



Физика для школьников 7 – 11 класса (заключительный этап)
Сложные задачи

Задача 6. Графеновый детектор (20 баллов)

Традиционные фотодетекторы формируют только плоское изображение, поскольку весь падающий свет целиком поглощается. Ученые из Мичиганского университета предложили использовать прозрачные фотодетекторы из графена для формирования объемного изображения, о чем они сообщили в журнале Nature Photonics.

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема эксперимента. Для иллюстрации принципа работы в эксперименте строилось изображение маленького отверстия с помощью собирающей линзы, а несколько графеновых детекторов располагалось вблизи построенного изображения.

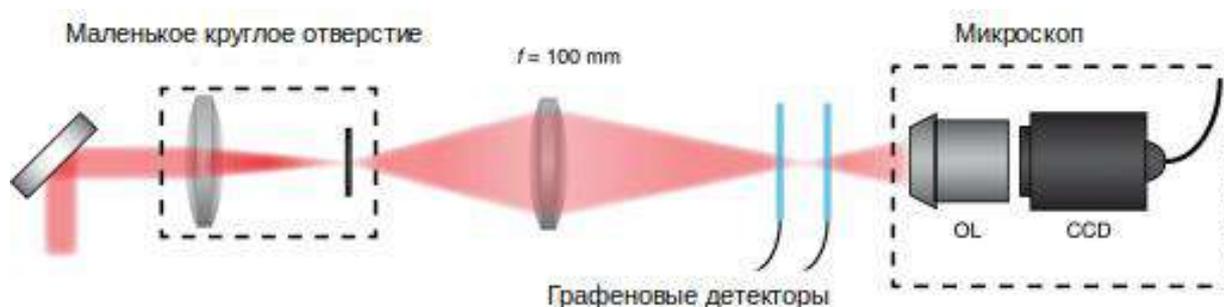


Рисунок 1: Принципиальная схема эксперимента

1. Найдите, на каком расстоянии от линзы получается изображение маленького отверстия, если фокусное расстояние $F = 100$ мм, а расстояние от отверстия до линзы $d = 300$ мм. Линзу считать тонкой. **(3 балла)**
2. Выполните необходимые построения на рис. 2 для графического определения местоположения изображения точечного источника света, расположенного на оптической оси. **(7 баллов)**

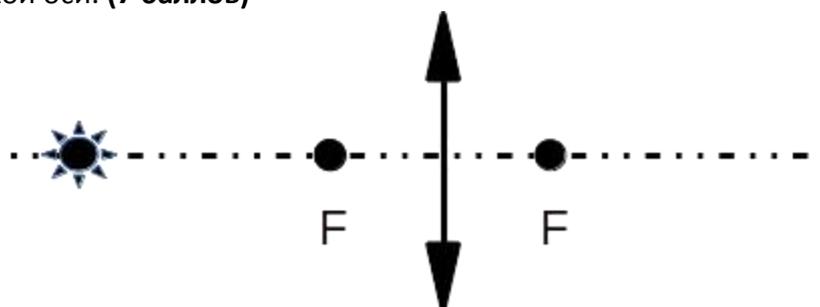


Рисунок 2: К вопросу №2

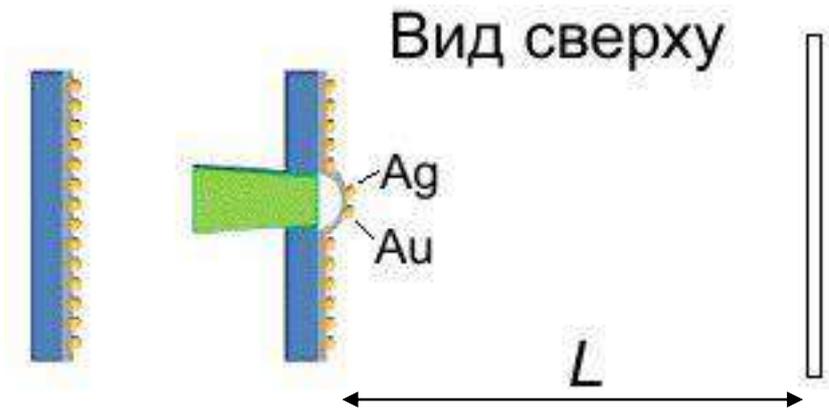
3. Найдите отношение интенсивности света, падающего на 10-й детектор, к интенсивности света, падающего на 1-й детектор, I_{10}/I_1 . Известно, что 1-й детектор расположен на расстоянии $L_1 = 140$ мм от линзы, а 10-й – на расстоянии $L_{10} = 170$ мм. Каждый детектор пропускает 96% всей энергии падающего света. Отражением от детекторов можно пренебречь. **(10 баллов)**

Задача 7. Перенос двух наночастиц (20 баллов)

Как обсуждалось в одной из задач заочного тура, манипуляция отдельными наночастицами является весьма непростой задачей. Так, например, для ее решения может быть использована методика лазерного переноса, которая позволяет переносить отдельные наночастицы из массива в заданное место с высокой точностью.

Суть метода состоит в следующем. На прозрачную подложку наносится тонкая пленка из металла, на которую предварительно осаждается подготовленный для переноса массив наночастиц. Далее металлическая пленка освещается через прозрачную подложку фемтосекундным лазерным импульсом, нагревается и вздувается в результате термического расширения (см. рисунок). Получив достаточную энергию, отдельные наночастицы «стряхиваются» с пленки и переносятся на приемный экран.

В эксперименте по переносу использовались две наночастицы из золота (плотность $\rho_z = 19,32 \text{ г/см}^3$) и серебра (плотность $\rho_c = 10,49 \text{ г/см}^3$) одинакового диаметра 40 нм. Перенос осуществлялся на приемный экран, расположенный на расстоянии $L = 5 \text{ мм}$. Известно, что сила притяжения, удерживающая наночастицы на пленке, одинакова и равна $F_{\text{притяж}} = 3 \text{ пН}$, и что при вздутии пленка движется с ускорением, изменяющимся по закону $a = A \cdot \sin(\omega t)$, где $A = 10^7 \text{ м/с}^2$, $\omega = 2.5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а общее время вздутия пленки составило 170 мкс.



1. С какой разницей по времени наночастицы Au и Ag достигнут приемного экрана (начиная с момента действия лазерного импульса), если изначально они обе находились в одной горизонтальной плоскости и в центре действия лазерного луча? **(20 баллов)**

Задача 8. Исследование лепестков ромашки (20 баллов)

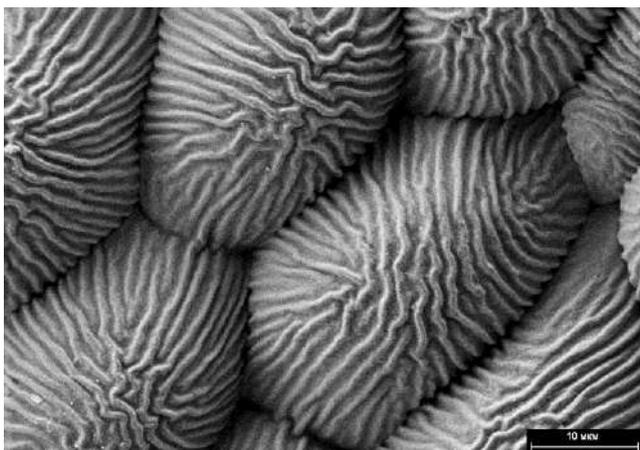


Рис. 1. Микрофотография лепестка ромашки, полученная с помощью растрового электронного микроскопа (увеличение 5000 раз, ускоряющее напряжение 3 кВ). На изображении – растительные клетки

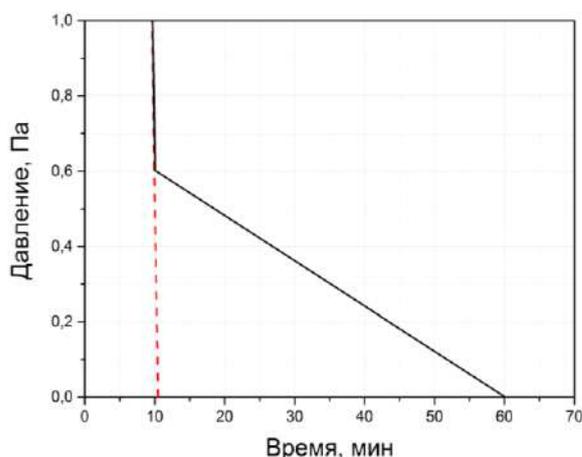


Рис. 2. Зависимость давления в рабочей камере от времени. Пунктирная линия соответствует вакуумированию пустой камеры, а сплошная – этой же камеры, содержащей лепесток ромашки

Растровая электронная микроскопия позволяет визуализировать мельчайшие детали объектов, которые невозможно рассмотреть в оптический микроскоп. Поскольку в этом методе изображение формируется в результате взаимодействия ускоренных электронов с веществом, исследование необходимо проводить в глубоком вакууме, чтобы минимизировать рассеяние электронного пучка. Очевидно, это накладывает некоторые ограничения на применение электронной микроскопии. Например, давление в пустой камере удаётся снизить с 10^5 Па до 0 Па за 10,5 минут. Однако при исследовании лепестка ромашки (рис. 1) полная откачка газов продолжается 60 минут. При этом, в первые 10 минут (до давления 0,6 Па) обе зависимости давления от времени совпадают (рис. 2; изображена только часть графиков, соответствующая низким давлениям).

1. Определите кинетическую энергию электронов, ускоренных напряжением 3 кВ. Оцените температуру электронного газа, обладающего такой энергией. **(6 баллов)**
2. На полученных изображениях растительные клетки выглядят слишком морщинистыми. Какие факторы, обусловленные использованием электронной микроскопии, приводят к такому эффекту? **(4 балла)**
3. Что является причиной расхождения временных зависимостей давления для пустой камеры и камеры, содержащей лепесток ромашки? **(3 балла)**
4. Оцените, насколько изменилась масса лепестка в результате исследования в электронном микроскопе, если объём камеры составляет 10 л, а температура равна 25 °С. Для простоты можно считать, что с 0,6 Па до 0 Па давление снижалось линейно. **(7 баллов)**

Список констант

Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Скорость света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с

Элементарный заряд $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл

Масса электрона $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг

Масса протона $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг

Постоянная Больцмана $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Универсальная газовая постоянная $R = 8,314$ Дж/(моль·К)

Постоянная Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²