

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

Диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м



**Физика для школьников 7 – 11 класса (заключительный этап)
Вариант I**

Задача 1. Оптическая дисперсия наноплёнки (8 баллов)

Для контроля толщины пленки при её росте на подложке можно использовать оптический метод.

Тонкую пленку толщиной $d = 80$ нм облучают светом длины волны $\lambda_1 = 600$ нм, при этом наблюдается первый минимум отражения, а для $\lambda_2 = 350$ нм наблюдается первый максимум отражения при той же толщине.

1. Определите дисперсию показателя преломления плёнки $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$, полагая её постоянной в видимом диапазоне. **(5 баллов)**
2. Какой знак дисперсии $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$ у стеклянной призмы в видимом диапазоне? Ответ поясните. **(3 балла)**

Задача 2. Конденсаторы для наноэлектроники (8 баллов)

Уменьшение размеров интегральных схем привело к тому, что расстояние между пластинами конденсаторов составляет единицы нанометров. Это приводит к большим токам утечки. Предположим, что столь малые устройства можно описать моделью плоского конденсатора.

Конденсатор C_1 , пространство между обкладками которого заполнено SiO_2 ($\epsilon_1 = 4$), заменили на конденсатор C_2 , в котором использован материал с высокой диэлектрической проницаемостью, HfO_2 ($\epsilon_2 = 24$). Площади пластин конденсаторов одинаковы и равны $S = 120$ нм². Расстояние между обкладками первого конденсатора $d_1 = 5$ нм, а второго – $d_2 = 2$ нм.

1. Каково максимальное рабочее напряжение на конденсаторе C_2 , если напряженность пробоя HfO_2 $E_{\text{max}} = 8$ МВ/см? **(2 балла)**
2. Какой наибольший заряд можно накопить на обкладках конденсаторов C_1 и C_2 , если они рассчитаны на одинаковое рабочее напряжение? **(3 балла)**
3. Найдите максимальные токи утечки конденсаторов, если удельное сопротивление SiO_2 $\rho_1 = 10^{12}$ Ом·см, HfO_2 $\rho_2 = 10^{15}$ Ом·см. **(3 балла)**

Задача 3. Лазерный нагрев (8 баллов)

Тонкую пленку германия (Ge) толщиной $d = 400$ нм и площадью $S = 2$ см² облучают импульсным лазером с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Общее количество импульсов в течение эксперимента $N = 100$, энергия каждого импульса $W = 1,5$ мДж. Теплоемкость Ge $c = 322$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 5,32$ г/см³.

1. На сколько градусов ΔT нагреется пленка, если эффективность поглощения излучения на данной длине волны $\eta = 60\%$? Теплообменом между пленкой и окружающей средой пренебречь. **(8 баллов)**

Задача 4. Нанотермометр (8 баллов)

Одним из теоретических применений углеродных нанотрубок является термометрия. Применение углеродных нанотрубок в качестве корпуса нанотермометра обусловлено чрезвычайно слабой зависимостью их размеров от температуры, в отличие от наполняющей их жидкой ртути, объёмный коэффициент термического расширения которой $\beta = 1,8 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

1. Оцените рабочий диапазон, то есть минимальную и максимальную температуры, которые можно измерить с помощью ртутного нанотермометра, изготовленного из нанотрубки длиной $L = 142$ нм и диаметром $d = 8$ нм и содержащего $m = 9,2 \cdot 10^{-17}$ г ртути. Температура плавления ртути $T_{пл} = 234$ К, температура кипения ртути $T_{кип} = 630$ К. При $T = 293$ К плотность ртути $\rho = 13,546$ г/см³. **(8 баллов)**

Задача 5. Обширные нанотрубки (8 баллов)

1. Какой общей площадью поверхности обладает ансамбль одностенных углеродных нанотрубок общей массой $m_{общ} = 1$ г, если известно, что средний диаметр нанотрубок в ансамбле составляет $d = 5$ нм, а их длина $l = 20$ мкм? Расстояние между ближайшими атомами углерода в нанотрубках $a = 0,142$ нм, масса атома углерода $m_C = 1,994 \cdot 10^{-26}$ кг **(8 баллов)**.

Задача 6. Карбидизация тонкого слоя (20 баллов)

Для модификации тонких приповерхностных слоев толщиной от единиц до десятков нанометров применяют метод ионной имплантации. Ионизированные атомы ускоряются в однородном электростатическом поле, далее они поступают в сепаратор с однородным магнитным полем, которое позволяет отделить нужные ионы от остальных примесей. После этого ионы, имея достаточную энергию, внедряются в подложку (см. рисунок 1).

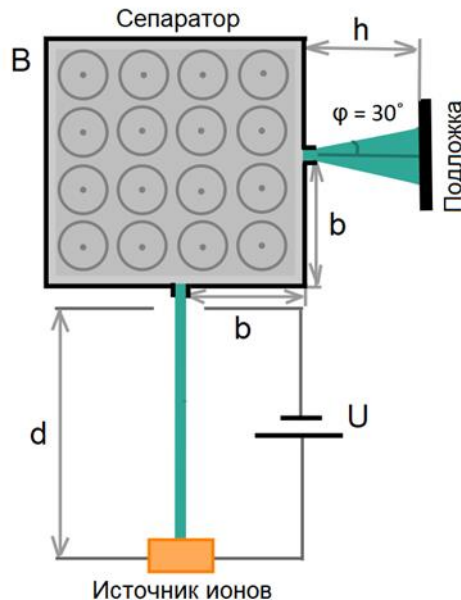


Рис.1. Схема эксперимента по ионной имплантации

1. В эксперименте на поверхности пластины Si создают тонкий слой SiC. С этой целью на подложку в течение времени $\Delta t = 30$ мин имплантируют однозарядные ионы углерода $^{12}\text{C}^+$, которые ускоряются в поле с разностью потенциалов $U = 20$ кВ. Какова будет скорость ионов в середине ускоряющей камеры и на выходе из нее? Начальную скорость считать нулевой. **(8 баллов)**
2. Попадая в сепаратор через входную щель, ионы $^{12}\text{C}^+$ должны вылететь из выходной щели. Какое магнитное поле B необходимо для этого приложить? Известно, что расстояние $b = 40$ см. **(6 баллов)**
3. После выхода из сепаратора ионы попадают в дрейфовую зону, где на них не действуют внешние электромагнитные поля. За счет электростатического взаимодействия ионов в этой зоне пучок расходится на угол 30 градусов, и попадает на подложку, которая находится на расстоянии $h = 5$ см от выходной щели. Какова будет плотность ионного тока j на подложке, если диаметр выходной щели $D = 5$ мм и за время имплантации на подложку попадает $N = 10^{18}$ ионов? **(6 баллов)**

Задача 7. Наноактюаторы (20 баллов)

В последнее время всё большую популярность приобретают наноактюаторы, то есть наномеханические устройства, которые способны производить механическое перемещение объектов. Одними из таких устройств являются электростатические актюаторы, которые представляют собой систему плоскопараллельных конденсаторов. Подобные наноустройства теоретически можно использовать для определения силы адгезии между белковой макромолекулой и подложкой.

1. На рисунке 2 представлена схема реализации одного из таких актюаторов. Определите, в каких направлениях он может перемещать белок, лежащий на подложке между обкладками конденсатора. Ответ обоснуйте. **(3 балла)**

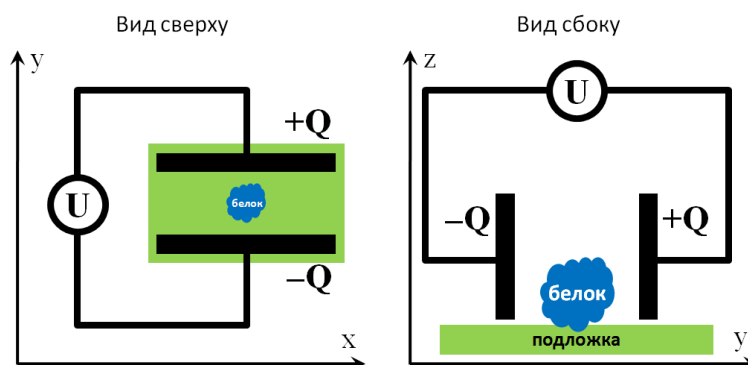


Рис. 2. Схема актюатора, основанного на конденсаторах

2. Используя данные по перемещению белковой макромолекулы (рисунок 3), рассчитайте силу сопротивления подложки, которая является аналогом силы трения между макрообъектами. Расстояние между пластинами конденсатора $d = 90$ нм, молекула белка имеет заряд $q = 1,44 \cdot 10^{-16}$ Кл. **(8 баллов)**

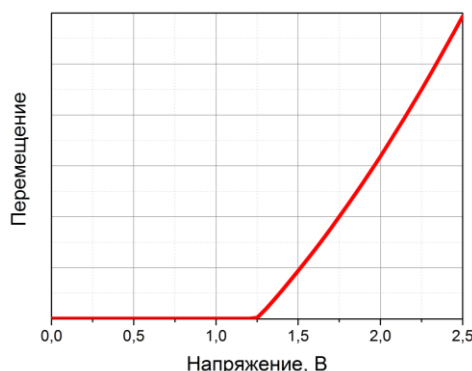


Рис. 3. Зависимость перемещения макромолекулы от напряжения

3. Какова природа сил адгезии белка и электронейтральной подложки? **(3 балла)**
4. Оцените время, за которое рассмотренный актюатор способен переместить белковую макромолекулу, имеющую массу $m = 5 \cdot 10^{-19}$ кг и заряд $q = 1,44 \cdot 10^{-16}$ Кл, на расстояние $L = 30$ нм, если его приводит в действие обычная батарейка с постоянным напряжением $U = 1,5$ В. **(6 баллов)**

Задача 8. Прыгающие наночастицы (20 баллов)

Известно, что при исследовании одиночных наночастиц в сканирующем (растровом) электронном микроскопе (РЭМ) возможны эффекты их спонтанных перемещений в результате зарядки во время облучения электронным пучком.

1. Останется ли на месте наночастица диоксида кремния радиусом $r = 25$ нм в процессе ее наблюдения в РЭМ, если сила тока электронного пучка составляет $I = 1$ пА, сканирование квадрата со стороной $l = 1$ мкм занимает время $\tau = 0.1$ сек, а ван-дер-ваальсова сила притяжения наночастицы к подложке равна $F = 7$ нН? Коэффициент поглощения электронов подложкой $k_1 = 0.1$, коэффициент поглощения электронов наночастицей $k_2 = 0.05$. Нагревом наночастицы при облучении электронным пучком пренебречь. **(15 баллов)**
2. Изменится ли ответ, если пренебречь силой тяжести, действующей на наночастицу? Плотность $\rho = 2$ г/см³. **(2 балла)**
3. Предложите возможные подходы для устранения описанного нежелательного эффекта спонтанных перемещений наночастиц при их исследовании в РЭМ. **(3 балла)**