

**VIII Всероссийская Интернет – олимпиада  
«Нанотехнологии – прорыв в будущее»**

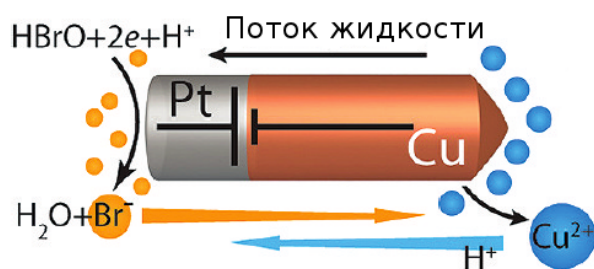


**NANNOΣ 8**

**ФИЗИКА**

**Задания для 7 – 11 класса**

## 1. Наноторпеда (9 баллов)

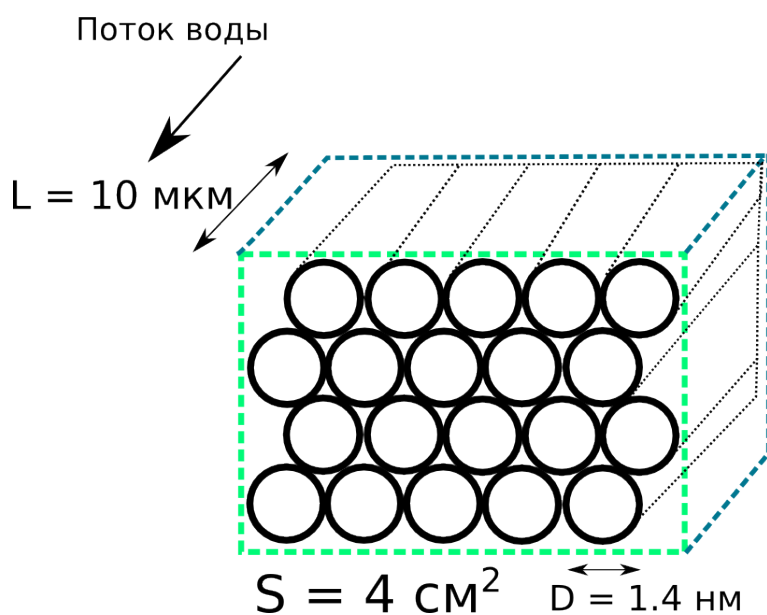


Химики из университета Пенсильвании изобрели наноторпеду: стержень, который работает как батарейка и мотор в одном лице. Длина стержня составляет около 3 мкм, а его толщина  $d = 200$  нм. Если стержень поместить в раствор брома или иода, он начинает двигаться. Медь начинает окисляться, играя роль анода, в то время как

платина играет роль катода. Это приводит к тому, что на концах стержня появляется напряжение  $V = 1$  В, и через него протекает ток с плотностью  $i = 1$  мА/см<sup>2</sup>. Торпеда способна разогнаться до скорости  $v = 10$  мкм/с. Учёные считают, что подобные устройства можно использовать, например, для доставки лекарств в организме человека или для очистки сосудов. Траекторией движения можно управлять с помощью магнитного поля.

1. Объясните, почему движется наноторпеда? (2 балла)
2. В каком направлении? (1 балл)
3. Оцените КПД двигателя наноторпеды (4 балла).
4. Найдите максимально возможную скорость торпеды (2 балла).

## 2. Нанотрубчатая вода (8 баллов)



Американские учёные из национальной лаборатории Аргонн заполнили поры углеродных нанотрубок диаметром  $D = 1.4 \text{ нм}$  и длиной  $10 \text{ мкм}$  водой.

Оказалось, что такая вода обладает необычными свойствами. По структуре вода скорее напоминает кристалл льда, т. к. её молекулы строго упорядочены. Вода, по утверждению исследователей, не замерзает вплоть до температуры  $8 \text{ К}$ , сохраняет текучесть и

способность перемещаться вдоль нанотрубки. Любопытно, что между водой и стенкой нанотрубки образуется зазор шириной  $k = 0.2 \text{ нм}$ .

### Задача

Русский изобретатель Василий предлагает использовать нанотрубки для создания водяного фильтра. Василий считает, что такой фильтр поможет очистить воду от загрязнений и болезнетворных бактерий. Согласно чертежам изобретателя, площадь поперечного сечения фильтра составляет  $S = 4 \text{ см}^2$ . Фильтр должен иметь пропускную способность  $Q$  не менее  $10 \text{ л/мин}$  для удобного использования в быту.

1. Какая должна быть разница давлений  $\Delta p$  в системе городского водоснабжения, чтобы изобретение Василия работало? (6 баллов)

2. Какова должна быть высота  $h$  водонапорной башни? (2 балла)

Вязкость воды  $\eta$  считать равной  $10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

### 3. Атомно-слоевое осаждение (5 баллов)

Атомно-слоевое осаждение (АСО) – процесс контролируемого выращивания тонких пленок с возможностью управления толщиной осаждаемого слоя на атомарном уровне ( $\sim 0,1 \text{ \AA}$ ). Изначально метод был предложен профессором С.И. Кольцовым из Ленинградского технологического института в начале 1960-х годов и носил название "Молекулярное наслаивание". В настоящее время АСО-технология (в англ. литературе ALD – Atomic Layer Deposition) используется в процессе производства солнечных элементов, плоских панельных дисплеев, микропроцессоров, головок чтения для жестких дисков, и т.д. Тонкие пленки, полученные методом АСО характеризуются высокой однородностью, прецизионным контролем толщины и практически полным отсутствием дефектов, что, однако, определяет и основной недостаток метода – относительно низкую скорость роста пленок.

В лаборатории на двух установках по атомно-слоевому осаждению на кремниевые подложки наносят тонкие пленки оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) одинаковой толщины, равной  $h=31,5 \text{ \AA}$ . Сначала лаборант-технолог запускает процесс роста слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на первой установке, а затем переходит на вторую и запускает осаждение пленки  $\text{TiO}_2$ . При этом, наблюдая за ходом обоих процессов на едином пункте управления, он замечает, что окончание процессов роста произошло одновременно.

1. Определить продолжительность (в минутах) осаждения пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , если известно, что время между последовательными запусками процессов на первой и второй установках составляет  $\Delta t=2$  минуты, а скорость роста диоксида титана на  $\Delta v=0,02 \text{ нм/с}$  больше, чем скорость роста оксида алюминия (3 балла).

2. Оценить, какое время (в часах) понадобится для получения пленки диоксида титана толщиной 1 мкм? (2 балла).

**Максимальная оценка – 5 баллов**

#### 4. Брэгговское зеркало (13 баллов)

Брэгговское зеркало (или распределенный диэлектрический отражатель) представляет собой набор ультратонких (от десятков до сотен нанометров) слоев из прозрачных материалов с периодически меняющимся показателем преломления  $n$ . Оптические толщины слоев подбираются таким образом, чтобы при падении света на такую структуру возникающая интерференция для отраженных от границ раздела сред лучей приводила бы к их взаимному усилению. В результате в определенном диапазоне длин волн такая многослойная структура начинает очень эффективно (с коэффициентом  $\sim 100\%$ ) отражать свет, несмотря на то, что каждый ее слой в отдельности прозрачен. Принцип такого распределенного отражателя широко используется, например, в одномерных фотонных кристаллах, интерференционных светофильтрах и т.п.

В простейшем случае Брэгговское зеркало состоит из последовательности двух чередующихся слоев с различными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  (пусть для определенности  $n_1 < n_2$ ). Известно, что при нормальном падении монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  на такую многослойную структуру для достижения эффективного отражения необходимо выполнение следующего условия интерференционного максимума для отраженных лучей:

$$2\Lambda = m\lambda,$$

которое называется условием Брэгга ( $\Lambda$  – период структуры,  $m$  – целое число). При этом чаще всего оптические толщины каждого из слоев выбирают равными четверти длины волны падающего света (в условии Брэгга  $m=1$ ).

1. Почему оптические толщины слоев простейшего Брэгговского зеркала выбирают равными именно  $\lambda/4$ , и что изменится, если эти толщины выбрать в виде любой другой комбинации, дающей в сумме  $\lambda/2$ ? Ответ обосновать. (5 баллов)

2. Как качественно изменится коэффициент отражения, если оптические толщины слоев взять равными  $\lambda/2$  (в условии Брэгга  $m=2$ )? Ответ обосновать. (8 баллов)

**Максимальная оценка – 13 баллов**

## 5. Биофизика клеточных мембран (8 баллов)

Если концентрация какого-либо иона внутри клетки отлична от концентрации этого иона снаружи и клеточная мембрана для него проницаема, то возникает поток заряженных частиц через мембрану. При этом нарушается электрическая нейтральность клетки и между внутренней и наружной поверхностями мембраны образуется разность потенциалов, препятствующая дальнейшему перемещению ионов. В конечном итоге поток ионов останавливается и наступает термодинамическое равновесие.

1. Рассчитайте по формуле Нернста разность потенциалов на мембране некоторой клетки при температуре  $36^{\circ}\text{C}$ , если она определяется переносом ионов калия. (2 балла). Концентрация калия внутри клетки равна  $C_{\text{внут}} = 92$  ммоль/л, а снаружи –  $C_{\text{внеш}} = 5$  ммоль/л.

2. Рассчитайте, какая доля ионов калия (%) должна перейти из клетки в межклеточную среду, чтобы создать такую разность потенциалов. (5 балла) Радиус клетки считать равным 5 мкм, толщину мембраны – 4 нм, диэлектрическая проницаемость липидов мембраны  $\epsilon = 2,3$ .

3. Рассчитайте напряженность электрического поля, под действием которого находится мембрана клетки. (1 балл)

## 6. Прыгающие капли (14 баллов)

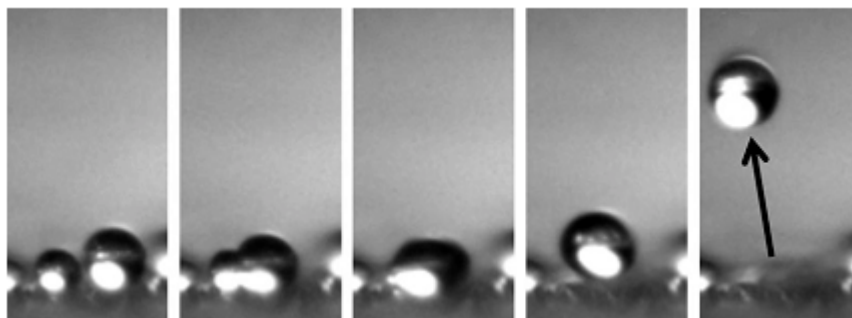


Рис.1 Кадры высокоскоростного видео: формирование подпрыгивающей капли.

Оказывается, достаточно маленькие капли при слиянии могут подпрыгивать (рис. 1).

1. Объясните, откуда в капле берется энергия для прыжка и почему прыгают только относительно маленькие капли. Рассчитайте энергию, высвобождающуюся при слиянии двух капель воды радиусом 7 мкм. (2,5 балла)

2. Оцените начальную скорость и максимальную высоту, на которую может подпрыгнуть капля, образовавшаяся при слиянии двух одинаковых капель радиусом 7 мкм. Однако, высота прыжка таких капель, как правило, не превышает нескольких миллиметров (рис. 2а). Поясните, почему расчетная величина отличается от экспериментальной. (3 балла)

3. Очевидно, что обладающая избыточной энергией капля воды далеко не всегда будет прыгать. Предложите подробный механизм подпрыгивания капли. (3 балла)

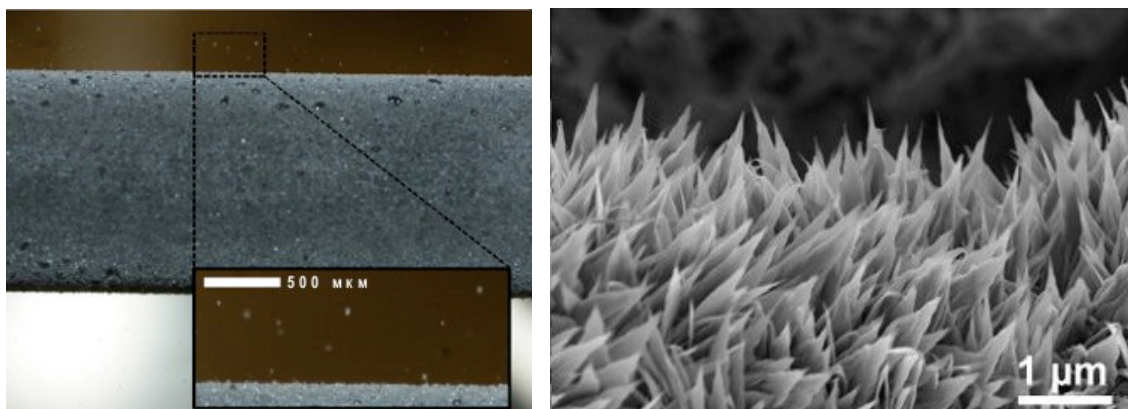


Рис. 2 Поверхность трубки второго типа: а) слияние растущих капель конденсата может сопровождаться подпрыгиванием итоговой капли. б) микроструктура поверхности.

В поисках оптимальных материалов для конденсационных теплообменников (например, змеевиков) ученые исследовали 2 типа металлических трубок. Первый тип – это обычные медные трубки, второй – медные трубки, последовательно обработанные горячим щелочным раствором хлорита натрия и фторированным силаном (рис. 2б). Оказалось, что только на трубках второго типа наблюдались прыгающие капли (рис. 2а).

4. Как меняется смачиваемость поверхности медной трубки на каждом из этапов модификации? Почему капли не хотят прыгать на поверхности обычной медной трубки, но отлично прыгают на модифицированной? Ответы поясните. **(2 балла)**

5. Поясните, как именно влияет модификация поверхности медной трубки на эффективность конденсации водяного пара и на эффективность теплообмена. Какую роль при этом, помимо прочего, играют прыгающие капли? **(3,5 балла)**



## 7. Сокровища горного тролля (9 баллов)

Как-то раз друзья подшутили над горным троллем и смешали все его богатства. Надо сказать, что тролль был небольшим, потому и сокровища у него были соответствующие. Размеры всех драгоценных камней и слитков благородных металлов были дотошно перечислены в амбарной книге горного тролля, поэтому он не долго горевал, а быстро догадался, как рассортировать свое добро заново.

Амбарная книга горного тролля			
	плотность, г/см <sup>3</sup>	диаметр, нм	
алмазы	3,5	100, 5000	1000,
изумруды	2,7	100, 5000	1000,
золото	19,5	100, 5000	1000,

Достал тролль из своих кладовых прозрачный цилиндр, наполнил его чистой водой из горного ручья и стал брать из кучи драгоценности поштучно, начиная с самых крупных. Он аккуратно бросал их в цилиндр, чтобы, как древний Архимед, определить объем. Не тут-то было: не капает вытесненная вода из носика заполненного до краев цилиндра... Однако наш тролль оказался находчивым - засыпал все свои сокровища в цилиндр, достал хронометр, и дело у него пошло на лад.

1. Почему горный тролль не смог воспользоваться законом Архимеда? (2 балла)

2. Какой способ разделения драгоценностей в итоге выбрал тролль? Подробно опишите его принцип. (2 балла)

3. Какие драгоценности горный тролль отделит быстрее всего, а какие – медленнее всего? Запишите в общем виде формулу для времени выделения отдельных сокровищ. Все ли драгоценности удастся разделить за сутки?(3,5 балла)

4. Будь у горного тролля современная лаборатория, каким прибором вы бы посоветовали ему воспользоваться, чтобы ускорить процесс разделения богатств при помощи им выбранного способа? Ответ поясните. (1,5 балла)

Вязкость воды  $8,94 \cdot 10^{-4}$  Па·с, плотность 1 г/см<sup>3</sup>, высота стакана 1 см. Все драгоценности считать идеально смачиваемыми шариками.

## 8. Физическая адсорбция (12 баллов)

Простейшая модель обратимой физической адсорбции азота (при  $T = 85\text{K}$  и  $p_{\text{N}_2(\text{г})} \sim 1 - 10$  мм.рт.ст.) рассматривает всю поверхность некоторого Материала Икс как набор равнодоступных и одинаковых площадок (адсорбционных центров)  $S$ , каждая из которых может быть занята только одной молекулой. Уравнение реакции и константа равновесия этого процесса могут быть записаны как:



где  $[\text{N}_{2(\text{ад})}]$  и  $[S]$  – доли занятых и свободных адсорбционных центров на поверхности,  $p_{\text{N}_{2(\text{г})}}$  – парциальное давление азота.

1. Выделяется или поглощается энергия в процессе физической адсорбции? Каким образом молекулы азота удерживаются на поверхности? Почему в указанных условиях используется азот, а не гелий? Какими способами можно удалить адсорбированный азот с поверхности? (2 балла)

2. Выведите зависимость степени заполнения поверхности Материала Икс ( $\theta$ ) от  $p_{\text{N}_{2(\text{г})}}$  в мм.рт.ст, если известно, что при давлениях 1,5 и 5,8 мм.рт.ст. количество азота, адсорбированного пятью граммами Материала Икс, составляет  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $7 \cdot 10^{-3}$  моль, соответственно. (2 балла)

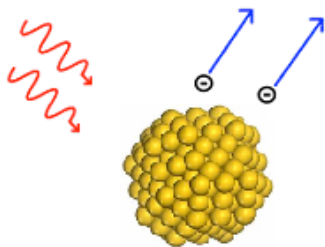
3. Рассчитайте удельную площадь поверхности Материала Икс (в  $\text{м}^2/\text{г}$ ), если молекула азота занимает на его поверхности квадрат площадью  $16 \text{ \AA}^2$ . (2 балла)

4. Почему определенная таким способом величина удельной площади поверхности может отличаться от реальной? (1 балл)

5. Оцените средний радиус (нм) и общую длину (м/г) пор в Материале Икс, если его истинная плотность составляет  $2,95 \text{ г/см}^3$ , а кажущаяся –  $1,1 \text{ г/см}^3$ ? При расчете считать образец кубом, пронизанным цилиндрическими порами. (4 балла)

6. Где может найти применение материал с такими, как у Материала Икс, характеристиками? (1 балл)

## 9. Фотоионизация нанокластера: электростатическая модель (10 баллов)



Энергия ионизации  $E$  – это минимальная энергия, которую необходимо затратить для перемещения электрона из твердого тела на бесконечность. В общем случае она складывается из работы выхода электрона  $W$  и классической работы  $A$ , которая необходима для преодоления электроном электростатического поля твердого тела:

$$E = W + A$$

Рассмотрим незаряженный шар радиуса  $R$  из материала с работой выхода  $W$ .

1. Чему при этом равны энергии удаления одного и  $m$  электронов ( $E_1$  и  $E_m$ , соответственно)? (2 балла) Электрон может быть удален, например, под действием света (фотоэффект).

2. Рассчитайте красную границу фотоэффекта ( $\lambda_{\max}$ , нм) для объемного образца и нанокластера\* натрия. Почему отличаются полученные значения  $\lambda_{\max}$ ? Каким цветам видимого спектра они соответствуют? (3 балла)

Рассмотрим последовательную ионизацию нанокластера металла радиуса  $R$  из материала с работой выхода  $W$ :



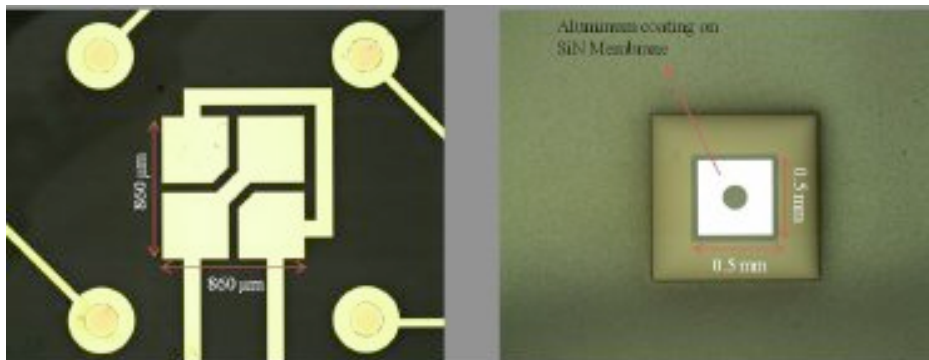
3. Выведите формулу энергии последовательной ионизации  $E'_i$  (т.е., энергию процесса  $\text{Me}_n^{(i-1)+} \rightarrow \text{Me}_n^{i+} + e^-$ ). (2 балла)

4. Рассчитайте максимальный заряд нанокластера\* натрия при ионизации ультрафиолетовым лазером с длиной волны 200 нм. (3 балла)

\* Нанокластер имеет форму шара и содержит 14000 атомов натрия.

Работу выхода натрия считать равной 2,39 эВ, плотность натрия 0,971 г/см<sup>3</sup>. Все рассматриваемые процессы протекают в вакууме.

## 10. Миниатюрный радиопередатчик (5 баллов)



Современная микроэлектроника развивается стремительно. Продолжают уменьшаться характерные размеры элементов микросхем, возрастает несущая частота для радиопередачи данных.

Студент решил спроектировать радиопередатчик, в основе которого находится колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора. Он предположил, что катушка индуктивности имеет  $N = 10^4$  витков, намотанных на диэлектрический стержень, диаметра  $d = 200$  нм. Обкладки конденсатора представляют собой две соосные проводящие трубки, изолированные друг от друга. Пространство между обкладками заполнено воздухом. Диаметр меньшей равен  $d = 200$  нм, а большей  $2d = 400$  нм. Длина конденсатора такая же, как и катушки индуктивности. Площадь поперечного сечения соединительных проводов  $S = 0,003$  мм<sup>2</sup>.

1. Найдите индуктивность катушки единичной длины и ёмкость конденсатора единичной длины (**2 балла**).
2. Определите несущую частоту радиопередатчика. (**1 балл**).
3. Найдите максимальное значение плотности тока в соединительных проводах, если обкладкам конденсатора сообщить максимальный заряд  $q = 10^{-3}$  нКл (**2 балла**).

**Максимальная оценка – 5 баллов**

## 11. Оптическая спектроскопия наноструктур (7 баллов)

Один из способов создания наноструктур – нанесение тонких слоев на подложку. Это может быть метод электронно-лучевой эпитаксии или плазмохимическое осаждение. Нанесенные на подложку пленки могут быть исследованы различными оптическими методами. Например, очень полезной может быть информация, полученная из спектров отражения. На рисунке 1 представлен спектр зеркального отражения пленки, нанесенной на кварцевую подложку. Красная кривая соответствует падению луча под углом  $13^\circ$ , а синяя под  $45^\circ$ .

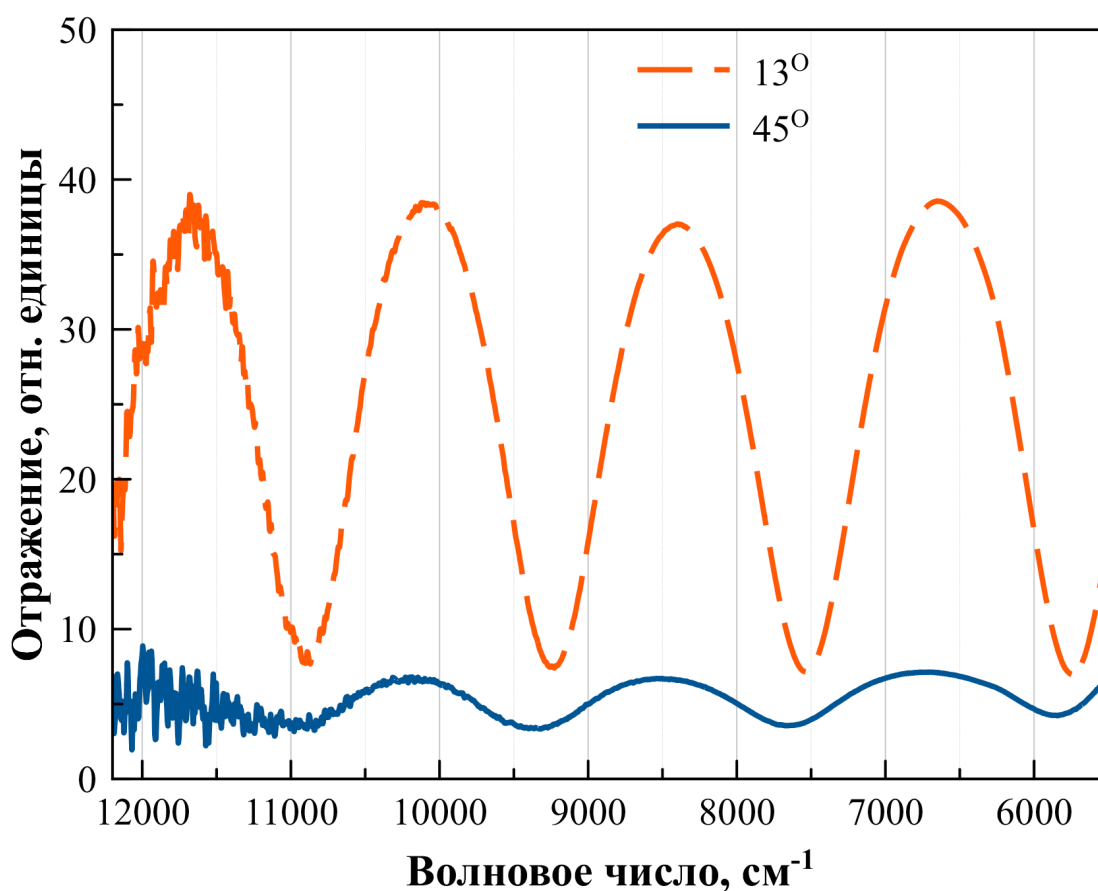


Рисунок 1: Спектр отражения пленки под углами  $13^\circ$  и  $45^\circ$  градусов.

По оси абсцисс отложено волновое число, которое в спектроскопии принято считать, как обратную длину волны.

1. Определите в каком спектральном диапазоне проводились измерения (1 балл).
2. Объясните какое явление наблюдается, и почему положение минимумов и максимумов в спектрах отражения под разными углами не совпадает (2 балла).
3. Определите показатель преломления и толщину пленки. (4 балла).

**Максимальная оценка – 7 баллов**