

## 6 семестр

### **1. Общие проблемы измерений**

Методы измерений: отклонений, разностный, нулевой. Стратегии измерений: когерентные и случайные выборки, мультиплексирование. Погрешности аналоговых и цифровых измерительных устройств. Систематические и случайные ошибки. Источники ошибок. Помехи, шумы. Характеристики измерительных систем: чувствительность, порог обнаружения, разрешающая способность, динамический диапазон, нелинейность, полоса пропускания. Статистические и спектральные характеристики случайных величин. Функция распределения случайной величины. Преобразование сигналов. Частотный спектр. Преобразование Фурье.

### **2. Электрические цепи для передачи импульсных сигналов**

Цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Импеданс. Описание распространения сигналов в длинных линиях, телеграфные уравнения. Волновые процессы в линии передачи без потерь. Фазовая скорость. Волновое сопротивление. Линия с малыми потерями. Неискажающая линия. Коэффициент отражения. Интерференция падающей и отраженной волн. Согласование линий. Аналог закона Ома для длинных линий. Распространение волн в идеальных линиях и в линиях с потерями, коэффициент затухания и фазовая постоянная. Длинные линии для передачи сигналов различной частоты. Электрические и диэлектрические волноводы.

### **3. Оптическая спектроскопия**

Поглощение света веществом. Закон Ламберта–Бугера–Бэра. Спектры поглощения, испускания и рассеяния. Радиационное время жизни и истинное время жизни возбужденного состояния. Интенсивность спектральных линий. Форма и ширина спектральной линии. Естественное, доплеровское и столкновительное уширение спектральных линий. Аппаратная ширина линии.

Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта. Принцип действия фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Приемники излучения на основе внутреннего фотоэффекта. Шумы и порог чувствительности детекторов электромагнитного излучения. Квантовый выход. Приемники излучения для различных спектральных диапазонов. Классы спектральных приборов: спектроскопы, спектрографы, спектрофотометры, монохроматоры, полихроматоры. Диспергирующие элементы спектральных приборов: призма, дифракционная решетка, интерферометр. Разрешающая способность спектральных приборов.

Спектральные диапазоны и соответствующие им степени свободы в молекулярных системах. Вращательные спектры и микроволновая спектроскопия. Модель жесткого ротатора. Колебательные спектры и инфракрасная спектроскопия. Гармонический и ангармонический осцилляторы. Колебания многоатомных молекул. Колебательно-вращательные переходы в двухатомной молекуле. Электронные переходы и спектроскопия в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Диссоциационный предел спектра. Определение энергии диссоциации. Спектроскопия комбинационного рассеяния. Спектральные методы измерения температуры в неравновесных системах.

Люминесценция и ее подтипы. Флуоресцентная спектроскопия. Флуоресценция и фосфоресценция. Квантовый выход флуоресценции и время жизни возбужденного состояния. Процессы тушения флуоресценции. Поляризация флуоресценции, ее применение. Безызлучательный перенос энергии и оценка расстояния между хромофорными группами.

#### **4. Измерение температуры**

Понятие температуры в равновесных и неравновесных системах. Контактные и бесконтактные методы измерения температуры. Равновесное излучение. Формула Планка. Яркостная, цветовая и радиационная пирометрия. Методы измерения температуры электронов и тяжелых частиц.

### 7 семестр

#### **5. Лазерная спектроскопия**

Когерентное оптическое усиление в активной среде. Пороговая инверсная заселенность уровней. Устройство лазера. Газовые, твердотельные, жидкостные лазеры. Модовый состав лазерного излучения. Перестройка частоты лазерного излучения. Генерация коротких импульсов: методы модуляции добротности и самосинхронизации мод. Преимущества применения лазеров в качестве источников света в спектроскопии. Абсорбционный, внутрирезонаторный, оптико-акустический и флуоресцентный методы лазерной спектроскопии.

#### **6. Радиоспектроскопия**

Магнитные моменты электрона, ядер и атомов. ЯМР-активные ядра. Гиромагнитное отношение и  $g$ -фактор. Спин в постоянном магнитном поле. Магнитный момент и Ларморова прецессия. Уравнение Блоха. Поглощение энергии ВЧ-поля системой ядерных спинов. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса. Химический сдвиг: константа экранирования, единицы измерения, магнитно-эквивалентные ядра. Спин-спиновое взаимодействие,

спектры первого порядка, простые правила интерпретации сверхтонкой структуры. Применение метода ЯМР для исследования структуры и динамики молекул. Обменные явления: медленный и быстрый обмен. Принципиальная схема ЯМР-спектрометра. Требования к однородности постоянного магнитного поля; способы минимизации аппаратурного уширения линий. Интенсивность и ширина линий спектра ЯМР. Продольная (спин-решеточная) и поперечная (спин-спиновая) релаксация, методы их измерения. Импульсные методы ЯМР:  $90^\circ$  и  $180^\circ$  импульсы. Фурье-спектроскопия ЯМР. Спиновое эхо.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса. Сверхтонкая структура спектра ЭПР. Структурные и динамические характеристики вещества, определяемые методами ЭПР. Принципиальная схема ЭПР-спектрометра. Особенности регистрации сигналов ЭПР: волноводы и резонаторы, низкочастотная модуляция поляризуемого магнитного поля, запись спектров в виде производной. Сопоставление частотных диапазонов и ширины линий ЭПР и ЯМР.

## **7. Измерение давления и вакуумная техника**

Физические границы низкого, высокого и сверхвысокого вакуума. Различные режимы течения газа. Процессы переноса при различных давлениях и температурах: диффузия, вязкость, теплопроводность. Проводимость элементов вакуумных систем. Методы получения вакуума, классификация вакуумных насосов по принципу их действия. Напуск газа в вакуумную камеру. Измерение давления в вакуумных системах. Механические, пьезоэлектрические, тепловые и ионизационные манометры, принципы их действия. Физические ограничения диапазонов применимости различных манометров. Течи в вакуумной системе и их влияние на скорость откачки и предельный вакуум. Методы обнаружения течей.

## **8. Масс-спектрометрия**

Метод масс-спектрометрического анализа. Единицы измерения массы, применяемые в масс-спектрометрии. Блок-схема масс-спектрометра. Аналитические характеристики масс-спектрометра: точность измерения масс, разрешающая способность, динамический диапазон, порог детектирования, чувствительность. Методы ионизации: ионизация электронным ударом, химическая ионизация, фотоионизация, полевая ионизация, полевая десорбция, бомбардировка быстрыми атомами, матричная лазерная ионизация десорбцией (MALDI), электроспрей. Молекулярные, осколочные, квазимолекулярные ионы. Метастабильные ионы. Методы детектирования ионов. Масс-анализаторы: принципы действия, разрешающая способность. Сек-

торный магнитный масс-анализатор, квадрупольный масс-анализатор, квадрупольные ионные ловушки, времяпролетный масс-анализатор, масс-спектрометр ионно-циклотронного резонанса с преобразованием Фурье. Решение структурных задач методами масс-спектрометрии. Тандемная масс-спектрометрия. Селекция ионов. Методы фрагментации ионов. Комбинации масс-спектрометра с жидкостным и газовым хроматографами. Применение масс-спектрометрии для решения задач биологии, химии, анализа окружающей среды, фармакологии, построения систем безопасности.

## 9. Хроматография

Физическая и химическая адсорбция. Адсорбционно-десорбционное равновесие. Изотермы адсорбции. Изотермы Ленгмюра, Генри, полислойной адсорбции. Адсорбция и распределение, как основа хроматографического разделения. Закон распределения Нернста. Хроматографическое разделение смеси веществ. Принципиальное устройство и схема работы хроматографа. Кинетика адсорбции-десорбции в потоке подвижной фазы. Концепция теоретических тарелок. Основные выводы теории теоретических тарелок. Ширина и форма хроматографического пика. Уравнение Ван-Деемтера. Аналитические характеристики хроматографической системы и отдельных её элементов.

Устройство газового хроматографа. Набивные и капиллярные хроматографические колонки, их параметры. Детекторы в газовой хроматографии. Зависимость времени удерживания от температуры. Хроматография с программируемым нагревом.

Жидкостная хроматография. Высокоэффективная жидкостная хроматография (HPLC). Нормально-фазовая и обращено-фазовая хроматография. Разделение полимеров с помощью гелепроникающей хроматографии. Понятие об ионообменной хроматографии. Изократическое и градиентное элюирование. Зависимость времени удерживания от состава подвижной фазы. Устройство жидкостного хроматографа. Детекторы в жидкостной хроматографии.

### **Промежуточная и итоговая аттестация по дисциплине «Физические методы исследований»**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физические методы исследований» в **7 семестре** осуществляется в форме дифференцированного зачёта и устного экзамена по билетам, которые формируются согласно содержанию программы курса **обоих семестров**. Зачёт включает в себя следующие этапы:

- защита домашних заданий и проверка теоретических знаний студента;
- выполнение и сдача лабораторных работ

## **Критерии оценивания знаний, умений и навыков работы по дисциплине «Физические методы исследования»**

По результатам защиты заданий текущего контроля за каждое задание выставляется оценка по 10-балльной шкале.

При выставлении оценки за устный экзамен учитываются ответы на вопросы экзаменационного билета и решение задачи (задач), а также ответы на уточняющие вопросы по билету и дополнительные вопросы по программе курса.

Оценка **«отлично (10)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса и за её пределами, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение уверенно делать обоснованный выбор в пользу определенного и/или комбинированного метода исследования при решении сложной нестандартной задачи с проведением всех необходимых оценок.

Оценка **«отлично (9)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение делать обоснованный выбор в пользу определенного и/или комбинированного метода исследования при решении нестандартной задачи с проведением всех необходимых оценок.

Оценка **«отлично (8)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение делать выбор в пользу определенного метода исследования с проведением всех необходимых оценок, однако при решении нестандартных задач допустившему некоторые несущественные неточности.

Оценка **«хорошо (7)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердые знания и уверенное понимание материала учебной программы и умение свободно применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач, однако при решении нестандартных задач допустил некоторые неточности.

Оценка **«хорошо (6)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач.

Оценка **«хорошо (5)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач, однако допустил при ответе ряд несущественных неточностей.

Оценка **«удовлетворительно (4)»** выставляется студенту, показавшему владение основными знаниями, необходимыми для правильного подхода к

решению типовых задач в объеме программы и продемонстрировавшему общее понимание теоретических основ физических методов исследования, однако демонстрируемые знания имеют разрозненный характер, что не препятствует дальнейшему обучению.

Оценка «**удовлетворительно (3)**» выставляется студенту, показавшему владение основными знаниями, необходимыми для правильного подхода к решению типовых задач в объеме программы, и продемонстрировавшему общее понимание теоретических основ физических методов исследования, однако демонстрируемые знания могут содержать некоторые пробелы и иметь несистемный разрозненный характер, что не препятствует дальнейшему обучению.

Оценки «**неудовлетворительно (2)**» или «**неудовлетворительно (1)**» выставляется студенту, если у него отсутствуют знания базовой составляющей дисциплины либо допускаются грубые ошибки в изложении материала, либо отсутствует владение терминологией, отсутствует умение находить правильные подходы к решению типовых задач в объеме программы курса.

### **Процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

#### ***Порядок проведения защиты заданий текущего контроля***

Для допуска к защите задания обучающийся должен решить все задачи из соответствующего задания. Процедура защиты задания проходит в специально отведенное время в форме коллоквиума по темам избранных задач. В процессе пояснения решения задач из задания преподаватель может задавать уточняющие вопросы из соответствующего раздела по программе курса.

#### ***Порядок выполнения и защиты лабораторной работы***

Для начала выполнения лабораторной работы обучающийся в начале занятия обязан пройти процедуру допуска с обязательной проверкой теоретических основ изучаемого метода исследования и правил техники безопасности. В случае, если обучающийся не продемонстрировал необходимый минимум знаний, то он не допускается к выполнению лабораторной работы, а продолжает теоретическую подготовку к выполнению работы.

Процедура защиты лабораторных работ осуществляется в период лабораторных занятий по расписанию. В процессе защиты лабораторной работы преподаватель может задавать уточняющие вопросы из соответствующего раздела по программе курса.

## ***Порядок проведения семестровой контрольной работы***

К семестровой контрольной работе допускаются все обучающиеся. Обычно семестровая контрольная работа проводится на зачетной неделе во время, отведенное для лекции согласно расписанию.

Время проведения семестровой контрольной составляет 80 минут. Студентам предлагаются для решения 4–5 оригинальных задач. Темы соответствуют темам семинарских занятий. Задача считается решённой, если она содержит обоснованное решение: ссылки на применяемые физические законы и корректные выкладки, а также промежуточные численные результаты и численный ответ. Разрешается пользоваться только собственноручно заполненным записями листом формата А4. Категорически запрещается использовать любые устройства, которые могут служить средствами связи – ноутбуки, планшеты, телефоны и т.п. Нарушители удаляются с контрольной работы с оценкой «неудовлетворительно». Разрешается пользоваться калькуляторами (кроме калькуляторов в носимых устройствах и т.п.).

## ***Порядок проведения дифференцированного зачета***

К промежуточной аттестации (дифференцированному зачету) в 6 семестре допускаются обучающиеся, защитившие домашние задания (на любую оценку отличную от 0) и лабораторные работы (не менее чем на оценку «удовлетворительно (3)»), а также написавшие семестровую контрольную работу. Обучающиеся, не защитившие хотя бы одно домашнее задание, не имеющие оценки за лабораторный практикум (либо имеющие оценку «неудовлетворительно»), а также не имеющие оценки за семестровую контрольную работу к промежуточной аттестации не допускаются. Оценка за дифференцированный зачет учитывает общую оценку за все лабораторные работы (ЛП) и оценку за семестровую контрольную работу (СКР). Общая оценка за лабораторные работы (ЛП) вычисляется как медиана оценок за отдельные лабораторные работы. Оценка за семестровую контрольную работу (СКР) вычисляется как сумма баллов за правильные решения задач семестровой контрольной работы (в тексте задач будет указано количество баллов, начисляемых за правильное решение) с учетом результатов защиты домашних заданий. По результатам защиты домашних заданий (за каждое задание) обучающимся будут начислены бонусные либо штрафные баллы по следующей схеме:

<b>Оценка за задание</b>	<b>Дополнительные баллы СКР</b>
«отлично» (8, 9, 10)	+2.5
«хорошо» (5, 6, 7)	+1.5
«удовлетворительно» (3, 4)	0
«неудовлетворительно» (1, 2)	-2.5

Во время зачетной сессии обучающимся предоставляется не более 2-х попыток пересдач оценок «неудовлетворительно», полученных за защиту домашних заданий. Минимальная возможная оценка за СКР – «неудовлетворительно (1)». Повторное написание семестровой контрольной работы не проводится. При отсутствии на семестровой контрольной работе по уважительной причине обучающемуся предоставляется возможность написания семестровой контрольной работы в дополнительное время по предварительному согласованию. Оценка за дифференцированный зачет рассчитывается по следующей формуле:  $0.4 \times \text{ЛП} + 0.6 \times \text{СКР}$ .

## ЗАДАНИЕ

### 1. Общие проблемы измерений

1.1. На масс-спектрометре проводят изучение фуллеренов. Разрешающая способность прибора позволяет различать изотопы с разницей масс до 1 а.е.м., а чувствительность прибора позволяет регистрировать только те изотопы, доля которых составляет не менее 1% от общего числа молекул. Какие изотопы фуллеренов  $C_{84}$  и  $C_{540}$  удастся зарегистрировать?

1.2. Определите минимальную мощность излучения, которую еще можно зарегистрировать с помощью фотоячейки без учета ее собственных шумов. Можно считать, что один фотон выбивает один электрон. Сопротивление резистора  $R = 100$  Ом. Паразитная емкость  $C = 1$  пФ, длина волны падающего света 500 нм. Фотокатод изготовлен из материала, работа выхода и постоянная Ричардсона для которого равны 0.85 эВ и  $1.3 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ ; площадь фотокатода равна  $1 \text{ cm}^2$ .

1.3. Разряд в газе наблюдается между плоскими электродами и условия эксперимента выбраны так, что каждый атом поверхности катода за время 1 мс с равной вероятностью может испустить любое количество электронов в интервале от 0 до 10. Каждый эмитированный электрон рождает в разрядном промежутке лавину из четырёх электронов. Определите среднее значение анодного тока и среднеквадратическое отклонение значения тока от среднего, если площадь поверхности катода составляет  $5 \text{ cm}^2$ .

1.4. Для измерения напряжения при комнатной температуре используется усилитель, входное сопротивление и емкость которого равны  $R = 1 \text{ МОм}$  и

$C = 100$  пФ соответственно. Вследствие микропробоев конденсаторов на входе усилителя имеется импульсный шум, который представляет собой случайные по направлению импульсы тока величиной  $I = 100$  нА длительностью  $\tau = 10$  мкс. Импульсы тока возникают с вероятностью 80% за время 1 мс. Определите среднеквадратические флуктуации напряжения на входе усилителя.

1.5. Многократное определение энергии адсорбции молекул дало результаты: 46, 48, 44, 38, 45, 47, 58, 65, 44, 45, 43 кДж/моль. Значения 58 и 65 кДж/моль кажутся в этом ряду неправдоподобно большими. Считая распределение результатов нормальным, определите, следует ли эти величины исключить из статистики как ошибочные.

1.6. Найдите временную зависимость напряжения  $U_{\text{вых}}$  в том случае, если  $U_{\text{вх}}$  представляет собой прямоугольный сигнал длительности  $\tau$ . Изобразите эти сигналы в одном масштабе для разных соотношений длительности времени сигнала и характерного времени цепи. Какие электротехнические диагностические устройства могут быть промоделированы такой цепочкой? Какое должно быть соотношение характерных времен, чтобы это измерительное устройство работало с минимальной погрешностью? Приведите возможные параметры  $L$  и  $R$ , если  $U_{\text{вых}}$  регистрируется с помощью осциллографа (см. рис. 1).

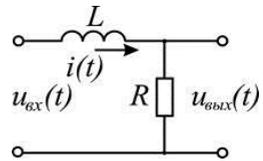


Рис. 1

1.7. На МКС в российском блоке работают два одинаковых источника шума. Если их оба выключить, то уровень шума, создаваемого охлаждающей системой, в определенной точке помещения составит 50 дБ. Если их оба включить, то уровень шума в помещении составит 60 дБ. Чему будет равен уровень шума в помещении, если включить только один источник шума? Какой уровень шума будет от двух источников, если в качестве опорной амплитуды шума взять амплитуду шума охлаждающей системой?

1.8. Оцените минимальную мощность излучения длиной волны 10 мкм, которую можно зарегистрировать с помощью фотодиода (полоса пропускания 1 Гц, площадь чувствительного элемента 1 см<sup>2</sup>) считая, что она ограничивается шумом, вызванным флуктуациями числа фотонов теплового излучения фона со средней плотностью потока 10<sup>18</sup> фотонов/(с·см<sup>2</sup>).

## 2. Электрические цепи для передачи импульсных сигналов

2.1. Рассчитайте коэффициент затухания электромагнитной волны длиной  $\lambda = 3$  см в коаксиальном кабеле со следующими параметрами: центральная жила – медь диаметром  $d = 0.5$  мм, внешняя медная оплетка имеет диаметр  $D = 5$  мм, изоляционный материал – полиэтилен с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.2$ . удельное сопротивление меди  $\rho = 1.72 \cdot 10^{-2}$  Ом мм<sup>2</sup>/м, утечкой через изоляцию можно пренебречь

2.2. С разных сторон на два последовательно соединенных коаксиальных кабеля одновременно подают два одиночных импульса различной полярности  $U_1 = -U_2 = 100$  В,  $\tau_1 = \tau_2 = 5$  мкс (см. рис. 2). Погонная емкость и индуктивность кабелей равна  $C_1 = 10^{-10}$  Ф/м,  $C_2 = 8/15 \cdot 10^{-10}$  Ф/м;  $L_1 = 2.5 \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $L_2 = 3 \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Осциллограф показывает форму и амплитуду сигнала на нагрузке R в зависимости от времени (масштаб, а также наибольшее и наименьшее значение напряжения указаны на рис. 3). Определить длину кабелей. Вычислить сопротивление нагрузки R. Определить значение напряжения на концах кабелей, с которых пришли импульсы, после того, как они пройдут нагрузку R. Затуханием в линиях пренебречь, считать генераторы импульсов согласованными с линиями.

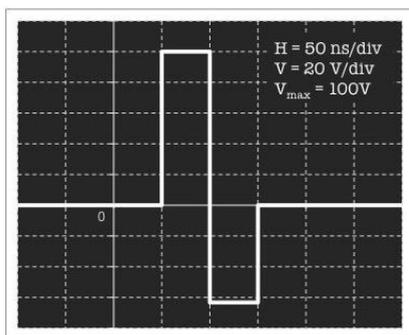
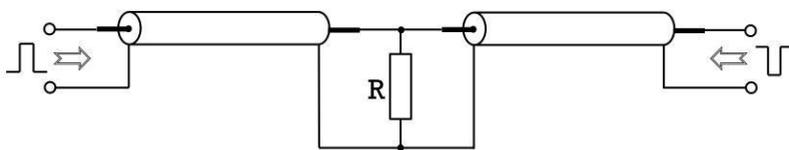


Рис. 2,3

2.3. Предложите схему симметричного разветвителя для трех кабелей с волновым сопротивлением  $\Omega$ . Каково будет напряжение в каждой из линий после точки разветвления? Как изменится величина активного согласующего сопротивления, если необходимо изготовить симметричный разветвитель для  $n$  одинаковых кабелей?

2.4. Отрезок коаксиального кабеля с волновым сопротивлением  $\Omega$  длиной  $l$  заряжается до напряжения  $U_0$  через большое сопротивление  $R \gg \rho, \Omega$ . Затем с помощью коммутатора подключается к нагрузке с активным сопротивлением  $\rho \neq \Omega$ , при этом в нагрузке появится импульс напряжения  $U_n(t)$ , параметры которого зависят от соотношения  $\rho$  и  $\Omega$ . Изобразите форму импульсов напряжения  $U_n(t)$  на активной несогласованной нагрузке при а)  $\rho < \Omega$  и б)  $\rho > \Omega$ . В чем будет их отличие от случая разрядки на согласованную нагрузку (см. рис. 4)?

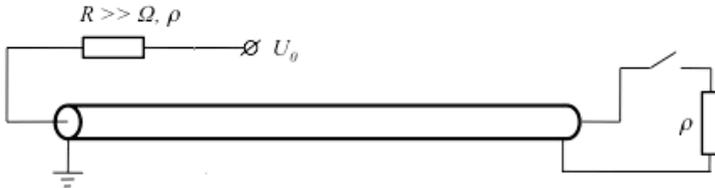


Рис. 4

### 3. Детекторы излучения

3.1 Для регистрации периодических импульсов монохроматического излучения имеется вакуумный фотодиод, в котором расстояние между плоскими электродами составляет  $d = 1$  см, падение напряжения на фотодиоде  $U = 100$  В, работа выхода электрона из фотокатода  $A = 3$  эВ. Пригоден ли данный фотодиод для измерения длительности импульсов, если излучение в импульсе является монохроматическим с длиной волны  $\lambda \sim 400$  нм, а длительность импульса  $\tau \sim 1$  нс?

3.2. Оцените минимальный поток квантов света, который может быть зарегистрирован ФЭУ при комнатной температуре. Фотокатод ФЭУ покрыт оксидным слоем (работа выхода электрона  $0.99$  эВ, постоянная Ричардсона  $B = 1.18$  А/(см<sup>2</sup>К<sup>2</sup>)), квантовый выход фотоэлектронов составляет  $\Upsilon = 10^{-3}$ .

3.3. Фотометрическая установка состоит из ФЭУ с 8-ю диодами, усилителя и счетчика импульсов. ФЭУ работает в режиме счета фотонов. Сигнал (напряжение на нагрузочном резисторе анода  $R$ ) подается на усилитель, а после усиления на счетчик импульсов. Для фотокатода данного ФЭУ эффективная постоянная Ричардсона  $A = 120 \text{ А}/(\text{см}^2\text{К}^2)$ ; работа выхода электронов 1.5 эВ; площадь фотокатода  $1 \text{ см}^2$ ; коэффициент вторичной электронной эмиссии диодов равен 4; емкость анода 20 пФ, сопротивление нагрузки  $R = 10 \text{ кОм}$ . Температура любой части установки 300 К. Оцените минимальную и максимальную частоту следования импульсов (скорость счета), которые можно наблюдать на данной установке в режиме счета фотонов, как можно расширить диапазон частот? Стандартная схема подключения ФЭУ представлена на рис. 5.

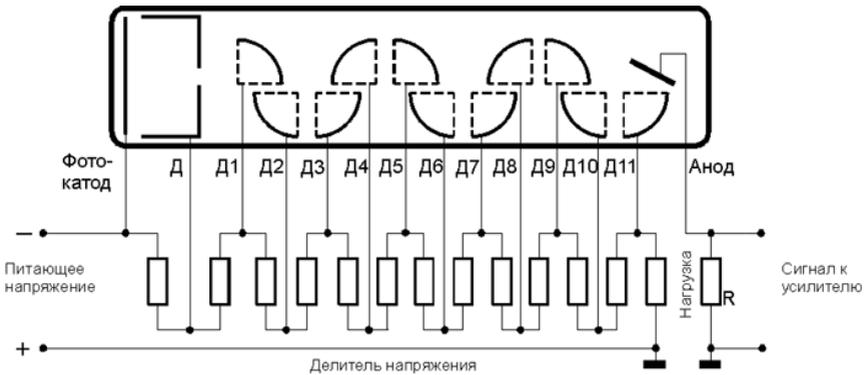


Рис. 5

#### 4. Общие вопросы спектроскопии

4.1. Оцените концентрацию гемоглобина в эритроците, если после разведения крови в 2000 раз и разрушения клеточных мембран световой поток ослабляется на 18.7% при прохождении кюветы толщиной 1 см. Коэффициент поглощения гемоглобина равен  $8 \times 10^4 \text{ л}/(\text{моль}\cdot\text{см})$ . Объемная доля эритроцитов в крови составляет 45%. С какой целью перед измерением проводится разбавление крови и разрушение клеточных мембран?

4.2. Уменьшения доплеровской ширины линий добиваются с помощью коллимации молекулярного пучка при истечении газа из малого отверстия (см. рис. 6). Коллимирующая щель шириной  $2b = 1 \text{ мм}$  расположена на расстоянии  $d = 5 \text{ см}$  от отверстия. Давление в объеме, в который втекает газ ( $\text{N}_2$ ), составляет  $p = 10^{-4} \text{ Торр}$ , то есть течение происходит в молекулярном режиме. Считая, что уширение линии обусловлено продольным эффектом

Доплера, оцените уширение линии ( $\nu_0 = 10^{15}$  Гц) при измерениях: а) вдоль ( $\delta\nu_{\parallel}$ ) и б) поперек ( $\delta\nu_{\perp}$ ) оси пучка.

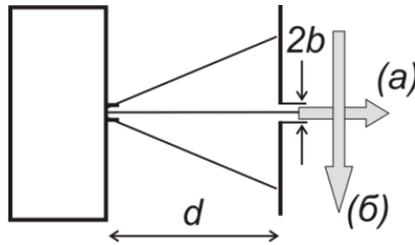


Рис. 6

## 5. Электронные, колебательные и вращательные спектры

5.1. На рис. 7 представлен спектр пропускания оксида углерода CO. Нарисуйте схему энергетических уровней молекулы с указанием переходов, наблюдаемых в данном спектре. Определите длину связи в молекуле CO. Покажите, что наличие слабых спутных линий можно объяснить изотопным расщеплением. Оцените, наличием каких изотопов оно обусловлено?

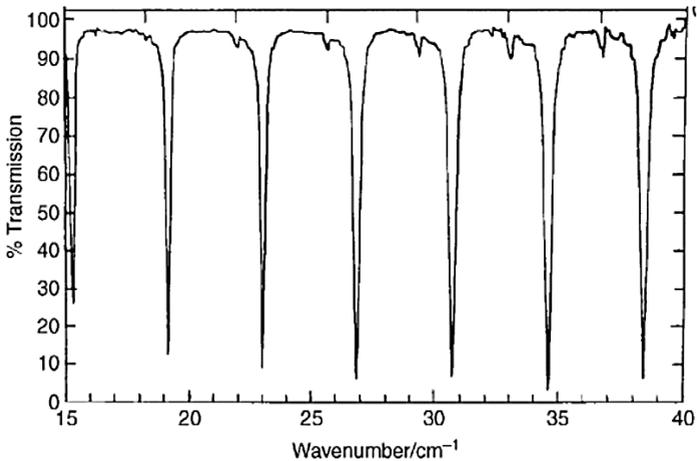


Рис. 7

5.2. На рис. 8 изображен спектр низкого разрешения для деформационного колебания молекулы HCN, полученный при комнатной температуре. Оцените частоту указанных колебаний и вращательную постоянную молекулы (в см<sup>-1</sup>).

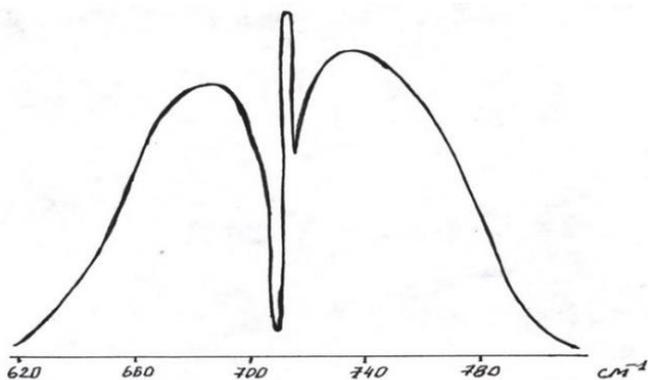


Рис. 8

5.3. На рис. 9 представлен спектр поглощения газообразного HCl. Определите момент инерции и длину связи молекулы HCl. Оцените минимальное разрешение спектрофотометра, позволяющего наблюдать изотопное  $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$  расщепление линий. Чем обусловлено «сгущение» линий в области больших волновых чисел?

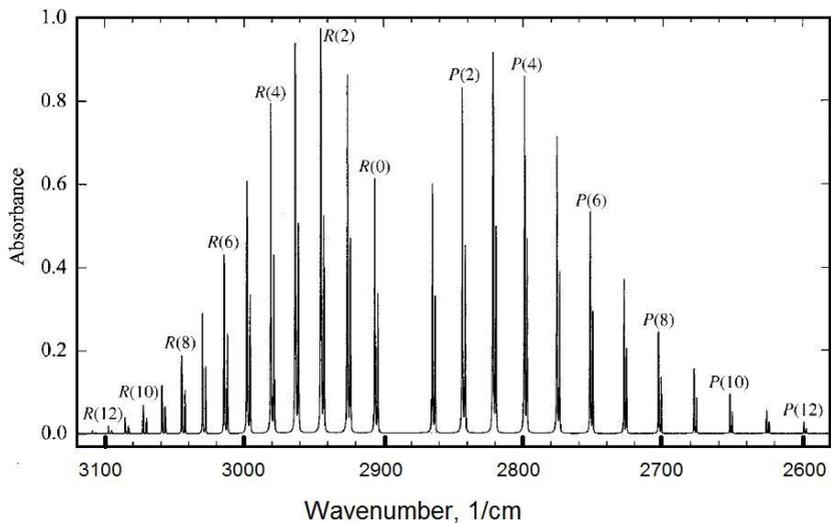


Рис. 9

5.4. Спектр поглощения молекулы HF в ИК-области представляет собой серию линий при  $3958.38\text{ см}^{-1}$  (переход  $0 \rightarrow 1$ ),  $3778.25\text{ см}^{-1}$  ( $1 \rightarrow 2$ ),

$3598.10 \text{ см}^{-1}$  ( $2 \rightarrow 3$ ) и слабой второй гармонике ( $0 \rightarrow 2$ ) при  $7736.63 \text{ см}^{-1}$ .  
Определите силовую постоянную и энергию диссоциации HF.

5.5 На рис. 10 приведен спектр CO. С чем связано наличие слабой полосы в области больших волновых чисел? Как будет меняться вид спектра с повышением температуры? Чем обусловлена ширина наблюдаемых полос? Давление газа 650 мм. рт. ст.

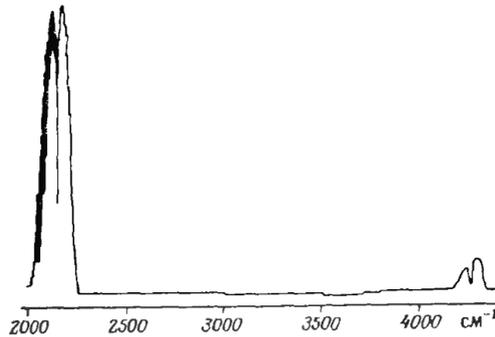


Рис. 10

5.6. Обратная линейная дисперсия монохроматора МДР-23 составляет  $D = 1.2 \text{ нм/мм}$ . При исследовании вращательной структуры спектра молекулы HBr в области  $\sim 500 \text{ нм}$  была установлена ширина выходной щели 50 мкм. Удастся ли при этом наблюдать вращательную структуру молекулярных спектров и будет ли разрешено изотопное расщепление  $^{79}\text{Br}/^{81}\text{Br}$  вращательной структуры? Равновесное межъядерное расстояние молекулы HBr равно  $1.414 \text{ \AA}$ .

5.7. Оцените необходимое число штрихов/мм рабочей части дифракционной решетки размером  $2 \times 2 \text{ см}^2$ , позволяющей разрешить вращательную структуру электронно-колебательно-вращательного перехода молекулы  $\text{I}_2$  вблизи  $530 \text{ нм}$ . Для регистрации спектра используется второй порядок дифракции; межъядерное расстояние между атомами йода в молекуле составляет  $2.666 \text{ \AA}$ .

## 6. Измерение температуры

6.1. Возбуждение нейтральных частиц  $\text{A}_2$  (атомная масса  $\sim 10 \text{ а.е.м.}$ , сечение соударения  $\sim 10 \text{ \AA}^2$ ) в плазме при поступательной температуре частиц  $\sim 100 \text{ К}$  и давлении  $\sim 0.1 \text{ атм}$  происходит по схеме  $\text{A}_2 + e \rightarrow \text{A}_2^* + e$ , испус-

вание обусловлено спонтанным процессом  $A_2^* \rightarrow A_2 + h\nu$ . Оцените минимальное время жизни возбужденного состояния  $A_2^*$  относительно спонтанного излучения, которое бы позволяло определять поступательную температуру частиц по доплеровскому уширению спектральной линии  $\nu$ . Можно ли подобрать переход, удовлетворяющий этому условию, в видимом диапазоне спектра?

6.2. Спектроскопические исследования разряда при давлении 4 Торр показали, что заселенности вращательных уровней  $J = 0$  и 9 радикала ОН относятся как  $N_0 : N_9 = 3 : 2$ . Вращательная постоянная ОН  $B = 18.5 \text{ см}^{-1}$ . Определите вращательную температуру молекул в разряде. Какой метод измерения поступательной температуры можно рекомендовать для описанных условий?

6.3. Тлеющий разряд горит в азоте при давлении 5 Торр, напряженность электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда составляет 3 В/см. Какая температура будет измерена с помощью зонда Ленгмюра в положительном столбе разряда? Будут ли условия в тлеющем разряде равновесными?

6.4. В ударной волне нагрев газа происходит настолько быстро, что первоначальное нагревание от исходной температуры  $T_0$  до высокой температуры  $T_1$  происходит лишь по поступательным и вращательным степеням свободы. После этого постепенно возбуждаются колебательные степени свободы (этот процесс называется «колебательной релаксацией»). Найдите температуру двухатомного газа  $T_2$  после колебательной релаксации.

6.5. Пучок ускоренных ионов  $^{52}\text{Cr}^+$  попадает в сосуд, заполненный неоном  $^{20}\text{Ne}$  при комнатной температуре. Расстояние  $L$ , на котором происходит замедление ионов  $\text{Cr}^+$  до тепловой энергии среды (термализация), равно 10 см. На каком расстоянии произойдет термализация  $\text{Cr}^+$ , если вместо неона сосуд заполнить ксеноном  $^{131}\text{Xe}$  при том же давлении?

## Литература

### Основная

1. Франкевич Е.Л. Физические методы исследования: учеб. пособие. М.: МФТИ, 1978 (Ч. 1); 1980 (Ч. 2); 1986 (Ч. 3).
2. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003.
3. Драго Р. Физические методы в химии. Т. 1, 2. М.: Мир, 1981.

4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2002.
5. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М.: Постмаркет, 2000.
7. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: КомКнига, 2006.
8. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013.
9. Устынюк Ю.А. Лекции по спектроскопии ядерного магнитного резонанса. Ч. 1 (вводный курс). М.: Техносфера, 2016.
10. Пергамент М.И. Методы исследований в экспериментальной физике. Долгосрочный: Издательский дом «Интеллект», 2010.
11. Бенуэлл К. Основы молекулярной спектроскопии. М.: Мир, 1985.
12. Сердюк И., Заккаи Н., Заккаи Дж. Методы в молекулярной биофизике. Структура, функция, динамика: уч. пособие. В 2-х томах. Красноярск: Издательство КДУ, 2009.

### Дополнительная

#### *Общие проблемы процесса измерения*

1. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. М.: Мир, 1983.

#### *Передача сигналов по электрическим цепям*

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1. М.: Мир, 1993.
3. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. М.: ГИТТЛ, 1957.

#### *Измерение давления*

1. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975.
2. Пипко А.И., Плисковский В.Я. Основы вакуумной техники. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.

#### *Измерение температуры*

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
2. Гордов А.Н., Жагулло О.М, Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Смирнов Б.М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1982.
4. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды / под ред. В. Лохте-Хольгрёвен. М.: Мир, 1971.
5. Кинджери В. Измерения при высоких температурах. М.: Metallurgizdat, 1963.

#### *Измерение и генерация потоков излучения*

1. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1999.
2. Курбатов Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Изд-во МФТИ, 1999.

#### *Масс-спектрометрия*

1. Сысоев Ф.Ф., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977.

2. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
3. Бернард Дж. Современная масс-спектропия. М.: ИЛ, 1957.

#### *Хроматография*

1. Конохов В.Ю. Хроматография. СПб.: Лань, 2016.
2. Лейбниц Э., Штруппе Х.Г. Руководство по газовой хроматографии. Т. 1, 2. М.: Мир, 1988.
3. Айвазов Б.В. Основы газовой хроматографии. М.: Высшая школа, 1977.
4. Жуховицкий О.А. Основы жидкостной хроматографии. М.: Мир, 1973.

#### *Магнитная радиоспектроскопия*

1. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. М.: Мир, 1975.
2. Keeler J. Understanding NMR spectroscopy. Wiley, 2002.
3. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонанс и его применение в химии. М.: Мир, 1970.
4. Воловенко Ю.М., Карцев В.Г., Комаров И.В., Туров А.В., Хиля В.П. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса для химиков. М.: МБФНП, 2011.
5. Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований. М.: Мир, 1992.
6. Практикум по магнитному резонансу: Учеб. пособие / Под ред. В.И. Чижики. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2003.
7. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1984.
8. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР. М.: Мир, 1973.
9. Маклочан К.А. Магнитный резонанс. М.: Химия, 1976.
10. Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1967.

#### *Оптическая спектроскопия*

1. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988.
2. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986.
3. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
4. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969.
5. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера, 2007.
6. Звелто О. Принципы лазеров. 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008.

### **Перечень учебно-методического обеспечения департамента для самостоятельной работы студентов, обучающихся по дисциплине «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ»**

1. Максимычев А.В. Физические методы исследования. 1. Погрешности измерений: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
2. Максимычев А.В. Физические методы исследования. 2. Сигналы в длинных линиях: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.

3. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 2. Электрические цепи. Измерение импульсных сигналов: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2004.
4. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 3. Методы измерения давлений: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2005.
5. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Излучатели, использующие потоки ускоренных электронов: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2015.
6. Семёнов Ю. С. Длинные линии: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2015.
7. Данильченко Н.А., Ткаченко С.И. Исследование параметров плазмы с помощью электрического зонда: лабораторная работа: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
8. Максимычев А.В. Газо-адсорбционная хроматография: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2009.
9. Ткаченко С.И., Хоменко А.Ю. Определение удельной поверхности пористых материалов методом БЭТ и Арановича: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2014.
10. Попов И.А., Кукаев Е.Н., Куксин А.Ю. Газовый анализ с использованием квадрупольного масс-спектрометра: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
11. Бочаров К.В., Марукович Н.И., Куксин А.Ю. Методы статистического и динамического рассеяния света для исследования наночастиц и макромолекул в растворах: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
12. Хоменко А.Ю. Задачи семестровых контрольных работ по курсу «Физические методы исследований». М.: МФТИ, 2014.
13. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 4. Методы измерения температуры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
14. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Куксин А.Ю. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Основные положения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012.
15. Ткаченко С.И. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Молекулярные спектры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012, 2016.
16. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Тепловые и газоразрядные источники излучения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2013.
17. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Квантовые излучатели: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2014.
18. Перепухов А.М., Максимычев А.В., Кишенков О.В., Куксин А.Ю. ЯМР-релаксация: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2015.

19. Максимычев А.В. Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2006.
20. Сагуленко П.Н., Нуднова М.М., Анохин Е.М. Инфракрасная спектроскопия поглощения. Колебательно-вращательные спектры двухатомных молекул: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
21. Попов И.А., Зубцов Д.А., Зубцова Ж.И. Изучение электронно-колебательных спектров поглощения двухатомных молекул на примере молекулы I<sub>2</sub>: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
22. Кукаев Е.Н., Куксин А.Ю., Тишкина А.О. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
23. Вервикишко П.С. Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2016.
24. Никулин С.В., Стародубцева Н.Л., Попов И.А. Высокоэффективная жидкостная хроматография. М.: МФТИ, 2017.
25. Стародубцева Н.Л., Высоких М.Ю. Современные методы исследования веществ и материалов. Оптические методы : учебное пособие.— М. : МФТИ, 2018 . ISBN 978-5-7417-0674-9.

