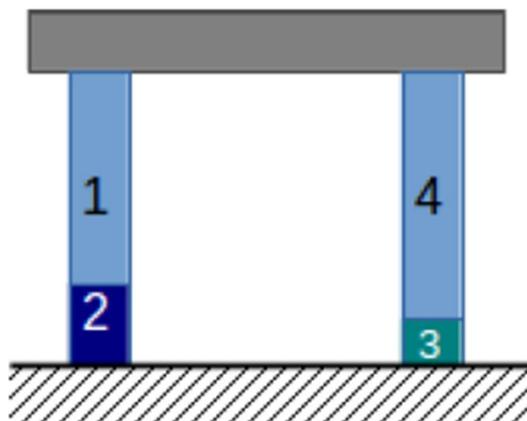
Российские учёные предложили новый способ формирования рубинов. Сначала они осадили нанокристаллы Al_2O_3 диаметра D на подложку, получив тем самым плотный, но пористый наноструктурированный слой (пористость образца P составила 50%). Затем они применили метод атомно-слоевого осаждения хрома из газовой фазы. Преимуществом данного метода является исключительная точность нанесения покрытия, он позволяет наносить покрытия толщиной от 10 пикометров (при этом расстояние между атомами в корунде — 0.5 нм). Исследователи получили искусственный «пористый рубин» такого же цвета, как и природный образец, в котором концентрация атомов хрома составляла 1%.

1. Рассчитайте диаметр нанокристаллов, если известно, что покрытие поверхности атомами хрома составило 5% от монослоя **(6 баллов)**.
2. Рассчитайте площадь удельной поверхности материала в $\text{м}^2/\text{см}^3$ **(2 балла)**.
3. Какие оптические свойства «пористого рубина» изменятся, если поры заполнить водой **(1 балл)**?
4. Как можно интерпретировать покрытие поверхности кристалла слоем в 10 пикометров **(1 балл)**?

Для простоты решётку корунда можно считать кубической с одним атомом в элементарной ячейке.

Задача 7. Тепловое расширение

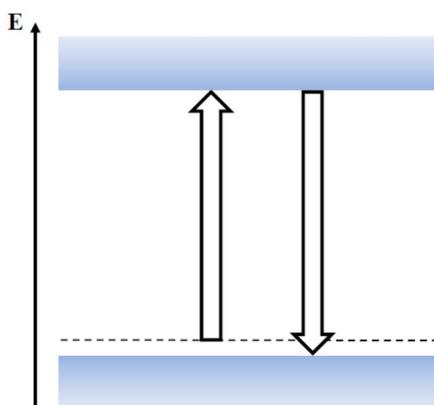
Хорошо известно, что при нагревании тела расширяются. Оказывается, что это свойство тел представляет большую сложность при конструировании зондовых микроскопов. Оцените, на сколько увеличится длина алюминиевого стержня, при увеличении температуры на 1°C (**2 балла**). Длина стержня при 0°C равна 1 см.



В мастерской по ремонту зондовых микроскопов столкнулись со следующей задачей: подобрать материал с нужным коэффициентом теплового расширения. Дело в том, что для столика микроскопа нужно изготовить две подставки в виде цилиндрических стержней, но для компенсации тепловых расширений стержни делают не монолитными, а составляют из 2-х стержней одинакового сечения, необходимой длины. Для левой подставки взяли стержень длины l_1 , с коэффициентом теплового расширения α_1 , а вторую часть – из материала с коэффициентом теплового расширения α_2 и длины l_2 . Для правой подставки стержня с коэффициентом теплового расширения α_1 , такой же длины, как слева, не оказалось, но нашёлся длины l_4 . С каким коэффициентом теплового расширения α_3 нужно подобрать материал для правой подставки, чтобы при любом нагреве подставка микроскопа оставалась горизонтальной? (**6 баллов**). При 0°C высота левой и правой подставок одинаковы.

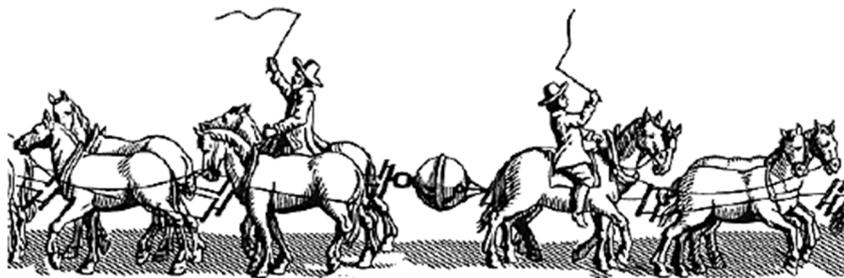
Задача 8. Лазерное антистоксовое охлаждение

Неупругое рассеяние лазерного излучения веществом может быть использовано для его охлаждения – этот метод получил название лазерного антистоксового охлаждения. Метод основан на том, что поглощаемые и испускаемые затем фотоны имеют различную энергию.



За какое время Δt нанокристалл кремния радиусом $r = 25$ нм охладится на $\Delta T = 1^\circ$ под воздействием направленных на него встречных лучей лазера с длиной волны $\lambda = 325$ нм и суммарной интенсивностью $I = 41$ Вт/см², если известно, что энергия оптического фона в кремнии $E_{\text{фон}} = 65$ мэВ. Считать, что вероятность поглощения фотонов нанокристаллами составляет $p = 0.1$ % и процесс происходит при температуре, близкой к комнатной (7 баллов).

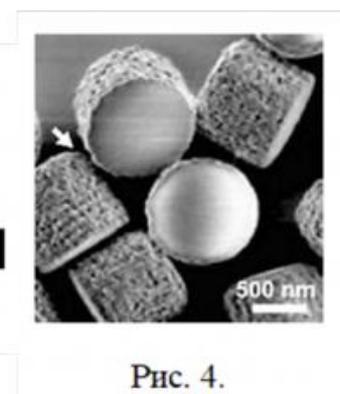
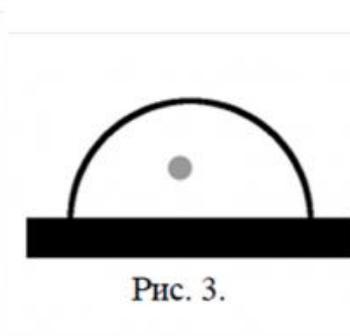
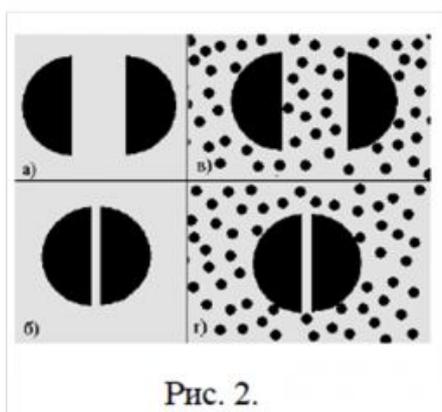
Задача 9. Некомпенсированная сила



1. Какой физический эксперимент изображен на заглавном рисунке? Оцените силу, возникающую в таком опыте между полусферами радиусом $r = 1 \text{ мкм}$ в атмосфере Марса ($p = 1 \text{ кПа}$, почти в 100 раз меньше земного). (1 балл)

Рассмотрим два покоящихся монолитных полушария радиусом $r = 1 \text{ мкм}$, которые погружены в растворитель и находятся на некотором переменном расстоянии x (порядка 3 - 50 нм) друг от друга (рис. 2).

Если в раствор добавить наночастицы радиусом 3 нм, то между полушариями может дополнительно возникнуть некоторая сила.



2. При каких расстояниях между полушариями она возникает? Будут ли полушария при этом притягиваться или отталкиваться? Почему эта сила тоже относится к некомпенсированным? Ответы поясните с точки зрения молекулярно-кинетической теории. **(2.5 балла)**

3. Оцените величину этой силы, если концентрация добавленных наночастиц составляет $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л. **(2.5 балла)** Опишите несколько способов, как такую некомпенсированную силу можно измерить напрямую. **(1 балл)**

4. Частицу полистирола радиусом $r_{ps1} = 250$ нм помещают в каплю жидкости ($\rho_l = \rho_{ps}$), имеющую вид полусферы с $d_l = 5$ мкм **(рис. 3.)**. Затем в эту же каплю добавляют наночастицы полистирола $d_{ps2} = 50$ нм. Опишите, что будет наблюдаться в микроскоп до добавления второго типа полистирольных частиц и после этого. **(2 балла)**

5. Опишите изменения, которые будут происходить в суспензии наноструктурированных микрочастиц **(рис. 4)**, если к ним добавить полимер с размером частиц около 3 нм. **(1.5 балла)** Поясните, зачем понадобилось делать гладкие торцы частиц и наноструктурированную боковую поверхность? **(1.5 балла)**

6. Вкратце напишите, где еще мы можем найти подобные явления и как их можно использовать. **(2 балла)**

Задача 10. Нанолампы накаливания

Нити первых ламп накаливания изготавливались из углеродного волокна. Такие лампы не могли работать на большой мощности: их колба внутри темнела (рис. 1а) и они перегорали, поэтому их заменили более эффективные лампы с вольфрамовой спиралью. Однако прошло более ста лет, и ученые вновь вернулись к углеродным материалам для нитей накаливания, на этот раз в наномасштабе.

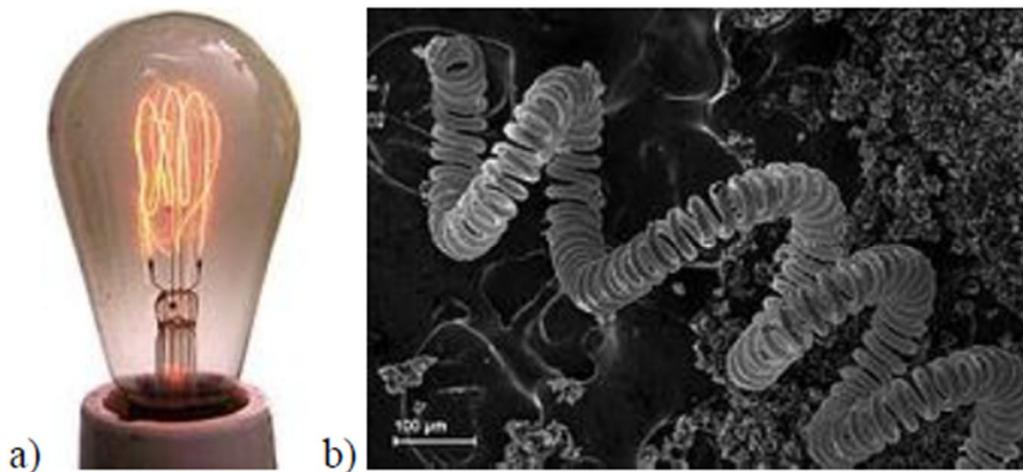


Рис. 1. а) Одна из первых ламп накаливания – с нитью из углерода. б) Изображение спирали вольфрамовой нити обычной лампы накаливания, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

1. Из-за чего обычно «перегорают» лампы накаливания? **(0.5 балла)**
2. Какая лампа накаливания при одинаковой не слишком высокой температуре нити прослужит дольше: с углеродной нитью, с нитью на основе УНТ или на основе графена? Почему? **(1 балл)**
3. Поясните, можно ли повысить эффективность наноламп накаливания по аналогии с обычными лампами, используя вольфрамовую нанопроволоку или нанофольгу тех же размеров, что и УНТ или полоска графена? **(2 балла)**

Как можно видеть на рис. 2а и 3а, в конструкции нанолампочек всегда присутствует некоторый зазор между подложкой и нитью накала.

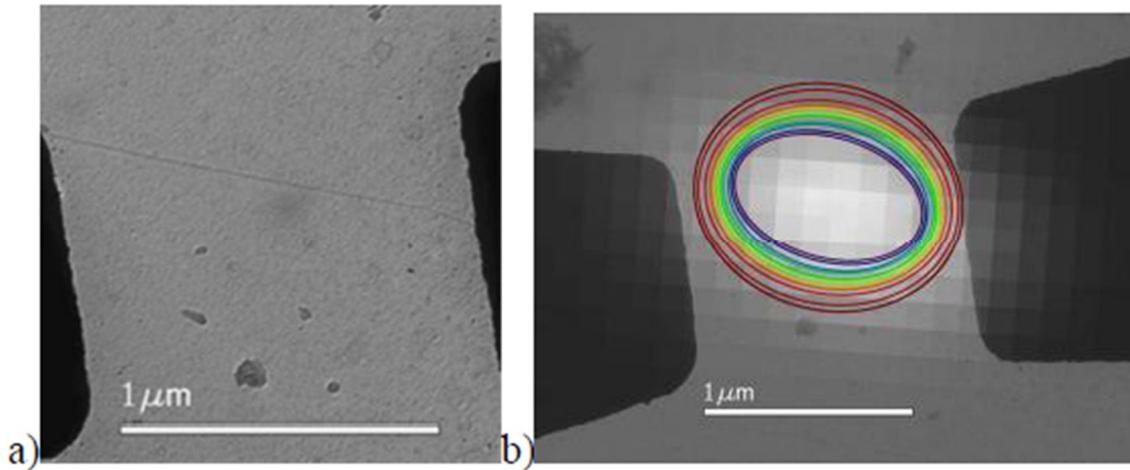


Рис. 2. Нанолампочка из углеродной нанотрубки (УНТ). Похожа на лампочку Эдисона – питается от напряжения 5 В, вакуумируется, но ее волосок в 105 раз короче и тоньше. Тем не менее, ее свечение видно даже невооруженным глазом. а) ПЭМ изображение УНТ между двумя электродами. Длина УНТ – 1.4 мкм, внешний диаметр – 13 нм (состоит из 11 слоев). б) Наложенное на ПЭМ видимое свечение УНТ (одним цветом обозначены зоны с одинаковой яркостью).

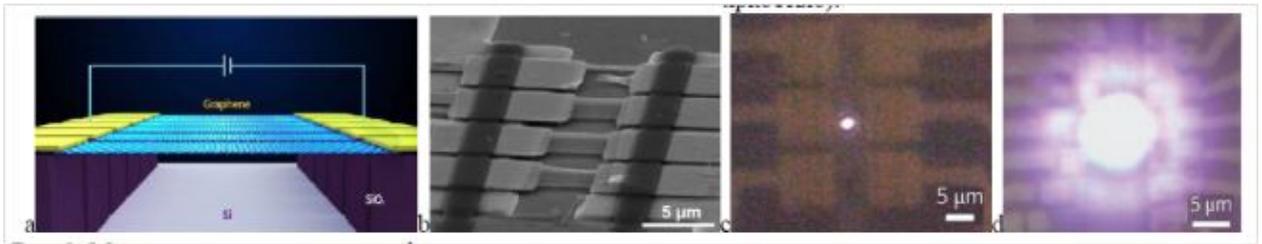


Рис. 3. Массив нанолампочек из графена. а) Схема массива из шести графеновых лент. б) СЭМ изображение массива из пяти графеновых лент. Свечение массива при разных силах тока (изображения получены в оптический микроскоп). с) Слабое свечение при небольшой силе тока ($U = 2.5 \text{ В}$, $I = 120 \text{ мкА}$; размер ленты: длина 2 мкм, ширина 5 мкм). д) При максимальной силе тока свет графеновой нанолампочки, также как для нанотрубки, можно заметить невооруженным глазом.

4. Для чего необходим такой зазор? **(1 балл)**

5. Найдите КПД графеновой лампы (рис. 3с), если мощность ее видимого излучения составляет 1.35 мкВт. **(1 балл)**

6. Исходя из параметров графеновой лампы (рис. 3с), оцените потребляемую мощность лампочки из УНТ (рис. 2). **(3 балла)**

Представьте себе, что нить накала в лампочке на рис. 1а заменили на УНТ такой же длины, как и углеродная нить, но по остальным параметрам трубки аналогичную использованной в нанолампе (рис. 2).

7. Почему такая лампа не заработает от сети 220 В, и можно ли будет заставить ее работать без изменения конструкции? **(2 балла)**

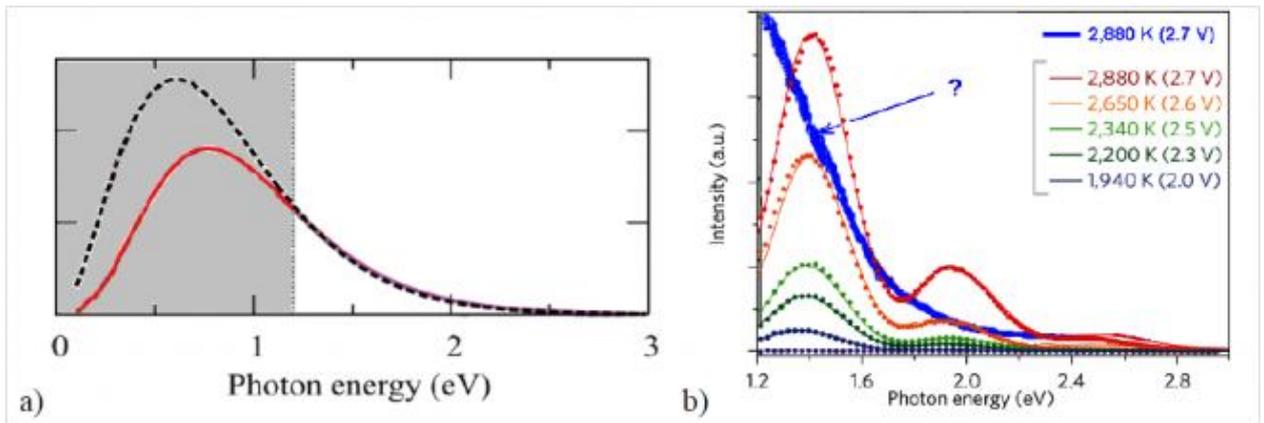


Рис. 4. а) Спектр излучения абсолютно черного тела при 2500К (пунктир) и расчетный спектр излучения графена (красный). б) Экспериментальные спектры излучения графеновой лампочки (рис. 3с) для разных температур накала.

Расчетный спектр излучения графена при нагревании мало отличается от излучения абсолютно черного тела (рис. 4а). С ростом температуры накала максимум в спектре излучения должен, как и у «черного тела», смещаться из красной в синюю область (подобно тому, как меняется цвет раскаленного металла). Однако спектр реальной графеновой нанолампы (рис. 3с) имеет несколько максимумов. Причем при повышении температуры накала положение максимумов и минимумов изменяется слабо (рис. 4б).

8. Объясните причину наблюдаемых особенностей спектра реальной графеновой нанолампочки. **(1 балл)**

9. Что и как ученые изменили в конструкции чтобы спектр нанолампы стал таким, который отмечен вопросом на рис. 4б? **(1.5 балла)**

10. Оцените расстояние между графеном и подложкой в нанолампе на рис. 4б. **(3 балла)**