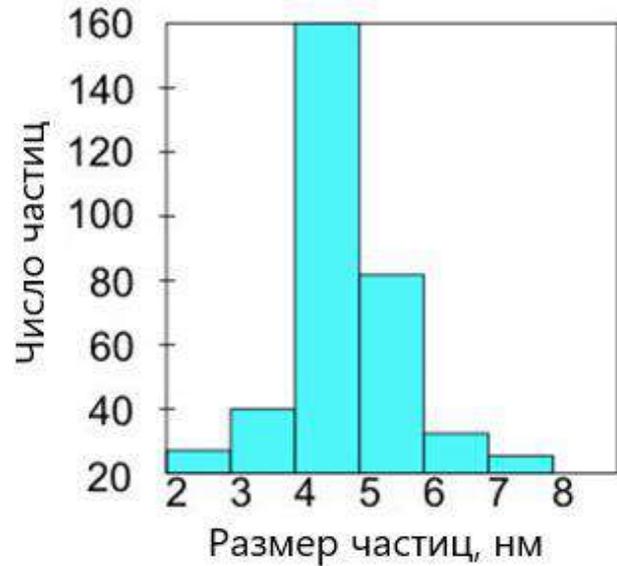
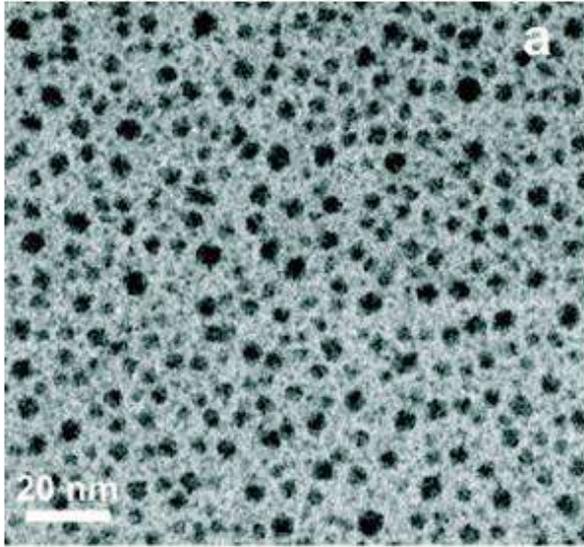




**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**

**Задача 1. Распыление наночастиц**



Для нанесения на подложку массива наночастиц индия экспериментаторы испарили в напылительной вакуумной камере небольшую массу  $m = 5$  г индия (In).

Остаточное давление в напылительной камере составляло  $10^{-3}$  мм рт. ст. Давление насыщенных паров In приблизительно описывается формулой

$$\log(p) = 8,18 - \frac{1260}{T},$$

где  $p$  — давление в мм рт.ст.,  $T$  — абсолютная температура. Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент  $U = 20$  В, а ток протекающий  $I = 5$  А.

1. Рассчитайте минимальное время, необходимое для распыления всей массы. Полагать, что энергия передается массе In целиком и мгновенно. **(6 баллов)**

В результате напыления масса индия осела на подложке в виде наночастиц. Далее подложку с наночастицами In использовали для формирования полупроводниковых нанонитей, а металлические наночастицы использовались как центры роста. В процессе формирования полупроводниковых нанонитей выяснилось, что наночастицы In плавятся при температуре около  $130$  °С.

2. Почему температура уменьшилась? В каком случае изменение температуры плавления наночастиц In может превысить 20%. **Приведите численную оценку. (4 балла)**

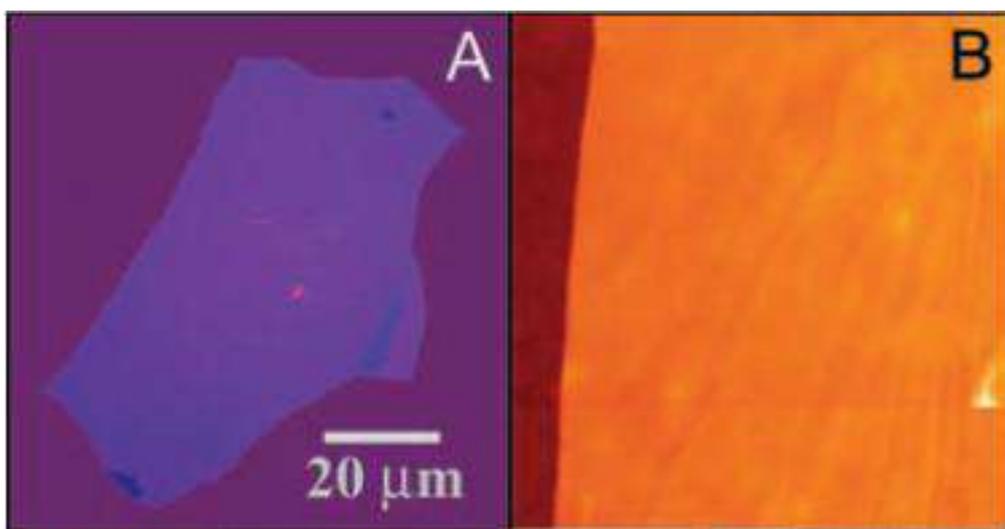
**Всего – 10 баллов**



## Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)

### Задача 2. Графен под микроскопом

В одной из пионерских статей К.С. Новоселова и А.К. Гейма, опубликованной в журнале Science в 2004 году, описаны уникальные свойства графена. В журнале приведены изображения многослойной пленки графена, находящейся на кремниевой пластине. Верхний слой пластины окислен и представляет из себя слой  $\text{SiO}_2$ . На рисунке представлены изображения, полученные в оптическом микроскопе (А) и в атомно-силовом микроскопе (В).



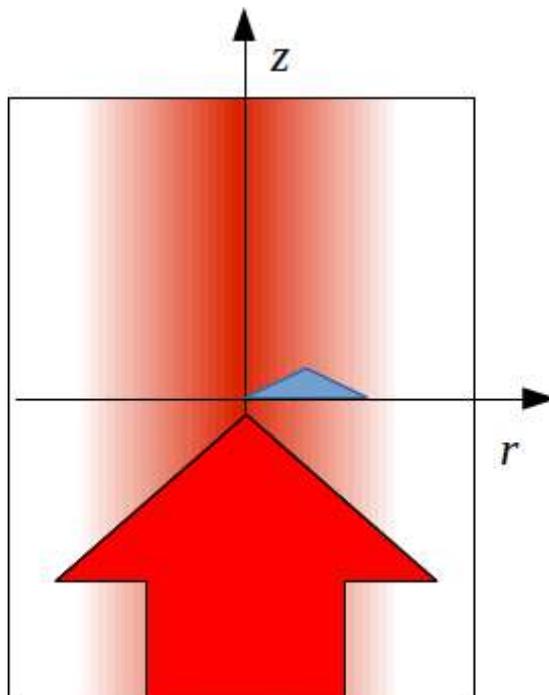
(А) Изображение, полученное в оптическом микроскопе (в белом свете) относительно большой многослойной чешуйки графена толщиной 3 нм поверх окисленной пластины Si.  
(В) Изображение, полученное на атомно-силовом микроскопе (АСМ), области размером 2 x 2 мкм этой чешуйки вблизи её края. Цвета: темно-коричневый, поверхность  $\text{SiO}_2$ ; оранжевый, высота 3 нм над поверхностью  $\text{SiO}_2$ .

1. Как изменились бы изображения чешуйки (А) и (В), если бы она лежала непосредственно на кремниевой пластине? Объясните. **(3 балла)**
2. Какова минимальная толщина слоя оксида, если наблюдается такая картина, как на рис. (А)? **(3 балла)**
3. Почему чешуйка графена на рис. А имеет синий цвет, а слой  $\text{SiO}_2$  – фиолетовый? Какую картину можно наблюдать в оптический микроскоп, если чешуйка будет а) в 3 раза толще и б) в 3 раза тоньше? **(4 балла)**

**Всего – 10 баллов**



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 3. Оптический пинцет**



В 2018 году Нобелевская премия по физике была присуждена за изобретение оптического пинцета и его применение в биологических системах. С помощью оптического пинцета можно манипулировать отдельными наночастицами.

Один из подходов, объясняющих возможность удерживать наночастицу лазерным лучом, – геометрическая оптика.

Наночастица имеет форму тонкой треугольной призмы, в основании которой – равнобедренный треугольник. Основание равнобедренного треугольника 200 нм. Угол между боковыми сторонами треугольника  $\alpha = 120^\circ$ . Показатель преломления призмы  $n = \sqrt{3}$ .

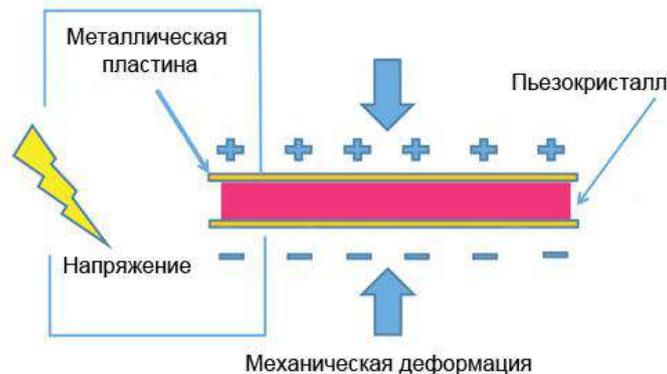
Наночастица облучается лазерным пучком, имеющим гауссово распределение интенсивности  $I(r) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$ ,  $\sigma = 200$  нм. Центр пучка совпадает с осью  $z$ . Наночастица сместилась от центра пучка, так что левый край совпадает с осью  $z$ , а излучение падает нормально на боковую грань (см. рис.).

1. Изобразите ход лучей на рисунке. **(1 балл)**
2. Используя рисунок, объясните возникновение градиентной силы. **(2 балла)**
3. Найдите угол возникающей градиентной силы относительно оси  $z$ , с учетом данных задачи. **(6 баллов)** Интегралы можно рассчитать численно.
4. Какая еще сила действует на наночастицу со стороны лазерного пучка? **(1 балл)**

**Всего – 10 баллов**



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 4. Нанопозиционер**



Для прецизионных перемещений исследуемых объектов с шагом в нанометровом диапазоне применяют пьезоэлектрические подачи, принцип действия которых основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте – возникновении механической деформации (растяжения или сжатия) пьезокристалла под действием приложенного к нему напряжения.

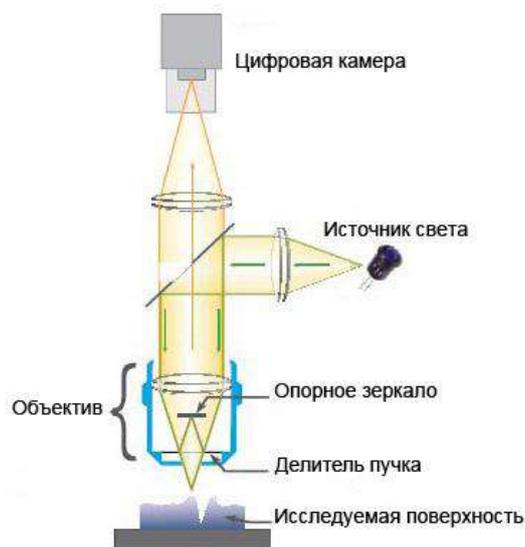
Впервые данный эффект был обнаружен для кристаллов кварца, причем было замечено, что величина вызываемого механического напряжения  $\sigma$  в кристалле прямо пропорциональна приложенной разности потенциалов  $U$  и обратно пропорциональна его толщине  $d$ .

Оцените абсолютную деформацию  $\Delta d$  кристалла кварца толщиной  $d = 1$  см, вызванную прикладываемым напряжением  $U = 100$  В, если известно, что в отсутствие внешнего электрического поля на металлических пластинах, между которыми зажат пьезокристалл, возникает разность потенциалов  $U_0 = 60$  В за счет прямого пьезоэлектрического эффекта. Деформации считайте малыми. Модуль Юнга для кварца примите равным 73 ГПа, атмосферное давление –  $10^5$  Па. **(10 баллов)**

**Всего – 10 баллов**



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 5. Оптический профилометр**



Для определения шероховатости поверхностей используют специальные приборы – профилометры. Принцип действия оптического бесконтактного профилометра основан на получении интерференционной картины, образующейся за счет сложения лучей, испускаемых источником света, отраженных от исследуемой поверхности и от опорного зеркала (см. рис.). Эта картина регистрируется цифровой камерой, а последующий количественный анализ сдвига интерференционных полос в процессе сканирования позволяет восстановить профиль исследуемой поверхности с высоким разрешением.

1. Оцените, какую минимальную высоту неровности исследуемой поверхности можно измерить с помощью оптического профилометра с источником монохроматического света ( $\lambda = 370$  нм), если известно, что в процессе анализа смещений интерференционных полос можно различать смещения вплоть до сотых долей периода интерференционной картины. **(7 баллов)**
2. Как изменится минимально детектируемая высота неровностей, если будет использован источник не монохроматического, а белого света? **(3 балла)**

**Всего – 10 баллов**



## Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)

### Задача 6. Плотнупакованные нанокристаллы

Как известно, при переходе от макроскопических объектов к наночастицам многие свойства одного и того же вещества существенно меняются (так называемый размерный эффект). Так, например, теплоемкость наночастиц металлов заметно возрастает по сравнению с теплоемкостью объемных образцов, в то время как температура плавления наоборот уменьшается.

1. Оцените линейный размер нанокристалла меди, при котором размерный эффект становится существенным. В качестве оценки энергии электронов использовать энергию Ферми при комнатной температуре, а также учесть, что эффективная масса электрона для меди совпадает с массой свободного электрона. **(5 баллов)**

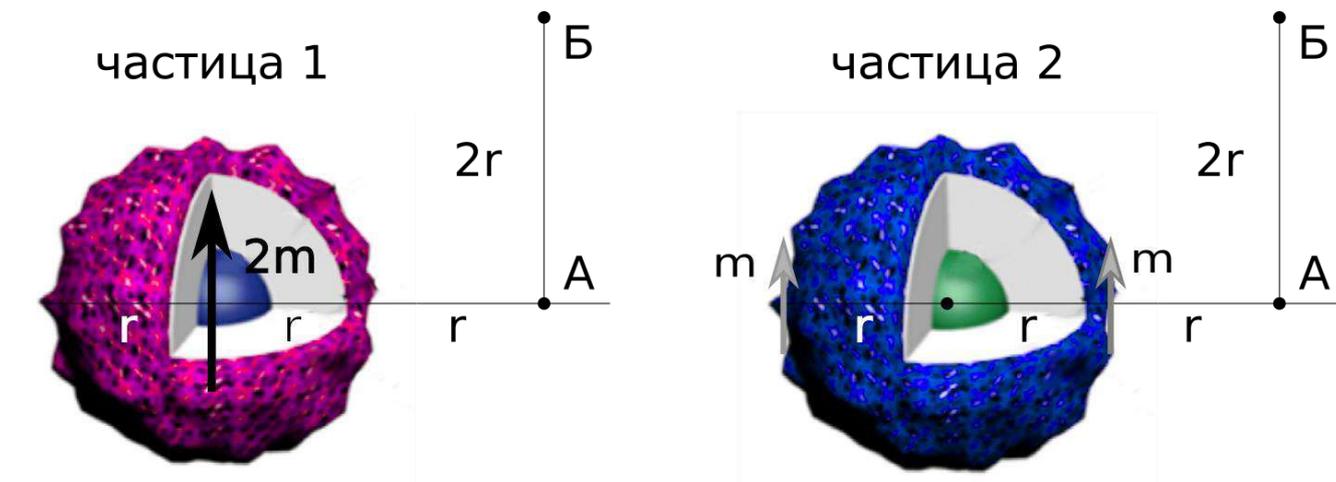
Некоторые из проявлений размерного эффекта могут быть объяснены перестройками структуры кристаллической решетки при уменьшении линейных размеров кристаллов до нескольких нанометров. Действительно, столь малым кристаллам (нанокристаллам) оказывается энергетически выгодно перестроить свою структуру так, чтобы площадь поверхности была наименьшей, т.е. упаковка атомов становится более плотной.

2. Оцените относительное изменение плотности нанокристалла вольфрама по сравнению с плотностью объемного вольфрама, если известно, что при переходе от макро- к нанокристаллам структура кристаллической решетки вольфрама изменяется от кубической объемноцентрированной к кубической гранецентрированной, а постоянная решетки при этом уменьшается на 2 %. **(5 баллов)**

**Всего – 10 баллов**



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 7. Магнитные наночастицы**



Для “подкрашивания” определенных органов на изображениях магнитно-резонансной томографии (МРТ) ученые используют магнитные наночастицы. Такие наночастицы, как правило, имеют диаметр  $d$  100-200 нм, хотя собственно магнитная часть может быть значительно меньше по размерам. Так, частицы могут содержать магнитные атомы гадолиния в центре, окруженные немагнитной оболочкой, либо, наоборот, атомы гадолиния могут находиться на поверхности. Для простоты рассмотрим частицу 1 с магнитным точечным диполем в центре наночастицы (магнитный момент равен  $2m$ ), и частицу 2 с двумя магнитными диполями на поверхности наночастицы с магнитным моментом  $m$ .

1. Почему магнитные частицы “подкрашивают” изображение МРТ? **(2 балла)**
2. Почему диаметр наночастиц лежит в диапазоне 100-200 нм? **(1 балл)**
3. Во сколько раз отличаются магнитные поля, создаваемые частицами 1 и 2 в точках А **(3 балла)** и Б **(4 балла)**?

*Справочная информация:*

Напряженность поля точечного магнитного момента определяется формулой:

$$H = \frac{m}{\mu r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}, \quad (1)$$

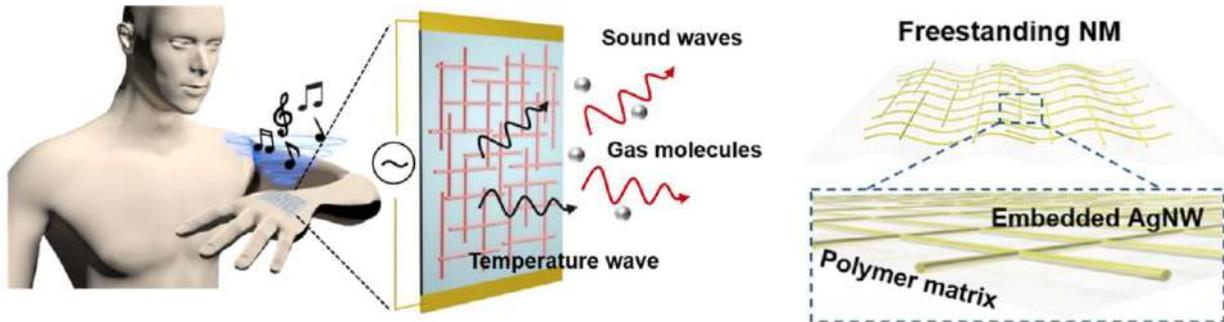
где  $m$  – магнитный момент,  $\mu$  – магнитная восприимчивость среды,  $r$  – расстояние от диполя до точки измерения, а  $\theta$  – угол между направлением диполя и радиус-вектором точки измерения. Для простоты все магнитные поля в одной точке, создаваемые разными диполями, можно считать сонаправленными.

**Всего – 10 баллов**



Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)

Задача 8. Нанодинамик



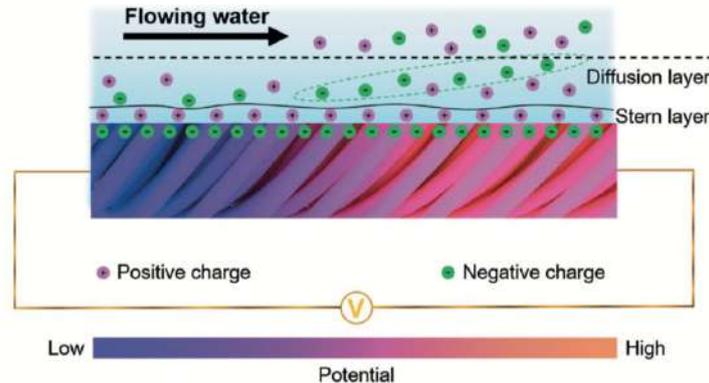
Корейские ученые разработали акустическую мембрану, представляющую из себя сетку пересекающихся серебряных нанонитей диаметром 10 нм в полимерной матрице. При подключении аудиосигнала мембрана воспроизводит музыку, даже будучи наклеенной на человеческое тело. К краям мембраны на расстоянии  $L = 1$  см подключен источник переменного напряжения  $U = 1$  В.

1. На сколько увеличится температура нанонитей при воспроизведении звука с частотой  $\nu = 10$  кГц? (8 баллов)
2. На какую величину возрастает радиус нанонити при воспроизведении? (2 балла)

Всего – 10 баллов



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 9. Кровяной наногенератор**



Необычный наногенератор, способный получать энергию из кровотока, предложили китайские ученые. Генератор представляет из себя одномерную структуру из многостенных углеродных нанотрубок. Из-за наличия заряда в жидкости на поверхности структуры образуется двойной электрический слой из неподвижных катионов натрия и анионов хлора с радиусом  $r = 0.2$  нм, которые могут перемещаться в тонком диффузионном слое вдоль поверхности. В момент сердечного сокращения скорость кровотока на поверхности структуры,  $v$ , достигает 1 мкм/с. Найдите разность потенциалов,  $U$ , на границах структуры из нанотрубок длиной  $L = 1$  мм, если известно, что во время сердечных сокращений ионы хлора около центра структуры неподвижны. Вязкость крови,  $h$ , составляет 5 мПа·с. **(10 баллов)**

**Всего – 10 баллов**



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)**  
**Задача 10. Просвечивающий электронный микроскоп**

Известно, что для изучения наночастиц используют электронные микроскопы, а не оптические. Принципиальное отличие заключается в том, что анализируемые объекты облучают не сфокусированным пучком света, а высокоэнергетическими электронами, движущимися под действием ускоряющего напряжения (разности потенциалов), величину которого можно изменять в зависимости от решаемой задачи. Однако, при прохождении через вещество электроны встречают на своём пути различные препятствия в виде ядер, занимающих определённые позиции, и электронов, распределённых между ними. Первым механизмом рассеяния можно пренебречь вследствие довольно малых размеров ядер, поэтому определяющее влияние оказывает электронная плотность. Например, глубину проникновения ускоренных электронов в золото можно оценить по эмпирической формуле

$$h = \frac{E^{1,67}}{2n},$$

где  $h$  – глубина проникновения (см),  $E$  – энергия электронов (кэВ),  $n$  – модуль объёмной плотности заряда электронов (Кл/см<sup>3</sup>).

*Для справки:*

Плотность золота равна 19,3 г/см<sup>3</sup>. Параметр решётки составляет 4,078 Å.

1. Оцените наименьшее ускоряющее напряжение, при котором электроны смогут насквозь пройти золотую плёнку толщиной 50 мкм. **(4 балла)**
2. Определите длину волны де Бройля электронов, обладающих такой энергией. **(4 балла)**
3. Можно ли с помощью электронов, обладающих такой энергией, получить информацию о кристаллической структуре золота? Ответ обоснуйте. **(2 балла)**

**Всего – 10 баллов**