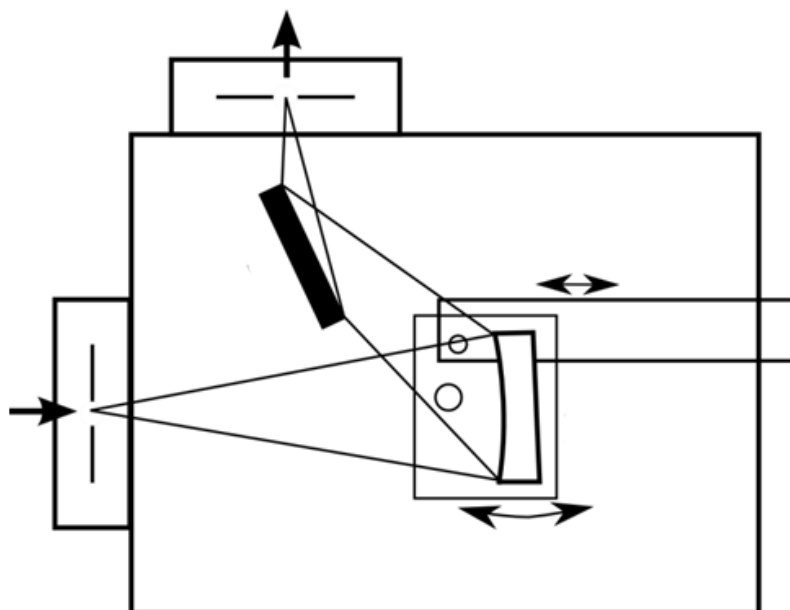


П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Е.В. Ушакова,
А.В. Баранов

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА



Санкт-Петербург

2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Е.В. Ушакова,
А.В. Баранов**

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
Лабораторный практикум

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Е.В. Ушакова, А.В. Баранов. Техника физического эксперимента. Лабораторный практикум. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 88 с.

Лабораторный практикум предназначен для бакалавров четвертого курса факультета фотоники и оптоинформатики, обучающихся по программам «Оптика наноструктур» и «Физика наноструктур» по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и содержит описание лабораторных работ к дисциплинам «Техника физического эксперимента» и «Приборы и методы экспериментальной физики». Практикум также может быть рекомендован студентам старших курсов физико-технических специальностей, а также магистрантам, специализирующимся в области применения оптических методов в нанотехнологии.

Рекомендовано к изданию Ученым советом факультета фотоники и оптоинформатики. Протокол Совета № 14 от 03.12.2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Е.В. Ушакова, А.В. Баранов, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Техника безопасности	5
Лабораторная работа №1	
Измерение электрических сигналов	6
Лабораторная работа №2	
Операционные усилители	16
Лабораторная работа №3	
Измерение мощности оптических сигналов	24
Лабораторная работа №4	
Анализ дрейфа нуля и шума	34
Лабораторная работа №5	
Управление дифракционным монохроматором	44
Лабораторная работа №6	
Калибровка монохроматора	51
Лабораторная работа №7	
Инфракрасная спектроскопия	57
Лабораторная работа №8	
Измерение времен затухания люминесценции с накоплением сигнала	67
Лабораторная работа №9	
Измерение размеров наноструктур методом атомно-силовой микроскопии	74
Лабораторная работа №10	
Обработка атомно-силовых изображений	81

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум к дисциплинам «Техника физического эксперимента» и «Приборы и методы экспериментальной физики» по магистерским программам «Оптика наноструктур» и «Физика наноструктур» разработан с учётом специфики подготовки магистрантов по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

Основная цель настоящего лабораторного практикума: привить студентам навыки научно исследовательской работы в области физики наноструктур и продемонстрировать возможности использования методов оптической, люминесцентной и зондовой микроскопии в различных научных экспериментах при исследовании наноструктурированных материалов. Практикум затрагивает методы измерения физических величин, основы метрологии, методы анализа физических измерений.

Описания лабораторных работ содержат краткие теоретические сведения. В их основу легли экспериментальные методики и результаты ряда научно-исследовательских работ, сравнительно недавно выполнявшихся в Университете ИТМО.

Первые две работы посвящены измерению и усилению электрических сигналов.

Цель третьей и четвертой работ – знакомство с методами измерения мощности оптических сигналов и анализом шумов, возникающих при регистрации оптических сигналов.

Пятая и шестая работы посвящены вопросам управления монохроматорами и их калибровки.

В седьмой работе рассматриваются особенности получения спектров в ближней ИК области, а в восьмой – измерения времен затухания люминесценции.

Девятая и десятая работы знакомят с измерением размеров наноструктур с помощью атомно-силового микроскопа, а также с методами обработки экспериментальных данных на примере изображений, полученных методом атомно-силовой микроскопии.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

- При работе с непрерывными лазерами мощностью более 5мВт обязательно применение защитных очков. То же требование для работы с импульсными лазерами и лазерами невидимого диапазона независимо от мощности.
- Настройку и юстировку оптических схем вести при включенном верхнем освещении и пониженной мощности лазеров.
- Не вносить в луч лазера посторонние предметы, особенно легко-воспламеняющиеся или бликующие.
- Не прерывать луч частями тела.
- При работе не располагайте плоскость лазерного луча на уровне глаз.
- Ограничивайте распространение лазерного луча экраном или диффузором.
- Сборку, разборку, изменения экспериментальных схем можно производить только при отключенном напряжении.
- При работе не брать одновременно руками за корпуса или металлические части двух разных приборов, включая металлические шкафы, стенды, раковины и батареи отопления).
- При поражении током и невозможности высвобождения немедленно обесточить лабораторную установку.
- Прекратить работу при видимом нагреве элементов (пузырение краски, обугливание, запах гари), а также признаков возгорания – в первую очередь обесточить.
- В случае обнаружения неисправности работу немедленно прекратить.
- Не загромождать проходы мебелью и приборами.
- Все токоведущие части д.б. закрыты изоляцией или кожухом.
- После окончания работы необходимо обесточить все приборы (не ограничиваться нажатием кнопки включения питания).
- Не проводить работы в одиночку и в отсутствии преподавателя.
- Если для прибора ведется журнал работы, то обязательно зафиксировать время начала и окончания работы.

Эти правила необходимо рассматривать совместно с правилами пожарной и химической безопасности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Ознакомиться с основными параметрами электрических сигналов (заряд, напряжение, ток, переменный и постоянный ток, частота, униполярность, биполярность);
- ознакомиться с основными характеристиками источников и измерителей сигналов (входное и выходное сопротивление, частотная передаточная характеристика);
- приобрести навыки измерения напряжений, токов и сопротивлений с помощью мультиметра;
- приобретение и закрепление навыков проведения измерений амплитудных и временных характеристик сигналов с помощью осциллографа.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические сигналы – это изменяющиеся во времени напряжения и токи, основные параметры которых необходимо измерять. Большинство электрических измерений сводятся к измерению именно напряжения или тока, даже если это измерение частоты, сопротивления или, допустим, температуры (когда измеряется напряжение на датчике).

Сложные сигналы часто могут быть представлены как сумма простых, и все их можно разложить в ряд Фурье по компонентам.

КРАТКИЙ СПИСОК ТЕРМИНОВ

1. Параметры электрических сигналов

ЭДС, или электродвижущая сила – внешняя сила, вызывающая перемещение заряда вдоль замкнутого контура. Может быть химической, фотоэлектрической, электромагнитной, электростатической, пьезоэлектрической, термоэлектрической и пр.

Постоянный ток (Direct Current, DC) – ток, не меняющий своей величины и направления.

Переменный ток (Alternating Current, AC) – электрический ток, меняющий свою величину и направление с течением времени.

Часто переменным называют и пульсирующий ток, меняющий только свою величину, но не направление.

Параметрами переменного сигнала, изменяющегося по гармоническому закону

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \varphi), \text{ где } \omega = 2\pi f,$$

являются амплитуда V_0 (максимальное значение отклонения переменной величины от среднего значения), частота $f=1/T$ (значение, обратное периоду T – наименьшему интервалу времени, через который регулярно повторяются значения сигнала), и фаза φ (применяется для сравнения двух сигналов).

Для описания негармонических сигналов, например сигналов сложной формы, шума, вышеприведенные параметры неприменимы, поэтому вводят два других:

Пиковая амплитуда (пик, peak amplitude, peak) – это отклонение от среднего значения симметричных периодических волн (синусоидальных, прямоугольных, пилообразных);

Среднеквадратичная амплитуда (root mean square, RMS) – квадратный корень среднего по времени значения квадрата отклонения.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$

Приборы обычно измеряют именно RMS амплитуду переменного сигнала. Для гармонического сигнала связь между эффективным значением, определяемым как среднеквадратичное, и амплитудой, будет

$$U_{эф} = U_0 / \sqrt{2} = 0.707 \cdot U_0 \text{ и } I_{эф} = I_0 / \sqrt{2} = 0.707 \cdot I_0$$

Этот параметр также применяют для сопоставления мощности переменного и постоянного тока, поскольку постоянный сигнал и переменный с RMS амплитудой, равной амплитуде постоянного, характеризуются одинаковой мощностью:

$$P_{RMS} = \frac{1}{RT} \int_0^T V_0^2(t) dt, \text{ или, для гармонического, } P_{RMS} = \frac{V_0^2}{2R} = \frac{I_0^2 R}{2}$$

При измерении несинусоидального сигнала значение будет отличаться.

Используются и другие термины:

Размах – разность между максимальным и минимальным значениями сигнала.

Мгновенное значение – значение сигнала в определённый момент времени.

Среднее значение, или смещение – постоянная (усредненная) составляющая изменяющегося напряжения или силы тока:

$$V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

Постоянная компонента сдвигает сигнал относительно нуля.

2. Элементы электрических цепей, источники питания и средства измерения

Линейные элементы цепи – элементы, зависимость характеристик которых (вольт-амперная, вебер-амперная и кулон-вольтная характеристики) описывается линейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями (поэтому их поведение можно описать аналитически). Это резисторы, емкости, индуктивности. Они сохраняют линейность параметров в рабочем диапазоне.

Нелинейные элементы цепи – элементы, характеристики которых не описываются линейными уравнениями. Это все полупроводниковые элементы, газоразрядные и вакуумные элементы.

Активные элементы цепи – элементы, являющиеся источниками ЭДС. Примеры – источники питания, батарейки, аккумуляторы, емкости и индуктивности, фотодиоды, транзисторы, усилители.

Пассивные (реактивные) элементы цепи – это элементы цепи, накапливающие или рассеивающие энергию, такие как резисторы, индуктивности, емкости, лампы, диоды, резисторы, провода и коммутационные изделия.

Стабилизированный источник питания – это источник, поддерживающий постоянным выходное напряжение или ток вне зависимости от величины нагрузки. Стабилизация осуществляется по току либо напряжению. При превышении потребления мощности (тока или напряжения) установленного значения обычно автоматически происходит переход от одного режима к другому, обеспечивая тем самым защиту источника питания и потребителя от перегрузки. Так, при размыкании контактов универсальный источник стабилизируется по напряжению, при замыкании – по току.

Мультиметр (тестер) – прибор для измерения напряжений, токов и сопротивлений (а также емкости, частоты, проверки контактов, р-п переходов).

Осциллограф – прибор для измерения и изображения сигналов, меняющихся во времени.

3. Некоторые характеристики средств измерения

Диапазон – характеристика передающей системы, равная разнице максимального и минимального возможных значений величины входного параметра устройства.

Динамический диапазон – характеристика передающей системы, равная отношению (либо логарифму отношений) максимального и минимального возможных значений величины входного параметра устройства. В случае логарифмической оценки выражается в децибелах.

Децибел (дБ) численно равен десятичному логарифму безразмерного отношения физической величины к одноименной

физической величине, принимаемой за исходную, умноженному на десять. Изначально дБ применяется для оценки мощности, поэтому единицы измерения нужно приводить к энергетическим. Так, при вычислении усиления по силе тока или напряжения умножают не на 10, а на 20 (т.к. мощность пропорциональна квадрату тока либо напряжения, что удваивает логарифм).

Чувствительность – величина, определяемая минимальным уровнем сигнала на входе при заданном отношении уровней полезного сигнала и шума и заданном уровне полезного сигнала на выходе.

Входное и выходное сопротивление – отношение напряжения на входах (выходах) к току, протекающему через них. Входное сопротивление цепи определяет, какая нагрузка будет подключена к генератору (источнику), выходное сопротивление генератора (источника, цепи) определяет, какая нагрузка может быть подключена к генератору (источника, цепи).

Волновое сопротивление – отношение напряжения падающей волны к току этой волны в линии передачи, для линий бесконечной длины это отношение сводится к корню отношения погонной индуктивности линии к погонной емкости. Выражается в единицах сопротивления:

$$\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{U}{I} = Z_0$$

4. Согласование нагрузки

Возможность измерения сопротивления элементов и напряжения в цепи во многом определяется входным сопротивлением измерительных приборов. Входное сопротивление ограничивает диапазон допустимого выходного сопротивления источника – оно должно быть много меньше. Это следует из схемы деления сопротивлений. Так, при равенстве сопротивлений напряжение на входе вольтметра составит половину от измеряемой величины, а сопротивление измеряемого участка цепи также упадет вдвое из-за параллельного подключения внутреннего сопротивления.

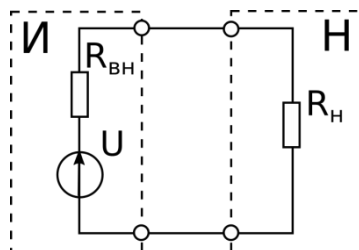


Рис. 1 Схема подключения нагрузки к источнику ЭДС. Пунктиром выделены области цепи, соответствующие источнику (И) и нагрузке (Н)

В общем случае, при работе с постоянным током, высокое входное сопротивление измерителя говорит о том, что он не внесет искажений, «закорачивая» измеряемый сигнал, а низкое выходное сопротивление источника питания обеспечивает большую подключаемую мощность. В условиях, когда сказывается гармоническая форма переменного сигнала (высокие частоты, дальние линии связи), для достижения оптимальных условий работы сопротивления должны быть согласованы, т.е. входное сопротивление усилителя должно быть равно выходному сопротивлению источника. В ином случае возникает потеря мощности, а также может образовываться отраженный сигнал.

Большая часть высокочастотной усилительной техники рассчитана на работу с сопротивлением 50 Ом и оснащено коаксиальными соединениями типа BNC (реже SMA), очень похожим на советский разъем СР-50. В ряде случаев ненагруженные входы и выходы усилителей рекомендуется нагружать «терминаторами» – резисторами с номиналом, соответствующим сопротивлениям источника и приемника, а также волновому сопротивлению кабеля.

РАБОТА С ПРИБОРАМИ

1. Обращение с мультиметром

Учитывайте полярность, она указана на входных контактах. Обычно полярность обозначена цветом – красный (положительный) и черный (отрицательный). С землей соединяется черный контакт, если нет отдельно обозначенного.

Для изменения быстроизменяющихся негармонических сигналов следует применять осциллограф или отдельную плату АЦП.

Для измерения напряжения прибор подключается параллельно измеряемому сопротивлению. Измерение напряжения не должно вносить изменения в работу цепи, поэтому ток через вольтметр должен быть много меньше тока в цепи. Для этого входное сопротивление прибора должно быть как можно большим (как минимум – много больше, чем сопротивление участка цепи, на котором измеряется падение напряжения), в идеале – бесконечным.

Следует иметь в виду, что внутреннее сопротивление вольтметра обычно составляет от 1 до 10 МОм, соответственно его подключение к нагрузке эквивалентно включению такого сопротивления в цепь. При необходимости измерения напряжения на больших сопротивлениях лучше измерять ток через параллельно включенное большее сопротивление известной величины.

Измерение тока – менее частая, но не менее важная процедура. Для измерения тока прибор включается в измеряемую цепь

последовательно с нагрузкой. Входное сопротивление в этом режиме должно быть минимальным, в идеале – нулевым.

Мультиметр имеет несколько диапазонов измерения напряжения, тока и т.д. Меньшие диапазоны обладают лучшей точностью измерения, начинать измерение надо с большего диапазона.

2. Обращение с осциллографом

При подключении к цепи осциллограф аналогичен вольтметру, он также измеряет напряжение между двумя точками, но отображает напряжение в виде развертки по времени. Дополнительно осциллограф может быть способен измерять RMS значение сигнала, среднее значение, размах и частоту, а также проводить Фурье-анализ сигнала.

Основные органы регулировки осциллографа: управление временной разверткой, управление масштабом изображения, изменение уровня синхронизации, выбор источника синхронизации. Масштаб изображения указан в единицах на одну клетку экрана.

Используйте настройки, соответствующие сигналу. Так, для сигнала с частотой 1кГц, которому соответствует период 1 мс, можно сразу выбрать развертку с таким же значением или немного меньше. То же самое и с амплитудой.

Для синхронизации переменного сигнала используется схема синхронизации. В качестве источника синхросигнала может быть внешний сигнал либо сам анализируемый сигнал. При уровне синхронизации вне пределов диапазона сигнала на экран ничего выводиться не будет, поэтому надежнее всего начинать с нулевого уровня. Задаваться, помимо уровня, может также направление изменения сигнала (вверх или вниз).

Табл. 1. Технические данные мультиметра типа DT830B

Защита от перегрузок :	
постоянный ток	1000 В
переменный ток	750 В (RMS)
Входное сопротивление	10 МОм на всех пределах
Чувствительность	100 мкВ
Измерение сопротивления	от 0,1 Ом до 2 МОм
Скорость измерений	2–3 измерения в сек

Табл. 2. Технические данные осциллографа TDS2022B

Полоса пропускания	200 МГц
Частота дискретизации	2 Гвыб/с
Входное сопротивление	1 МОм
Число каналов	2
Объем памяти	2500 байт (отсчетов)

Примечания	Аппаратное усреднение до 128 кривых, FFT
------------	--

Табл. 3. Технические данные осциллографа 3206A

Полоса пропускания	200 МГц
Частота дискретизации	500 Мвыб/с
Число каналов	2
Входное сопротивление	1 МОм
Объем памяти	6 МБайт (отсчетов)
Примечания	PC-осциллограф

Табл. 4. Технические данные осциллографа PCS500

Полоса пропускания	60 МГц
Входное сопротивление	1 МОм
Число каналов	2
Объем памяти	2×4к байт (отсчетов)
Примечания	PC-осциллограф

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка к измерениям

1. Изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации цифрового вольтметра типа DT830B и осциллографов PCS500, TDS2000B и 3206A (по указанию преподавателя). Ознакомиться с правилами безопасной работы с приборами.
2. Включить вольтметр, осциллограф, источники напряжения и тока, а также генератор сигналов специальной формы. Дать прогреться 15 минут.
3. Получить набор резисторов для измерения.
4. Получить таблицу цветового кодирования номиналов резисторов.

2. Проведение измерений

Для измерения сопротивлений:

- с помощью таблицы цветовых кодов установить номинал резисторов,
- с помощью мультиметра провести измерение сопротивлений резисторов и проверить полученные значения,
- для резисторов с цифровой маркировкой сопротивление только измерить.

Для измерения с помощью осциллографа:

- установить частоту генератора от 1 до 5 кГц,
- установить амплитуду сигнала генератора от 1 до 5 В,
- соединить выход генератора с входом осциллографа,
- установить масштаб развертки около 0,5 мс/деление, это соответствует нескольким периодам сигнала на экран,
- установить чувствительность около 0,5–1 мВ/деление,
- выбрать источник сигнала синхронизации, аналогичный используемому входу,
- настроить уровень синхронизации до стабилизации изображения на экране,
- настроить изображение, регулируя развертку и амплитуду,
- изменить параметры сигнала и убедиться в изменении изображения на экране,
- измерить напряжение обоих сигналов мультиметром в режимах постоянного и переменного тока и на разных частотах,
- сохранить данные в файл, если осциллограф обеспечивает такую возможность.

Для анализа временной синхронизации:

- синхронизировать регистрацию импульсного излучения от лазера по синхроимпульсу от блока управления лазером,
- измерить задержку между сигналами синхронизации и детектируемым,
- Соединить блок управления и осциллограф кабелем другой длины, измерить изменение времени задержки.

Для анализа напряжения трансформаторного или импульсного источника питания:

- измерить осциллографом параметры переменного сигнала, включая RMS напряжение, размах и среднее напряжение,
- провести измерение напряжения мультиметром.

3. Анализ результатов

1. Укладывается ли разброс сопротивлений резисторов в допуск, указанный на маркировке?
2. Какой параметр переменного напряжения регистрирует вольтметр?
3. Почему при равенстве амплитуды сигнала вольтметр на разных частотах показывает разные значения?
4. Какую максимальную частоту может зарегистрировать осциллограф, если судить по режимам развертки?

5. Какая скорость распространения сигнала по кабелю получается?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Теоретическая часть (краткие сведения о параметрах электрических сигналов и элементах электрических цепей).
2. Результаты измерения разброса номиналов резистора.
3. Результаты измерения переменного напряжения с помощью тестера.
4. Расчет скорости распространения сигнала по кабелю.
5. Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Какими параметрами характеризуется переменное напряжение?
2. Как измерить частоту с помощью осциллографа?
3. Какой параметр переменного напряжения отображается при измерении тестером?

ЛИТЕРАТУРА

1. Мультиметр цифровой серии DT830B [Электронный ресурс] / Сайт Сети магазинов «220 Вольт» – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.220-volt.ru/f/a0/ru/docs/36/36912.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
2. TDS1000B and TDS2000B Series Digital Storage Oscilloscopes [Электронный ресурс] / Сайт California Institute of Technology – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.sophphx.caltech.edu/Lab_Equipment/Tektronix_TDS1000_2000_User_Manual.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
3. Осциллограф ТЕКТРОНИХ. Серия TDS1000B и TDS2000B. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / Сайт компании ЗРК – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://zrk.ru/scopemeter/tds1000b_2000b/index.htm, свободный. – Загл. с экрана.
4. PicoScope 3000A/B and MSO Series User's Guide [Электронный ресурс] / Сайт Pico Technology – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <https://www.picotech.com/download/manuals/ps3000ab.en-6.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
5. User Manual PCS500/PCS100/K8031 [Электронный ресурс] / Сайт Velleman Inc. – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.vellemanusa.com/downloads/0/user/usermanual_pcs100_pcs500_k8031_uk.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
6. Цветовой код резисторов [Электронный ресурс] / Сайт ДАРТ Электроникс – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа:

- <http://www.dart.ru/catalognew/resistors/ty/html/color-code.shtml>, свободный. – Загл. с экрана.
7. Калькулятор цветовой маркировки резисторов [Электронный ресурс] / Сайт Чип и Дип – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.chipdip.ru/info/rescalc/>, свободный. – Загл. с экрана.
 8. Signal Parameters & Measuring Signals [Электронный ресурс] / Сайт Bucknell University – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonshtml/Signal/Signal2.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
 9. Electrical Engineering Lessons [Электронный ресурс] / Сайт Bucknell University – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonshtml/StartEE.html>, свободный. – Загл. с экрана.
 10. Осциллографы. Основные принципы измерений. Учебное пособие. [Электронный ресурс] / Сайт компании «Чип и Дип» – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://lib.chipdip.ru/081/DOC001081116.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Получить представление о применении интегральной электроники в измерении;
- ознакомиться с принципами работы операционных усилителей и применением операционных усилителей в регистрации электрических и оптических сигналов;
- исследовать основные режимы работы операционного усилителя на макетной плате;
- приобрести навыки моделирование схем на основе операционных усилителей с помощью программ Qucs.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Усиление фототока, источником которого являются фотодиоды, фототранзисторы и пр., может осуществляться разными способами. Первоначально это делали с помощью электронных ламп, затем транзисторов. Хотя транзисторы в виде отдельных элементов схемы в настоящее по-прежнему применяются, гораздо понятнее рассмотреть вопросы усиления и регистрации сигнала на уровне интегральной электроники, на примере операционных усилителей (ОУ). Кроме того, на работе ОУ можно проиллюстрировать большинство параметров обычных усилителей.

Операционные усилители получили свое название из-за того, что первоначально разрабатывались для создания арифметических аналоговых устройств (сумматоров, умножителей, интеграторов, дифференциаторов). На их основе можно создать почти любое устройство для аналоговой обработки сигнала, но мы ограничимся рассмотрением дифференциального усилителя и некоторых схем на его основе.

Дифференциальный (разностный) усилитель – это электронное устройство, выходной сигнал которого равен разности напряжений на двух входах, умноженной на определенную величину. Выходной сигнал при этом может быть тоже дифференциальным, т.е. регистрироваться как разность между двумя выходами, или однофазным, т.е. регистрироваться между выходом и нулем.

Операционный усилитель это дифференциальный усилитель постоянного тока, т.е. работающий на частотах от 0 Гц, с очень большим

коэффициентом усиления и несимметричным выходом. Усиление разностного сигнала по напряжению составляет 10^6 и более (т.е. $U_{out}=(U_{вх2}-U_{вх1})\times K$, где $U_{вх}$ – напряжение на входах, а K – коэффициент усиления), выходное сопротивление очень низкое, а выходной сигнал может меняться почти в полном диапазоне напряжения питания. Выходы обозначают как «+» и «-», или неинвертирующий и инвертирующий. Часто первый не обозначают никак, а инвертирующий отмечают кружочком. Символы означают, что выходной сигнал изменится в положительном направлении тогда, когда напряжение на входе «+» будет больше, чем на входе «-». Такое устройство ведет себя крайне нестабильно, и малейшее расхождение сигналов на входах вызывает переключение выходного сигнала между противоположными напряжениями питания. По этой причине ОУ в одиночку можно использовать только в качестве компаратора.

Для придания схемам на основе ОУ необходимых характеристик вводят обратную связь. Для этого выход соединяют с одним из входов, инвертирующим либо неинвертирующим.

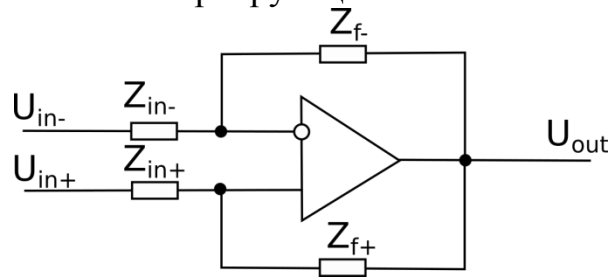


Рис. 1 Базовая конфигурация включения ОУ

Если компоненты обратной связи соединяются с неинвертирующим входом, возникает положительная обратная связь. При этом ОУ фактически перестает быть усилителем и либо осциллирует в режиме, определяемом компонентами ОС, либо работает как компаратор. Положительная ОС используется обычно в генераторах.

Более распространенный режим – использование отрицательной обратной связи, когда выход соединяется с инвертирующим входом. При этом часть выходного сигнала попадает на инвертирующий вход усилителя в противофазе (поэтому повышение выходного сигнала, попадая на вход, ведет к уменьшению выходного сигнала, и наоборот). Отрицательная ОС уменьшает коэффициент усиления, но при этом устраняет искажения и нелинейность, улучшая общие параметры схемы. Чем больше обратная связь, тем меньше характеристики схемы зависят от характеристик ОУ и тем больше от самой схемы ОС.

При инвертирующем включении ОУ поддерживает такой уровень выходного напряжения, который обеспечивает равенство напряжения на

входах ОУ (поэтому обычно считают, что у ОУ напряжение на входах равно). Это обеспечивает точный контроль усиления схемы.

Добавим, что из-за задержки сигнала на определенных частотах отрицательная обратная связь становится положительной, поэтому часто ОУ имеют схемы внутренней частотной коррекции.

В общем случае, при правильном подборе элементов, ОУ может генерировать выходной сигнал как функцию входных и использоваться в качестве дифференциального усилителя, регулятора тока или напряжения, фильтра, преобразователя и пр., а также реализовывать основные математические функции. Благодаря тому, что ОУ имеет крайне высокое входное сопротивление, низкое выходное сопротивление, и очень высокий коэффициент усиления, основные расчеты можно проводить, исходя из характеристик идеального ОУ (бесконечное усиление, бесконечное входное сопротивление, и нулевое выходное).

ВАРИАНТЫ СХЕМ НА ОСНОВЕ ОУ

1. Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель (ДУ), схема которого приведена на рис. 2, используется для вычисления разницы двух напряжений, каждое из которых умножено на определенную константу (задаваемую резисторами).

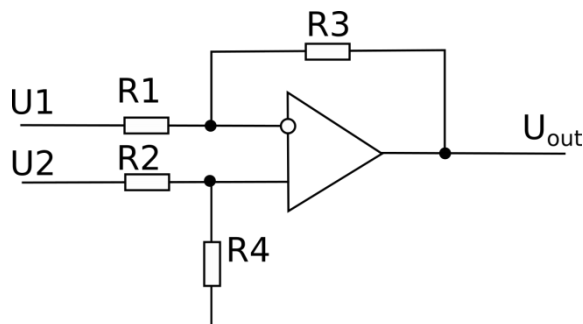


Рис. 2 Общая схема дифференциального усилителя

Выходное напряжение ДУ равно

$$U = \frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} U_2 - \frac{R_3}{R_1} U_1$$

Если входные сопротивления $R_1 = R_2$, а также $R_3 = R_4$, выходное напряжение будет $U = \frac{R_4}{R_1} (U_2 - U_1)$.

2. Триггер Шмидта

Включение положительной обратной связи в отсутствие отрицательной превращает ОУ в триггер Шмидта

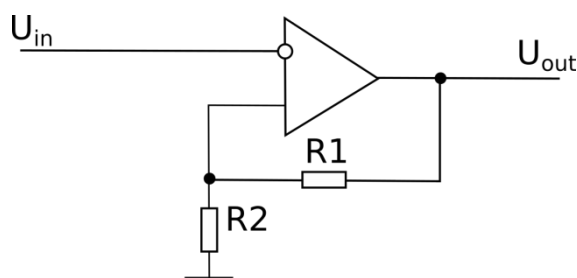


Рис. 3 Триггер Шмидта на ОУ

Схема будет переключаться между положительным и отрицательным напряжением U_{out+} и U_{out-} каждый раз, когда входное напряжение будет переходить через уровень, задаваемый делителем из сопротивлений. При повышении напряжения при уровне срабатывания $U_{ср} = U_{out-}R_1/(R_1 + R_2)$, при понижении – при уровне отпускания $U_{отп} = U_{out+}R_1/(R_1 + R_2)$. Возникает гистерезис $U_{гис} = U_{ср} - U_{отп}$. Пороги срабатывания исключают ненужные переключения под действием шумов, т.е. устраняют так называемый "дребезг" контактов.

3. Инвертирующий усилитель

Для большинства случаев усиления напряжения или регистрации фототока подходит инвертирующая схема включения ОУ. Усиливаемый сигнал находится в противофазе входному и равен $U_{out} = -U_{in} * R_1/R_2$.

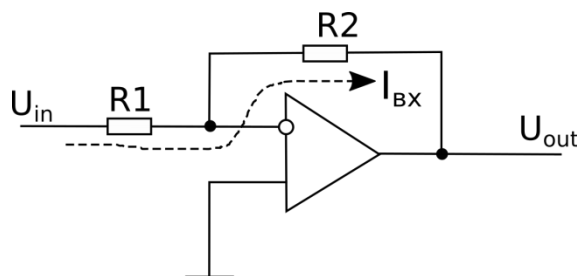


Рис. 4 Инвертирующее включение. Штриховая линия показывает путь входного тока

Обратите внимание, что через схему протекает фактически входной ток, т.к. потребление входов считается нулевым. Входной ток и создает падение напряжения на R_2 .

4. Неинвертирующий усилитель

При подаче сигнала на неинвертирующий вход фаза сигнала на входе и на выходе совпадает, а выходное напряжение равно $U_{out} = U_{in} \times (1 + R_2/R_1)$.

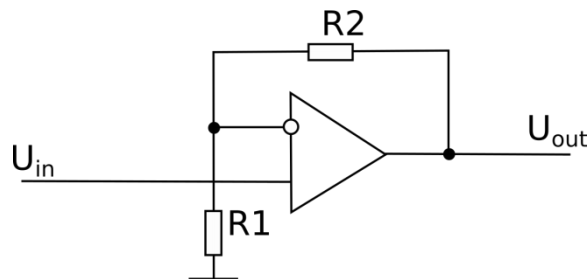


Рис. 5 Неинвертирующий усилитель

Основное отличие от инвертирующей схемы заключается в повышенном входном сопротивлении, которое определяется параметрами входов ОУ и может составлять десятки мегаом и более.

5. Повторитель (инвертирующий)

Обратная связь без сопротивлений образует повторитель, выходной сигнал которого находится в противофазе входному $U_{out} = -U_{in}$.

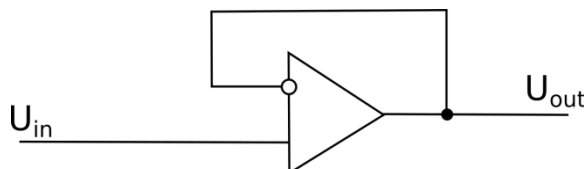


Рис. 6 Инвертирующий повторитель

Применяется в качестве буферного усилителя, обеспечивающего повышенный выходной ток.

Основные параметры усилителей

С рассматриваемой точки зрения актуальны следующие параметры усилителя сигнала, необязательно основанного на ОУ:

Входное сопротивление – величина, равная отношению входного напряжения к входному току. Может быть представлено в виде эквивалентной нагрузки, но в реальности рассредоточено по элементам схемы. Чем больше входное сопротивление, тем меньше усилитель влияет на источник сигнала (поскольку потребляет из измеряемой цепи меньший ток). У приборов с входом по напряжению входное сопротивление относительно высокое, у токовых входов входное сопротивление относительно низкое. Для дифференциальных входов различают дифференциальное и синфазное входное сопротивление.

Входной ток – ток, протекающий через входы схемы.

Коэффициент усиления – обычно это отношение величины выходного напряжения к входному $K=U_{out}/U_{in}$. Также может быть

отношением по току, мощности, входному току к выходному напряжению и наоборот (тогда прямо указывается, какое именно).

Выходное сопротивление – отношение выходного напряжения к выходному току в нагрузке. Чем меньше выходное сопротивление – тем больший ток схема может отдавать. В соответствии с формулой $I=U/(R+r)$, где I – входной ток следующего каскада, r – выходное сопротивление усилителя, R – сопротивление нагрузки, видно, что чем меньше r – тем меньше ток от него зависит.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала.

Скорость нарастания сигнала выходного – скорость изменения выходного напряжения при подключенной нагрузке. Напрямую связано с АЧХ, т.к. соответствует наибольшему наклону переменного сигнала (касательная в точке пересечения нуля синусоидой).

Полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика устройства достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения его формы. Определяет частотный диапазон усиливаемого сигнала. В зависимости от требований к искажениям может иметь разные границы.

Для моделирования работы электрических цепей часто применяют программные симуляторы. Самым известным в России является Electronic Workbench (в настоящее время это проект NI Multisim), но это коммерческая версия, поэтому в настоящей работе рекомендуется использование кросс-платформенного свободно распространяемого симулятора Qucs.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка к измерениям

1. Изучить основные схемы включения ОУ.
2. Изучить схему включения трансимпедансных усилителей, предназначенных для работы с фотодиодами.
3. Изучить основные функции и элементы программы моделирования электрических цепей Qucs.
4. Получить макетную плату, микросхему ОУ и набор проводников и резисторов.
5. Взять подходящий блок питания, обеспечивающий двухполярное напряжение.

2. Проведение измерений

Часть 1. Анализ режимов работы ОУ

1. Собрать схему усилителя по полученному заданию.
2. Подключить генератор сигналов, установить частоту в диапазоне 1–5 кГц и с помощью осциллографа, попеременно измерив сигнал на входе и на выходе схемы, установить коэффициент усиление схемы.
3. Создать в программе Qucs схему в соответствии с заданием и проверить соответствие экспериментально полученной величины усиления с величиной, полученной в программе.
4. Меняя частоту генератора от 10 Гц до 100 кГц установить частоту, при которой амплитуда выходного сигнала спадает до 50% от максимальной.

3. Анализ результатов

1. Экспериментально измеренный коэффициент усиления совпал с рассчитанным? Если нет, то, как вы думаете, почему?
2. Как вы думаете, какой элемент при проверке АЧХ ограничил систему? И почему? Как можно убедиться в этом?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Теоретическая часть.
2. Заданная схема, результаты расчета, моделирования в программе и измерения в эксперименте коэффициента усиления схемы.
3. АЧХ системы.
4. Выводы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Почему ОУ относится к дифференциальным усилителям?
2. Как будет себя вести ОУ без подключения обратной связи?
3. В чем разница между инвертирующим и неинвертирующим усилителем?
4. Чему равен коэффициент усиления инвертирующей схемы?

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамий А.Р., Тлячев В.Б. Операционные усилители. – Майков: АГУ, 2005. – 192 с.
2. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ. – 2014. – 704 с., ил.
3. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 304 с: ил.

4. Андрей Усов. Операционный усилитель [Электронный ресурс] / Easy Electronics – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://easyelectronics.ru/operacionnyj-usilitel.html>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Bruce Carter and Thomas R. Brown. Handbook of Operation Amplifier Applications [Электронный ресурс] / Texas Instrument – Электрон. дан. – 2001. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
6. Op Amp Configurations [Электронный ресурс] / Wikibooks – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: https://en.wikibooks.org/wiki/Electronics/Electronics_Formulas/Op_Amp_Configurations, свободный. – Загл. с экрана.
7. А.В. Баранов, А.П. Литвин, П.С. Парфенов, Е.В. Ушакова. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. Лабораторный практикум. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 40 с.
8. Qucs (Quite Universal Circuit Simulator). User manual [Электронный ресурс] / Qucs project – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://qucs.sourceforge.net/docs.html>, свободный. – Загл. с экрана.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Ознакомиться с основными способами регистрации оптических сигналов;
- ознакомиться с основными способами измерения оптической мощности лазеров;
- ознакомиться с фотогальваническим и фотодиодным включением фотодиодов;
- провести измерение мощности лазерного излучения;
- провести регистрацию оптического (лазерного) излучения с помощью фоторезистора и светодиода.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Один из самых распространенных приемников излучения это фотодиод – приёмник оптического излучения, который преобразует свет в электрический заряд за счёт процессов в р-п-переходе. Работа фотодиода основана на том, что под действием квантов излучения в р-п переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. При наличии внешнего электрического поля, включающего диод в обратном направлении, неосновные носители проходят через р-п переход, создавая обратный ток. При отсутствии внешнего электрического поля неосновные носители разделяются полем р-п перехода и, при коротком замыкании внешней цепи, создают фототок. Также существуют р-і-п фотодиоды, в которых между слоями р- и п- находится і-слой собственной проводимости (і – от «intrinsic», собственный).

Фотодиод можно представить в виде эквивалентной схемы с источником тока и параллельным и последовательным сопротивлениями (рис 1). От величины параллельного сопротивления, шунтирующего источник тока, зависит чувствительность фотодиода – чем больше сопротивление, тем выше чувствительность. Последовательное сопротивление пренебрежимо мало, и его влиянием в большинстве случаев можно пренебречь.

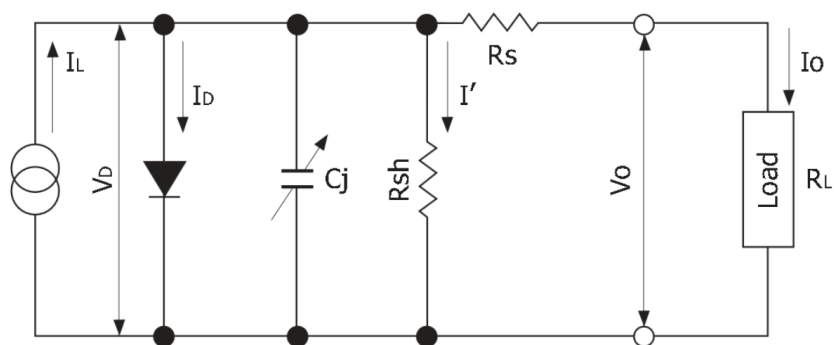


Рис. 1 Эквивалентная схема фотодиода. I_L – ток, вызванный падающим светом (пропорционален уровню света), V_D – напряжение поперек перехода, I_D – диодный ток, C_j – емкость перехода, R_{sh} – шунтирующее сопротивление, I' – ток через шунтирующее сопротивление, R_s – последовательное сопротивление, V_o – выходное сопротивление, I_o – выходной ток, R_L – нагрузка [1]

Фотодиоды генерируют малый ток, который пропорционален освещенности. Ток короткого замыкания фотодиода чрезвычайно линеен от освещенности – более 6–9 декад и поэтому часто используется как мера абсолютной освещенности. Емкость диода C является функцией площади перехода и обратного приложенного напряжения. Параллельное сопротивление $R_{ш}$ обычно уменьшается в 2 раза на каждые 10 градусов роста температуры.

Величина внутреннего параллельного сопротивления $R_{ш}$ (а значит и ток через него), экспоненциально зависит от температуры, обычно уменьшаясь вдвое при снижении температуры на каждые 10 градусов. Поэтому один из способов улучшить чувствительность фотодиода – охладить его. Так, снижение температуры кристалла на 20–30°C повышает параллельное сопротивление примерно на порядок. Охлаждение также позволяет снизить темновой ток – главный источник шума детекторов излучения [2].

Фотодиоды могут работать при нулевом смещении, т.н. фотогальваническом включении, либо при обратном смещении, т.н. фотопроводящем включении (рис. 2).

Наиболее высокая линейность работы достигается при фотогальваническом включении, тогда как наиболее высокая скорость переключения реализуется в фотопроводящем включении. При обратном смещении в цепи будет протекать темновой ток даже при отсутствии освещенности. В фотогальваническом включении темновой ток отсутствует, и шум является тепловым шумом параллельного резистора (выходного сопротивления). В случае фотопроводящего включения появляется дополнительный источник дробового шума.

Темновой ток в фотодиодном включении существенно зависит от температуры р-п перехода, уменьшаясь примерно на порядок каждые 10 градусов, в то время как темновой ток в фотогальваническом включении практически не зависит от температуры р-п перехода.

Наиболее простой способ преобразовать ток фотодиода в напряжение состоит в конвертировании тока с помощью преобразователя ток-напряжение на основе ОУ (или трансимпедансного усилителя). Такая схема обеспечивает больший динамический диапазон и быстродействие в сравнении с обычной схемой инвертирующего усилителя с подключением фотодиода через нагрузку. В фотогальваническом режиме нулевое напряжение на фотодиоде поддерживается потенциалом виртуальной земли операционного усилителя, а ток короткого замыкания преобразуется в напряжение. Для достижения максимальной чувствительности сопротивление резистора обратной связи должно быть весьма большим, а входной ток операционного усилителя – весьма малым. Для получения максимального усиления желательно использовать один каскад усиления, это увеличивает отношение сигнал-шум, т.к. уменьшение сопротивления обратной связи в 2 раза уменьшает сигнал вдвое, а шум резистора уменьшается только в $\sqrt{2}$ раз.

В фотодиодном режиме на диод подается обратное смещение от десятых до нескольких вольт, и чем больше смещение, тем быстрее он будет работать, и больше токи через него будут течь.

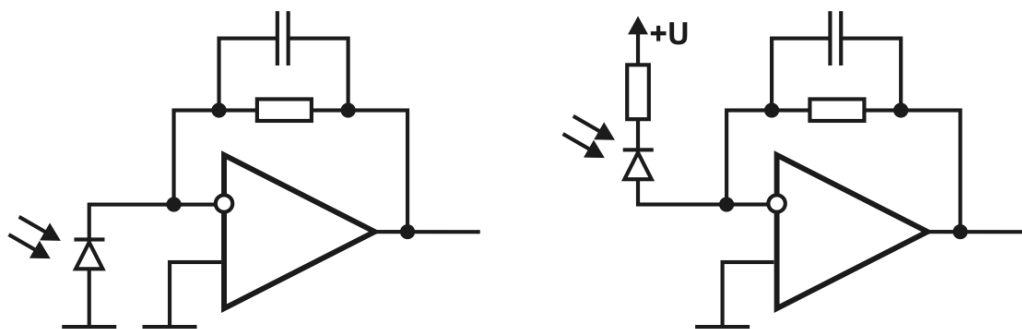


Рис. 2 Фотовольтажное и фотопроводящее включение фотодиода в цепь трансимпедансного усилителя на ОУ

В спектроскопических измерениях фототок короткого замыкания начинается с единиц и десятков пА, поэтому для точного измерения токов фотодиода в диапазоне десятков пА входной ток ОУ должен быть не больше нескольких пА. Такому условию удовлетворяют операционные усилители с полевыми (FET) входами, обеспечивающие сверхнизкий уровень шума и входных токов. Один из основных параметров операционного усилителя, а именно «входной ток смещения», в случае JFET или CMOS-входов, в действительности

является током утечки диодов электростатической защиты входов, т.е. «входным током утечки». Этот ток составляет менее 1 пА при температуре 25° С и меняется примерно вдвое каждые 10° С. Для обеспечения малого значения входного тока утечки обычно применяют комплекс мер по уменьшению путей утечки по плате, тогда удается добиться реальной 1-пА производительности.

Основные параметры фотоприемников

Чувствительность ФД определяется отношением фототока к оптической мощности $\gamma = I/P$ и зависит от длины волны и прочих условий:

- существует верхняя критическая длина волны, за которой энергия фотона становится ниже энергии запрещенной зоны полупроводника, что приводит к резкому снижению чувствительности,
- при короткой длине волны некоторые фотоны поглощаются за пределами i-области фотодиода,
- происходит снижение чувствительности вследствие промежуточной рекомбинации,
- любые отражения от поверхности или внутри фотодиода уменьшают чувствительность,
- чувствительность на единицу интервала длин волн на данной длине волны называется спектральной чувствительностью.

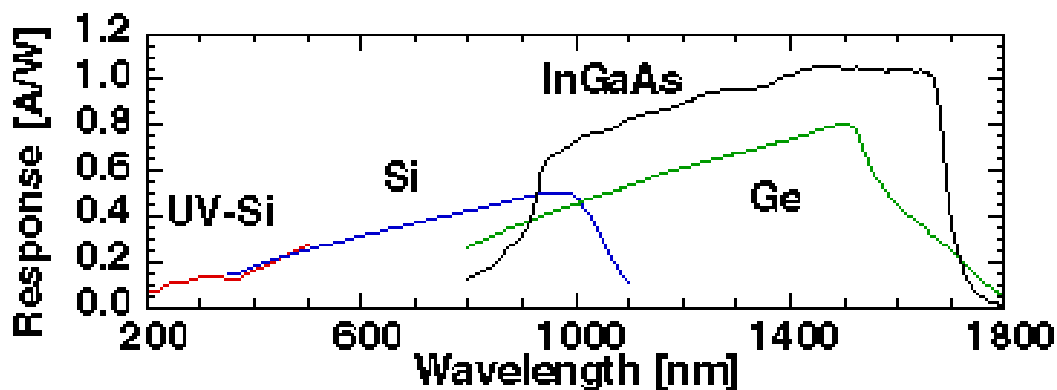


Рис. 3 Спектральная чувствительность нескольких типов фотодиодов. Чувствительность задана в амперах на ватт падающей мощности и не только ограничена типом материала, но и меняется с энергией фотона. Изображение с сайта National Institute of Standards and Technology <http://www.nist.gov/> [3]

Кроме того, для фотодиодов на основе Ge и InGaAs существенно то, что, не смотря на общую слабую зависит от температуры, у верхней границы диапазона наблюдается сильная температурная зависимость.

Так, для германия верхняя граница пропускания сдвигается с коэффициентом приблизительно 1 нм/К. Для германия это наблюдается для длин волн выше 1550 нм, для InGaAs – выше 1650 нм. Здесь температурная стабилизация может обеспечивать лучшую воспроизводимость результатов.

Квантовая эффективность определяет, как хорошо детектор преобразует фотоны в электрический сигнал. Обычно выражается как величина η , равная отношению числа электронов, образованных детектором, к числу упавших фотонов. Также оно может соответствовать доле фотонов, которые будут преобразованы в измеряемый сигнал. Это определение учитывает влияние шума и других потерь сигнала внутри системы, и более точно измеряет эффективность детектора. Квантовая эффективность идеального детектора 100%, существует несколько типов детекторов, которые приближаются к этому пределу, позволяя обнаруживать поглощение единичных фотонов.

Динамический диапазон детектора измеряет способность генерировать удовлетворительный сигнал при разной интенсивности падающего излучения. Детектор с очень высоким динамическим диапазоном будет способен одновременно измерять как очень слабые, так и мощные источники излучения, но часто это связано с уменьшением общей чувствительности. И наоборот – сверхчувствительные детекторы часто обладают малым динамическим диапазоном. Так ФЭУ, способные обнаружить отдельные фотоны, часто могут быть повреждены при освещении излучением относительно средней мощности.

Быстродействие определяет скорость образования электрического сигнала при поглощении фотонов. Время отклика (англ. response time) это количество времени, необходимого для того, чтобы детектор был способен генерировать следующий сигнал. Чем выше быстродействие, тем более короткие флуктуации сигнала могут быть обнаружены. Идеальный детектор обладает нулевым временем отклика, что невозможно для реальных детекторов. Некоторые детекторы, особенно массивы фотодиодов, больше ориентированные на определение пространственной информации, характеризуются временем в миллисекунды, в то время как ФЭУ и быстродействующие фотодиоды характеризуются наносекундными временами. Часто быстродействие оценивают по скорости нарастания сигнала (время, необходимое для увеличения сигнала с 10 до 90%), которое непосредственно связано с полосой пропускания, или как время, необходимое для достижения уровня 63% (т.е. $2^{-1/2}$) от нуля.

В связи с **пространственной неоднородностью** полупроводниковой структуры чувствительность ФД может изменяться в разных точках его поверхности, а это приводит к погрешности

измерения, так как в процессе измерения положение и диаметр падающего луча, как правило, не контролируются. Данный фактор особенно сказывается при измерениях на многомодовом волокне, где наблюдается существенное изменение распределения мощности в поперечном сечении волокна.

Измерители оптической мощности

Типичный измеритель оптической мощности состоит из следующих частей:

- фотоприемника, преобразующего излучение в электрический сигнал;
- усилителя фототока либо трансимпедансного усилителя, сигнал на выходе которого пропорционален мгновенному значению мощности излучения и может быть измерен обычной техникой;
- логарифмирующего устройства, если предполагается работа в большом динамическом диапазоне;
- аналого-цифрового преобразователя;
- устройства отображения.

Выделяют две основные группы измерителей оптической мощности [4]:

- измерители мощности с термофотодиодами (ТФД), основанные на измерении повышения температуры, вызванного оптическим излучением;
- измерители мощности с фотодиодами (ФД), основанные на использовании фотонов оптического излучения, генерирующих электронно-дырочные пары.

Измерители мощности на ФД имеют небольшой диапазон рабочих длин волн, а также нуждаются в абсолютной калибровке, но они используются чаще вследствие своей высокой чувствительности, малой инерционности и простоты. Измерители мощности на ТФД чаще используются в метрологических лабораториях ввиду их высокой стабильности и независимости показаний от длины волны оптического излучения в широком диапазоне. Кроме этого, сами ТФД могут быть непосредственно проверены при помощи измерений электрической мощности.

Большинство измерителей мощности рассчитаны на измерение монохроматического или узкополосного излучения и не способны выделять отдельные длины волн. Измерение мощности излучения источников, имеющих широкий спектр излучения (таких как светодиоды, и тем более лампы накаливания), что приводит к дополнительной погрешности из-за зависимости чувствительности ФД от длины волны измеряемой мощности.

Одним из серьезных ограничений точности при измерении оптической мощности в широком динамическом диапазоне является нелинейность функции преобразования измерителя, которая может быть вызвана как нелинейностью ФД, так и его электронной схемы. Считается, что ФД имеют высокую линейность в диапазоне шести и более декад оптической мощности, однако существуют три фактора, сужающие этот диапазон – это уровень шума, сверхлинейность на средних уровнях и насыщение на высоких уровнях мощности. Нелинейность электронной схемы в свою очередь может быть обусловлена нелинейностью усиления сигнала на низких и высоких уровнях мощности, а также нарушением непрерывности диапазона измерения при переключениях диапазона измерения, что вызвано отличием коэффициентов усиления усилителя тока ФД на различных диапазонах измерения.

Пример измерителя, построенного на ФД, это измеритель лазерной мощности Coherent LaserCheck.

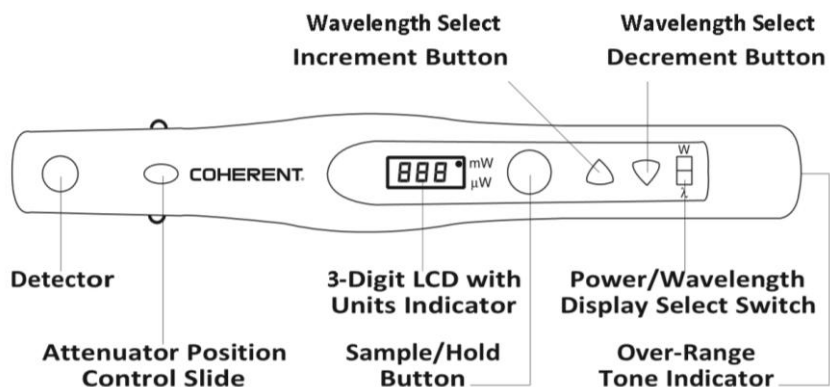


Рис. 4 Схема органов управления измерителя мощности LaserCheck [5]

Спектральная чувствительность измерителя приведена на следующем рисунке. График чувствительности показывает, что применение встроенного аттенюатора позволяет повысить верхний предел измерений на два порядка, при этом снижая примерно вдвое пороговую чувствительность. Также можно заметить, что верхний предел измерения мощности в большей части диапазона ограничен параметрами электронной схемы усилителя, благодаря чему чувствительность выглядит постоянной. Нижний предел чувствительности задается в первую очередь параметрами фотоприемника, т.к. по форме соответствует инвертированному графику спектральной чувствительности кремния.

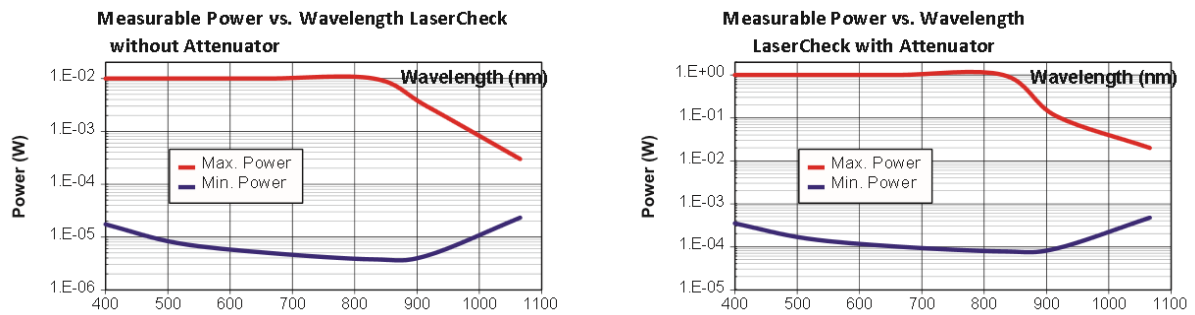


Рис. 5 Спектральная чувствительность измерителя мощности без аттенюатора и с аттенюатором [5]

Простейшим способом измерения мощности является измерение сопротивления фоторезистора, это можно делать обычным тестером. Обычно фоторезисторы изготавливают из полупроводниковых материалов, проводимость которых с увеличением освещенности растет (из-за увеличения числа свободных носителей), и изготавливают в виде змейки, нанесенной на подложку (для увеличения общего сопротивления и чувствительности). Фоторезисторы на порядки менее чувствительны, чем фотодиоды, т.к. являются пассивным элементом и в них отсутствует р-п переход. Также фоторезисторы обладают меньшим быстродействием (между освещением и ростом проводимости обычно проходит около 10 мс и больше), а их сопротивление зависит от температуры. Но они вполне применимы в измерениях, не требующих высокой точности. Кроме того, для ИК области (кроме ближней) они являются единственным приемником (болومتر по сути тоже является фоторезистором).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка к измерениям

1. Ознакомиться с инструкциями по эксплуатации измерителей лазерной мощности Coherent LaserCheck и Spectra-Physics 401C Power Meter.
2. Ознакомиться с параметрами предоставленных фотодиода и фоторезистора.

2. Проведение измерений

1. Провести измерение мощности гелий-неонового лазера обоими измерителями.
2. Провести измерение мощности другого непрерывного лазера теми же измерителями.

3. Оценить изменение фототока либо фотосопротивления при измерении мощности излучения с помощью фотодиода и фоторезистора.
4. Подключить к генератору сигналов светодиод, установить режим синусоидального сигнала.
5. Подключить ко входу осциллографа фотодиод. Установить светодиод так, чтобы его световой поток попадал на фотодиод.
6. Меняя частоту генератора от 10 Гц до 100 кГц установить частоту, при которой амплитуда выходного сигнала составляет 50% от максимальной.
7. Меняя амплитуду входных импульсов определить динамический диапазон.
8. Повторить пп.5–7, подключив параллельно входу осциллографа сопротивление 50 Ом, и также подключив фотодиод через блок усиления (по указанию преподавателя – собранный в предыдущей работе или SR445A).

3. Анализ результатов

1. Насколько воспроизводимы результаты измерения мощности одним приемником и разными?
2. С какими проблемами вы столкнулись при измерении изменения оптической мощности с помощью фотодиода и фоторезистора?
3. Какой элемент при проверке АЧХ ограничил систему? Как можно убедиться в том, что именно этот элемент?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Основные сведения о приемниках оптического излучения
2. Параметры фотодиодов и фоторезисторов.
3. АЧХ системы «генератор импульсов – светодиод – фотодиод – усилитель (или резистор) – осциллограф».
4. Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Как меняется сигнал на выходе фотодиода при включении охлаждения?
2. Как меняется быстродействие системы «генератор импульсов – светодиод – фотодиод – усилитель (или резистор) – осциллограф» в зависимости величины нагрузки фотодиода и почему? Как меняется усиление системы?
3. Покажет ли LaserCheck отличную от нуля мощность, если его настроить на другую длину волны? Почему при измерении мощности широкополосного излучения LaserCheck даст неверный результат?
4. Чем динамический диапазон отличается от спектрального диапазона?

5. Какой динамический диапазон у измерителя мощности LaserCheck?
6. Какой из приведенных типов шумов может быть уменьшен понижением температуры детектора и почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook Si Photodiodes [Электронный ресурс] / Hamamatsu – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
2. Зачем замораживать фотодиоды? [Электронный ресурс] / Сайт компании Терраэлектроника – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: https://www.terraelectronica.ru/news_utr.php?ID=45, свободный. – Загл. с экрана.
3. Detectors [Электронный ресурс] / Сайт ChemWiki – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Instrumental_Analysis/Spectrometer/Detectors/Detectors, свободный. – Загл. с экрана.
4. Методы измерения параметров оптических компонентов, ВОЛС и ВОСП [Электронный ресурс] / Сайт компании ООО "Волоконно-оптическая техника" – Электрон. дан. – 2010. – Режим доступа: <http://www.fot-company.ru/articles/book/6-1.html>, свободный. – Загл. с экрана.
5. LaserCheck – Operating Instructions [Электронный ресурс] / Easy Electronics – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: https://www.coherent.com/downloads/LaserCheck_Operating_Instructions_1268219_RevAB.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
6. Laser Power Meter [Электронный ресурс] / Laservision – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.uvex-laservision.de/fileadmin/user_upload/Messtechnik/Laser-Leistung-Coherent-Lasercheck-Datenblatt.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
7. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

АНАЛИЗ ДРЕЙФА НУЛЯ И ШУМА

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- обрести навыки измерения шума усилителя;
- ознакомиться с видами шумов и методами их снижения;
- провести измерения дрейфа нуля при включении фотодиода и анализ Фурье-спектра шума фотоприемника.

ШУМЫ ФОТОПРИЕМНИКОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ

Все детекторы создают небольшие сигналы, которые не соответствуют поглощению фотона, эти сигналы называют общим словом «шум». Шум не содержит полезной информации, поэтому важно минимизировать отношение сигнала, вызванного шумом, к общему сигналу. Чем выше соотношение сигнал/шум, тем более чувствительный детектор. Существует много видов шумов, каждый из которых имеет разную природу.

Тепловой шум (Джонсовский) – генерируется только элементами, поглощающими или рассеивающими мощность, т.е. практически только резисторами. Вызывается тепловым (броуновским) движением электронов, характеризуется плоским спектром (т.н. «белый шум»). Рассеиваемая шумовая мощность при этом

$$P_{\text{ш}}=4kTB=\langle I_{\text{ш}}^2 \rangle R=\langle U_{\text{ш}}^2 \rangle /R, \text{ где}$$

k – постоянная Больцмана, T – температура, B – полоса частот в Гц, а R – сопротивление. Так, резистор сопротивлением 1 кОм при температуре 300° К и полосе частот 100 МГц представляет собой генератор шумового тока величиной 41 нА.

Тепловой шум обычно дает максимальный вклад в усиленный сигнал. Если детектор является источником токового сигнала, тепловой шум определяется наименьшим сопротивлением, шунтирующим детектор (обычно это нагрузочный резистор). Шум может уменьшен увеличением этого сопротивления ценой ухудшения быстродействия системы. Если детектор является источником напряжения, то тепловой шум можно снизить уменьшением сопротивления нагрузки ценой уменьшения напряжения выходного сигнала.

Фотонный шум – связан со случайным «пуассоновским» распределением времени регистрации отдельных фотонов. Задаёт

теоретический предел чувствительности оптических приборов. В большинстве случаев реальный предел задается другими видами шумов.

Дробовый шум – вызван дискретностью носителей заряда, протекающего через устройство.

Фликкер-шум (шум $1/f$, «розовый шум») – вызывается локальными временными флуктуациями сопротивления, температуры и пр.

Генерационно-рекомбинационный шум – возникает в полупроводниковых приборах и вызван флуктуациями концентрации носителей, электронов и дырок, в результате статистического характера процессов генерации и рекомбинации.

Шум считывания – присущ устройствам с ПЗС-матрицами, связан с ошибкой считывания заряда из ячейки даже при отсутствии сигнала. Выражается в числе электронов, поскольку ПЗС-устройства фактически оперируют пакетами зарядов, состоящих из электронов.

Помехи – мешающие сигналы и паразитные наводки. Могут быть оптическими, акустическими (включая вибрацию), электрическими, тепловыми. Могут иметь большее влияние, чем внутренние шумы, но могут быть, в отличие от последних, уменьшены до незначительного уровня применением схемных решений.

Разным шумам и помехам обычно свойственен свой диапазон частот, как приведено на рис. 1.

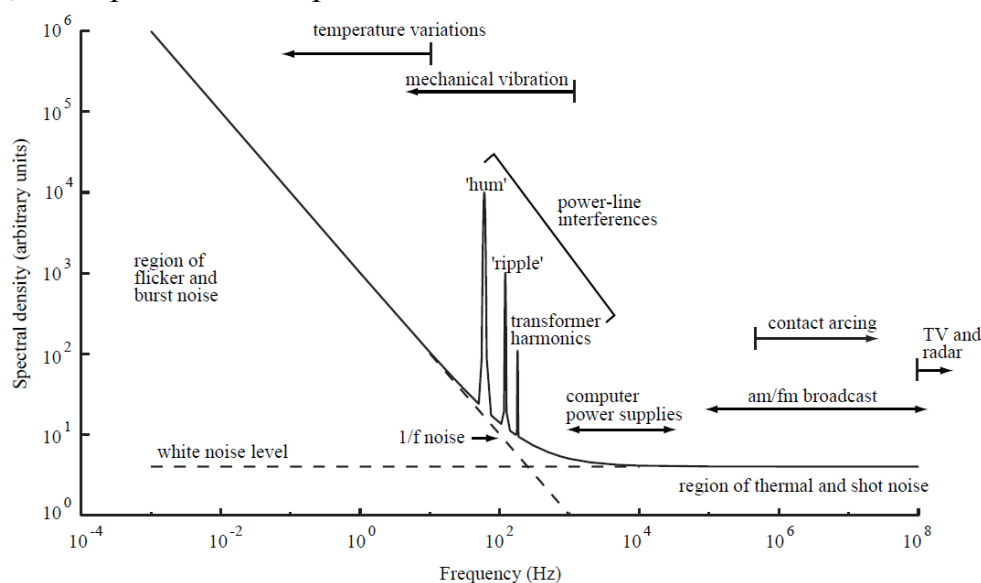


Рис. 1 Схематический спектр шумов и помех [1]

При регистрации оптического сигнала шумы возникают на всех этапах регистрации. Так, регистрируемый световой поток дает фотонный пуассонов шум, фотодетектор вносит свой набор шумов (темновой ток, поверхностный ток утечки, статистические флуктуации усилителей с большим коэффициентом усиления вообще и флуктуации усиления лавин ЛФД в частности), свой вклад вносит и усилитель

(шумы резисторов и полупроводников). Наибольший вклад в выходной сигнал дают шумы, воздействующие на фотодетектор, т.к. сигнал от него проходит через весь усилительный тракт и подвергается максимальному усилению.

В отсутствие падающего на фотодетектор излучения регистрируется темновой шум, состоящий в основном из тока утечки между контактов и генерацией электронно-дырочных пар.

Различные детекторы подвержены этим видам в разной степени, поэтому минимизация шума возможна путем выбора правильного типа детектора правильной конструкции, и подбора правильных экспериментальных условий. Для сравнительной оценки влияния шума используют два основных параметра.

Эквивалентная мощность шума, или нормированная пороговая чувствительность $\Phi_{п,ф}$ (или NEP, The Noise Equivalent Power) определяет чувствительность детектора и определяется как минимальная мощность оптического сигнала на входе, обеспечивающая единичное соотношение сигнал/шум в полосе пропускания 1 Гц (которой по теореме Котельникова соответствует половинное время интегрирования 0,5 с). Величина эквивалентна спектральной плотности шума (выражается в А/Гц^{1/2} или В/Гц^{1/2}), деленной на спектральную чувствительность (А/Вт или В/Вт):

$$\Phi_{н,ф} = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{\Phi}{u_c/u_w} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}$$

Меньшая величина NEP означает большую чувствительность детектора. Например, детектор, характеризующийся NEP=10⁻¹² Вт/Гц^{1/2}, может обнаружить сигнал мощностью 1 пВт с соотношением с/ш равным 1 после полсекунды усреднения (т.к. ширина полосы пропускания 1 Гц эквивалентна 0,5 с времени интегрирования). Если требуемое соотношение с/ш в десять раз больше 10, то усреднять потребуется в 100 раз дольше, т.е. в течение 50 секунд [2].

Для сравнительной характеристики детекторов применяется **нормированная способность к обнаружению D**, или детектируемость (Specific Detectivity, или D*, или просто Detectivity). Эта величина обратно пропорциональна эквивалентной шумовой мощности детектора с единичной рабочей поверхностью и с шириной полосы усилителя 1 Гц:

$D^* = (A\Delta f)^{1/2}/NEP$, где A – площадь детектора, Δf – полоса частот, в которой проводится измерение. Чем выше детектируемость, тем выше производительность.

С учетом шумов график сравнения чувствительности приемников выглядит немного иначе (рис. 2).

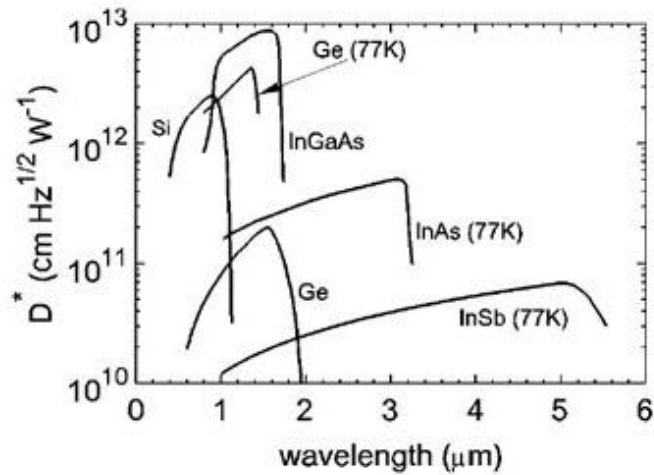


Рис. 2 Нормированная способность к обнаружению D^* для некоторых фотодетекторов. Максимально возможная величина уменьшается с ростом длины волны, поскольку в узкозонных проводниках темновой ток выше [3]

Для измерения шумового спектра в рабочем режиме, т.е. не темнового, следует отделять шум источника излучения от шума фотоприемника. Это можно реализовать с помощью соответствующей схемы измерения, в которой шум лазера вычисляется как кросс-спектр двух одинаковых фотодиодов (характеризует взаимодействие сигналов на разных частотах), а шум фотодиода – вычитанием шумов фотодиодов друг из друга (рис. 3).

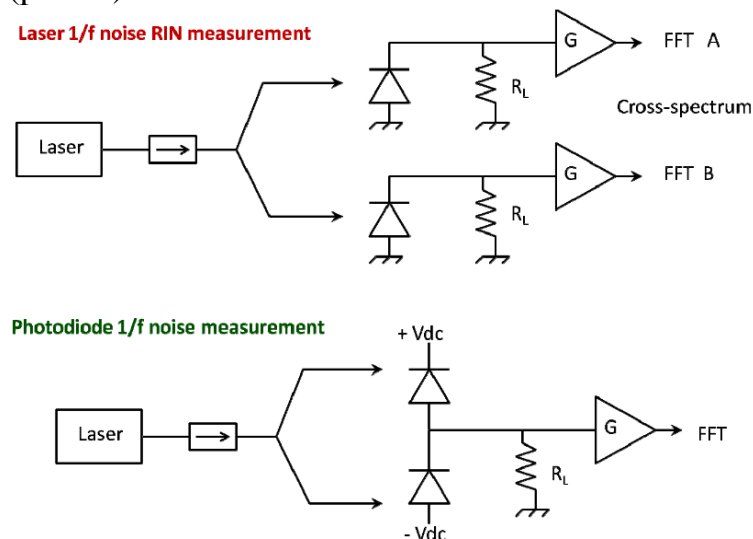


Рис. 3 Схемы измерения для определения низкочастотных шумов (до 100 кГц) лазера и фотодиода. Измерение шума вида $1/f$ для лазера и фотодиода (взято из [4])

Измерение шума

Определение эквивалентного напряжения и тока шума, а отсюда отношения сигнал/шум – достаточно несложный процесс. Обычно для этого достаточно приложить к входу усилителя известный шумовой сигнал, а затем – измерить амплитуду на выходе в определенной полосе частот. При отсутствии известного источника шума для измерения напряжения входного шума усилителя необходимо закортить вход усилителя и измерить среднеквадратичное напряжение шума на выходе $e_{К\ \text{эфф}}$. Считая известным коэффициент усиления по напряжению K_u напряжение входного шума на корень из герца по формуле

$$e_{ш.\ \text{эфф}} = e_{К\ \text{эфф}} / (K_u B^{1/2}) \sqrt{B/\Gamma_{ц}},$$

где B – ширина полосы частот измеряемого сигнала.

Для измерения шумового тока нужно присоединить ко входу усилителя сопротивление R , и повторить измерение шума $e_{К\ \text{эфф}}$. Величина R должна быть достаточно большой, чтобы было заметно возникающий ток, но при этом быть меньше входного сопротивления усилителя. Тогда входной шумовой ток будет найден по формуле

$$I_{ш} = (I/R_{и}) [(e_{К\ \text{эфф}}/K_u B^{1/2}) - (e_{ш}^2 + 4kTR_{и})]^{1/2},$$

где первое слагаемое задается входным токовым шумом, а два других – шум напряжения усилителя и тепловой шум резистора.

Соотношение сигнал/шум для сигнала $U_{и}$ с полным сопротивлением источника $R_{и}$ будет

$$C/Ш = 10 \lg (U_{и} / U_{ш})^2 = 10 \lg \left[\frac{U_{и}^2}{(e_{ш}^2 + i_{ш}^2 R_{и}^2 + 4kTR_{и}) B} \right],$$

где числитель это квадрат напряжения сигнала, а слагаемые знаменателя – квадраты напряжения шума усилителя, тока шума усилителя, проходящего через сопротивление $R_{и}$, и теплового шума $R_{и}$.

Наиболее точный способ измерения – по среднеквадратичному напряжению. Прибор, обладающий такой функцией, должен обладать и полосой пропускания, соответствующей интересуемому диапазону. При отсутствии такого прибора можно воспользоваться обычным вольтметром переменного тока или осциллографом. В первом случае нужно будет скорректировать показания. Так, чтобы получить среднеквадратичное значение гауссова шума, следует к показаниям вольтметра прибавить 13% (это правило работает только при отсутствии в шуме синусоидального сигнала). При наблюдении сигнала на экране осциллографа среднеквадратичное напряжение равно от 1/6 до 1/8 значения разности пиков. Метод субъективен и не точен, но позволяет оценивать шум в широком диапазоне частот [5].

Большинство цифровых осциллографов реального времени обладают функцией быстрого преобразования Фурье (БПФ или FFT – Fast Fourier Transform). После каждого запуска осциллограф может обработать конечный фрагмент сигнала, длительность которого

определяется объемом памяти и частотой дискретизации осциллографа [6].

Количество доступной памяти для оцифровки определяет границу диапазона (частоту Найквиста), в котором будет возможно наблюдение компонентов сигнала. Так, если требуемая частота Найквиста равна 500 МГц, а разрешение по частоте – 10 кГц. Чтобы получить разрешение 10 кГц, время регистрации должно составлять как минимум

$$T = 1 / \Delta f = 1 / 10 \text{ кГц} = 100 \text{ мс}$$

Для цифрового осциллографа с 8-разрядным АЦП и объемом памяти, например, 100 кбайт самая высокая частота, доступная для наблюдения, составит:

$$\Delta f \times N / 2 = 10 \text{ кГц} \times 100 \text{ кбайт} / 2 = 500 \text{ МГц.}$$

Общие рекомендации при FFT анализе следующие:

1. На осциллографе необходимо установить частоту дискретизации в два раза превышающей максимальную частоту, наличие которой предполагается в спектре исследуемого сигнала. Не стоит чрезмерно увлекаться увеличением частоты дискретизации, поскольку разрешение по частоте Δf прямо пропорционально памяти осциллографа и обратно пропорционально частоте дискретизации.

2. Установить максимально возможную длину памяти для данного осциллографа, но учитывая то обстоятельство, что БПФ не может обрабатывать память более 24М, а использование различного рода интерполяций (например $\sin(x)/x$) несколько не улучшит отображение спектра.

3. Использовать по возможности более медленные развертки (не нарушая условий п.1 и п.2), это позволит значительно снизить влияние разрывов при использовании окна.

4. В зависимости от того, что нужно исследовать в спектре полученного сигнала – амплитуду или частоту, необходимо выбирать в настройках конкретный тип окна.

5. При получении сомнительных результатов или, наоборот, для удостоверения правильности полученных результатов, изменить частоту дискретизации (не нарушая условий вывода 1) и сравнить два спектра.

6. При отсутствии необходимости исследовать ВЧ сигналы использовать ограничение полосы пропускания канала вертикального отклонения или использовать эквивалентное увеличение разрядности АЦП.

7. Необходимо учитывать, что большинство осциллографов используют 8-битные АЦП, что определяет теоретический динамический диапазон БПФ в 49,7 dB, на частотах свыше 500 МГц число эффективных бит составляет не более 6,5, что определяет теоретический динамический диапазон БПФ в 37,7 dB.

8. При анализе спектра, полученного с использованием БПФ, нужно так же учитывать влияние собственного шума и гармонических наводок самого цифрового осциллографа [7].

Применяемый в лабораторной работе осциллограф TDS2000B позволяет проводить FFT и получать спектральный состав сигнала, благодаря чему можно анализировать компоненты шума. Но следует учитывать, что в недорогих осциллографах, к которым относится эта модель, алгоритм FFT реализован самым простым образом, и в спектре могут присутствовать артефакты. Кроме того следует учитывать и стандартные ограничения метода:

- Спектр задан на отрезке частот от 0 до $1/T$ (где $1/T$ — частота дискретизации) и периодически повторяется на бесконечность вне этого отрезка.
- Если исходный сигнал содержал частоты выше половины частоты дискретизации, то они будут отображены в более низкие частоты (возможно накладываясь поверх уже существующего сигнала этой частоты) [8].
- Неправильное положение осциллограммы внутри окна (экрана) наблюдения приведет к искажению спектра.
- Недостаточная частота дискретизации является наиболее частой причиной искажения, вызывающей краевые разрывы, отсечение или эффект частотола.

Особенности, связанные с моделями осциллографов, приведены в работе [9].

Температурный дрейф усилителей

Помимо шумов и помех стоит выделить еще одно явление, влияющее на выходной сигнал – дрейф нуля, проявляемый в самопроизвольном отклонении напряжения или тока на выходе от первоначального значения. Дрейф нуля может быть вызван множеством причин – нестабильностью напряжения питания, помехами, наводками, временной нестабильностью работы элементов. Наибольший вклад вносит температурная нестабильность, во-первых, из-за того, что температура работающего прибора обычно отличается от температуры окружающей среды, а также потому, что концентрация свободных носителей в полупроводниках экспоненциально зависит от температуры, что приводит к изменению электрических свойств полупроводниковых устройств. Эта нестабильность оказывает влияние на усилители постоянного тока и почти не оказывает на усилители переменного тока.

Дрейф операционных усилителей можно уменьшить, применяя внешние компенсирующие цепи, или применяя специальные ОУ с «нулевым» температурным дрейфом.

Поскольку температурный дрейф относительно медленно меняется, то для его регистрации достаточно иметь логгер, записывающий значение сигнала с определенной периодичностью (несколько секунд или минут). В нашем случае это можно делать в программе SpectraSense или с помощью цифровых осциллографов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить спецификации нескольких видов фотоприемников (пример такой спецификации приведен по ссылке [10]).
2. Сравнить основные параметры фотодиодов из спецификаций, описывающие чувствительность и шумы. Уделить отдельное внимание параметрам NEP и D^* .
3. С помощью программы SpectraSense провести измерение графика установления темнового тока при включении и выключении тока охлаждения.
4. Провести измерение зависимости ПЗС-матрицы Andor в диапазоне температур от -90°C до комнатной с помощью программы Andor iDus.
5. Зарегистрировать фурье-спектры шума на выходе предусилителя в отсутствие сигнал на фотодиоде при включенном охлаждении и при его отсутствии. Результаты FFT с осциллографа TDS2000B получить и сохранить с помощью программы OpenChoice Desktop.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Почему отличаются эти параметры NEP и D^* у разных фотоприемников как внутри одной серии, так и между ними?
2. Отличаются ли времена установления темнового тока при включении и отключении охлаждения? Почему, как вы думаете?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) Теоретическая часть, краткие сведения об источниках шумов.
- 2) Сравнение шумовых параметров указанных фотоприемников, вероятные причины отличия.
- 3) График установления темнового тока при включении и выключении охлаждения.
- 4) Сравнение фурье-спектров темнового сигналов фотоприемника в разных режимах. Анализ разностного спектра.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ:

1. В чем разница между «белым» и «розовым» шумом?
2. Чем отличается шум от помехи?
3. Для чего вводятся понятия эквивалентной мощности шума и нормированной способности к обнаружению?
4. Какими доступными измерительными устройствами можно установить уровень шума?
5. Какие ограничения при получении FFT на осциллографе вы знаете?

ЛИТЕРАТУРА

1. PHYS 331: Junior Physics Laboratory I. Notes on Noise Reduction [Электронный ресурс] / Сайт Rice University – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.owl.net.rice.edu/~dodds/Files331/noise_notes.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
2. Noise-equivalent power [Электронный ресурс] / Википедия – Электрон. дан. – 2005. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Noise-equivalent_power, свободный. – Загл. с экрана.
3. Richard S. Quimby. From Photonics and Lasers. [Электронный ресурс] / Сайт IHS Engineering360 – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.globalspec.com/reference/21450/160210/chapter-14-6-detector-circuits>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Llopis O., Azaizia S.; Saleh K.; Slimane A.A.; Fernandez A. Photodiode 1/f noise and other types of less known baseband noises in optical telecommunications devices. Noise and Fluctuations (ICNF), 2013 22nd International Conference on. 24-28 June 2013. P. 1–4.
5. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ. – 2014. – 704 с., ил.
6. Петер Касенбахер. Измерение шумов источника питания с помощью осциллографа. Компоненты и технологии. №2. 2008. С. 156-158.
7. Дедюхин А.А. Исследование сигналов с применением спектрального анализа цифровых осциллографов. [Электронный ресурс] / Сайт ЗАО «ПриСТ» – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.prist.ru/info/articles/sa_dpo.htm, свободный. – Загл. с экрана.

8. Простыми словами о преобразовании Фурье. [Электронный ресурс] / Сайт Habrahabr – Электрон. дан. – 2005. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/196374/>, свободный. – Загл. с экрана.
9. FFT Applications for TDS Oscilloscopes [Электронный ресурс] / Сайт Tektronix – Электрон. дан. – 2005. – Режим доступа: www.tek.com/dl/55W_8815_2.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
10. InGaAs PIN photodiode G8422/G8372/G5852 series. Long wavelength type (up to 2.1 μm) [Электронный ресурс] / Сайт DataSheetCatalog – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/hamamatsu/G8422-05.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
11. Осциллограф ТЕКТРОНИХ. Серия TDS1000В и TDS2000В. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / Сайт компании ЗРК – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://zrk.ru/scopemeter/tds1000b_2000b/index.htm, свободный. – Загл. с экрана.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

УПРАВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫМ МОНОХРОМАТОРОМ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Ознакомиться с принципами работы решетчатого монохроматора
- Ознакомиться с принципами управления монохроматора (система команд, управление через командную строку и управляющие программы)
- Ознакомиться с влиянием выбранных шага решетки, ширины щелей, шага перестройки, времени выборки и числа усреднений на результаты измерений.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Монохроматоры

При проведении спектральных исследований выделение нужного участка спектра обычно происходит с помощью монохроматора либо спектрометра (первый выделяет одну длину волны, второй – диапазон длин волн). Схема типичного универсального дифракционного монохроматора, показана на рис. 1.

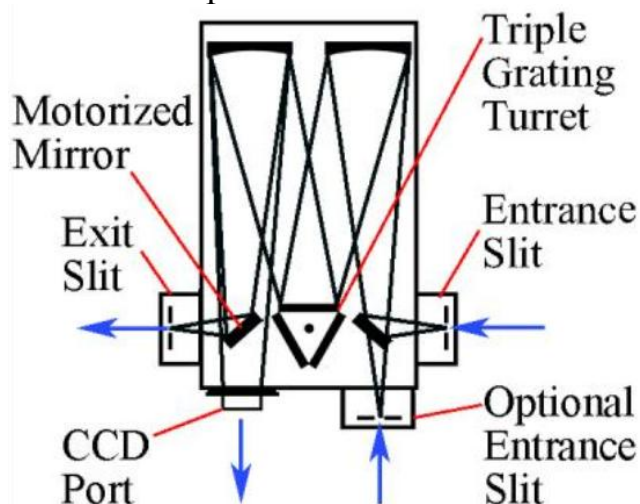


Рис. 1 Схема решетчатого монохроматора/спектрографа на примере монохроматора Acton SpectraPro-2558i [1]

Свет, проходящий через входную щель, попадает на зеркало, где коллимируется и направляется на дифракционную решетку, там он дифрагирует и направляется к другому зеркалу, которое его фокусирует на выходную щель. Одному определенному положению дифракционной решетки соответствует свет в узком диапазоне длин волн, который

может пройти через выходную щель. Вся установка размещается в специальном корпусе, содержащем дополнительные диафрагмы и различные экраны для того, чтобы свести к минимуму эффект рассеивания света. [2].

В монохроматоре детектором является один фотодиод или ФЭУ, размещенные после выходной щели. В некоторый момент времени на него попадает только один узкий диапазон длин волн, затем решетка поворачивается, и так сканируется определенный диапазон длин волн. Полный спектральный анализ может занять достаточно много времени, если сканирование проводится в широком спектральном диапазоне и особенно с высоким разрешением, т.к. при узких щелях на фотодетектор попадает мало света, и сканирование приходится проводить медленно. Получение спектра проходит быстрее на спектрометре, в котором используется детектор, который может детектировать все компоненты длин волн одновременно. Таким детектором может быть ПЗС-матрица. На используемый в лабораторной работе монохроматор Астон является одновременно и спектрометром, т.к. у него два выхода. На одном установлена щель с фотодиодом, на втором – ПЗС-линейка.

В ряде случаев, когда не требуется высокое спектральное разрешение и универсальность, могут применяться компактные монохроматоры, где дифракционная решетка заодно выполняет роль фокусирующего элемента. Схема такого прибора, используемого в лабораторной работе, приведена на рис. 2.

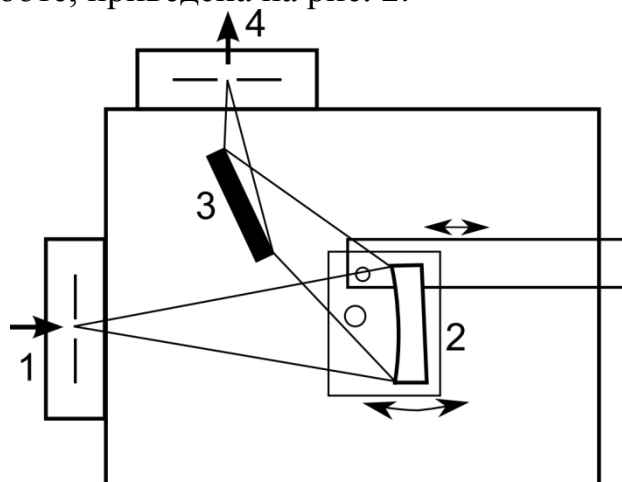


Рис. 2 Схема компактного ИК монохроматора. 1 – входная щель, 2 – вогнутая дифракционная решетка, 3 – зеркало, 4 – выходная щель.

Основные параметры используемых в работе монохроматоров приведены в таблице 1.

Табл. 1 Параметры монохроматоров.

	Компактный ИК монохроматор	Acton SpectraPro-SP2558i
Фокальная длина	120 мм	500 мм
Диапазон	700–2200 нм	0–11200 нм @ 150 мм ⁻¹ 0–1400 нм @ 1200 мм ⁻¹ 0–700 нм @ 2400 мм ⁻¹
Решетка	300 мм ⁻¹	150, 1200 и 2400 мм ⁻¹
Тип решетки	Вогнутая, 36×36 мм	Плоская, 68×68 мм
Дисперсия	11,4 нм/мм @ 750 нм 9,2 нм/мм @ 1400 нм 7,4 нм/мм @ 1800 нм 5,8 нм/мм @ 2200 нм	13 нм/мм @ 150 мм ⁻¹ и 435 нм 1,52 нм/мм @ 1200 мм ⁻¹ и 435 нм 0,75 нм/мм @ 2400 мм ⁻¹ и 435 нм
Ширина щели	0,01–4 мм	0,01–3 мм
Управление	Механическое	Программное

Дифракционные решетки

Дифракционная решетка состоит из периодической системы штрихов, нанесенных на равном расстоянии. Основные параметры решеток:

Период решетки, обратный плотности штрихов (Groove density, штрихов на мм) определяет дисперсионные свойства решетки и влияет на диапазон механического сканирования (полностью диапазон определяется параметрами конкретной модели монохроматора). Большая плотность дает большую дисперсию и лучшее спектральное разрешение. Поэтому при работе в различных областях спектра используются решетки с различным числом штрихов: для УФ области 3600–1200 штр/мм, для видимой области 1200–600 штр/мм и для ИК области менее 300 штр/мм.

Длина волны блеска (Blaze wavelength) определяет, при каком угле совпадает дифракционный максимум, вызванный интерференцией от разных штрихов, с максимумом отражения, вызванным углом нарезки штрихов. Говорит о том, что решетка оптимизирована для максимально эффективного отражения на указанной длине волны в определенном порядке отражения.

Эффективный диапазон (Quantum wavelength range) указывает область длин волн, в котором эффективность отражения максимальна, в общем случае определяется длиной волны блеска.

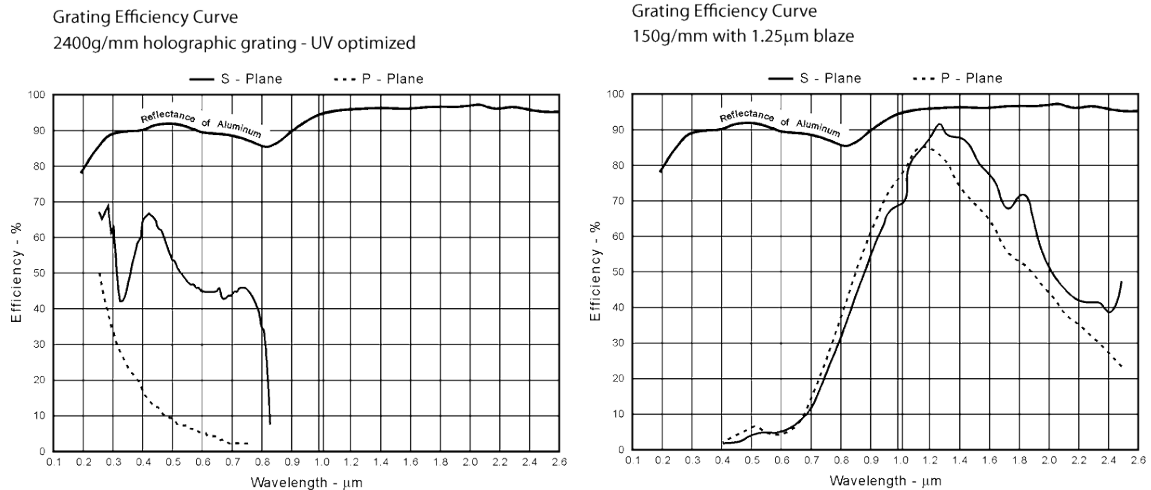


Рис. 3 Отражательная способность некоторых решеток, установленных в монохроматоры Acton. Эффективность решеток указана в относительных единицах и существенно зависит от геометрии использования и техники измерения [3].

Кратные порядки дифракции

Когда параллельный пучок монохроматического излучения падает на решетку, свет дифрагирует в направлениях, соответствующих разным значениям m уравнения решетки. При освещении решетки полихроматическим светом зеркально, в нулевом порядке, отражаются все длины волн, в остальных порядках каждая длина волны отражается в соответствии с уравнением решетки.

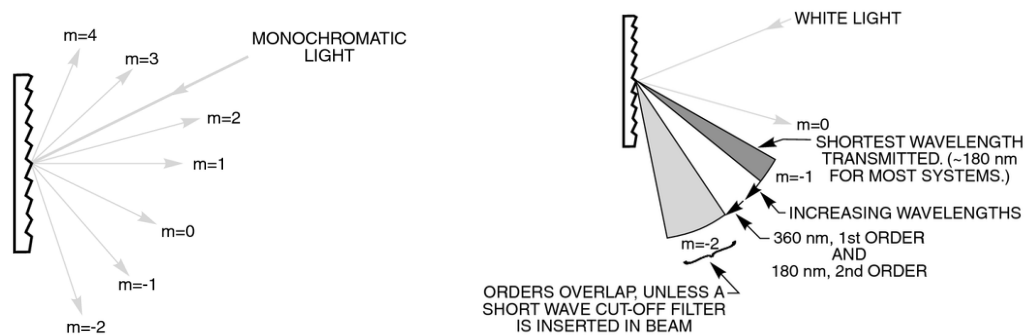


Рис. 4 Схема образования высших порядков дифракции для монохроматического излучения и белого света [4].



Рис. 5 Нулевой, первый и высшие порядки дифракции при разложении белого света. [5]

Управление монохроматорами

Современные приборы предусматривают возможность управления через порты USB, RS-232 или GRIB. Используемый в работе монохроматор Acton SpectraPro-2558i поддерживает только первые два, при этом USB используется для симуляции работы последовательного порта RS-232. Управление монохроматором через порт USB либо RS-232 возможно несколькими способами. Во-первых, с помощью программы SpectraSense, автоматизирующей основные сценарии работы, включая оцифровку и обработку данных. Меньше возможностей предоставляет программа SpectraPro, позволяющая выбрать нужную решетку и щель, выставить нужную длину волны, а также провести калибровку прибора. Помимо этого она позволяет отправлять на монохроматор отдельные команды, приведенные в мануале (это же можно делать через сторонние программы работы с последовательным портом). Последним вариантом управления прибором является написание собственной компьютерной программы, которая будет отправлять команды на микроконтроллер.

Почти все современные приборы поддерживаются библиотеками графического языка программирования LabVIEW, поэтому их управление может быть организовано на этом языке. Также оборудование обычно поддерживается библиотеками языка C и некоторых других.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка к измерениям

1. Изучить инструкции к монохроматору Acton, управляющим программам SpectraPro и SpectraSense, а также интерфейсному блоку SpectraHub.
2. Изучить инструкцию к гелий-неоновому лазеру.

2. Проведение измерений

1. Включить гелий-неоновый лазер, монохроматор, управляющий компьютер.
2. Запустить программу SpectraSense или SpectraPro, проверить переключение зеркал входных и выходных щелей, смену дифракционных решеток. Опробовать смену рабочей длины волны через программы, а также с помощью отдельных команд через командную строку программы SpectraPro.
3. Снять с выходной щели монохроматора приемник (фотодиод). Пропуская лазер через монохроматор на кратных длинах волн

провести его наблюдение. Пропустить через монохроматор излучения от источника белого света, повторить опыт на кратных длинах волн лазер, а также другой длины волны из видимого диапазона (на выбор).

4. Вместо штатного фотодиода установить «самодельный» кремниевый фотодиод либо фоторезистор, измерить фототок или сопротивление на кратных длинах волн.

3. Анализ результатов

1. Оформить данные, полученные на монохроматоре, в виде таблицы.
2. Построить в программе Origin (или аналоге) спектр излучения, полученного на монохроматоре.
3. Как меняется интенсивность излучения по мере роста длины волны?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Информация о монохроматорах и решетках.
2. Экспериментальные данные
3. Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. В чем разница между монохроматором и спектрометром?
2. Отличаются ли внешне спектры высшего порядка при разложении монохроматического света? А белого?
3. Почему преломляющая способность решетки для излучения с разным направлением поляризации разная?

ЛИТЕРАТУРА

1. Operating Instructions Acton Research Corporation. SpectraPro-2500i [Электронный ресурс] / Center for Detectors – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/PrincetonActon/SP-2500i.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
2. Спектрометры на основе дифракционных решеток или призм [Электронный ресурс] / Лазерный Портал – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_769, свободный. – Загл. с экрана.
3. Datasheets/Gratings [Электронный ресурс] / Princeton Instruments – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.princetoninstruments.com/products/spec/actonseries/dsheet.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Grating Physics. Tutorial [Электронный ресурс] / Сайт Newport Corporation – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа:

- <http://www.newport.com/Grating-Physics/383720/1033/content.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Дифракционная решётка [Электронный ресурс] / Сайт <http://physics.nad.ru> – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://physics.nad.ru/Physics/Cyrillic/DG10/DG.htm>
 6. Acton Research Corporation SpectraPro® Monochromator Control Software for Windows [Электронный ресурс] / Center for Detectors – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/acton/old/MANUAL/Monochromator_Control_Software_Manual.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
 7. SpectraSense User's Guide [Электронный ресурс] / Center for Detectors – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Acton/old/MANUAL/SpectraSense_Manual.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
 8. SpectraSense Software Developer's Kit [Электронный ресурс] / Princeton Instruments – Электрон. дан. – 2000. – Режим доступа: ftp://ftp.princetoninstruments.com/public/Manuals/Acton/SpectraSense_SDK_Manual.PDF, свободный. – Загл. с экрана.
 9. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

КАЛИБРОВКА МОНОХРОМАТОРА

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Ознакомиться с понятиями спектральной чувствительности и передаточной характеристики;
- ознакомиться с видами источников излучения, близких к спектру излучения АЧТ;
- обрести навыки спектральной калибровки приборов;
- получить калибровочную кривую, позволяющую корректировать спектры люминесценции.

КАЛИБРОВКА ПО СПЕКТРУ АЧТ

Как приемники излучения характеризуются спектральной чувствительностью, так и все оптические элементы схемы характеризуются спектральным пропусканием. Совокупность этих спектральных характеристик затрудняет количественную и качественную оценку параметров исследуемых веществ, что делает невозможным сравнение данных, полученных на разных длинах волн. Для коррекции проводится калибровка спектральной чувствительности прибора целиком.

Под передаточной функцией $T(\lambda)$ понимается такая функция, которая включает в себя как спектральные зависимости коэффициентов пропускания (или отражения) всех оптических элементов, находящихся в канале сбора люминесценции, монохроматора, так и спектральную чувствительность приемника излучения. Определив эту функцию, мы сможем получить истинный спектр люминесценции $J(\lambda)$ как отношение:

$$J(\lambda) = U(\lambda) / T(\lambda),$$

где $U(\lambda)$ – спектр люминесценции, полученный при измерении.

Поскольку передаточная функция прибора целиком обычно неизвестна, то её вид необходимо определять с помощью специального эксперимента, т.е. калибровкой.

Калибровка спектральной чувствительности прибора предполагает использование в качестве эталонного излучения нагретых тел, спектр которых совпадает со спектром излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с известной цветовой температурой. Тогда, поскольку спектр АЧТ известен из формулы Планка

$$u(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1},$$

передаточная функция будет найдена как отношение зарегистрированного спектра к спектру идеального АЧТ, полученному по этой формуле.

Наиболее часто для калибровки спектральной чувствительности в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра используются вольфрамовые лампы накаливания, спектр излучения которых при определенных токах достаточно близок к спектру АЧТ с цветовой температурой 2800–2900 К и имеет максимум в области 1,0–1,1 мкм. При этом, однако, спектральная интенсивность излучения источника очень велика, что приводит к насыщению высокочувствительных приемников излучения, таких как ПЗС матрицы и фотодиоды, включая лавинные. Вследствие этого одной из проблем является задача ослабления потока эталонного излучения при прецизионной калибровке.

Ослабить избыточный поток излучения от эталонного источника можно диафрагмированием светового потока, либо уменьшением ширины щелей монохроматора, однако оба способа имеют свои недостатки. При диафрагмировании источника засвеченной может оказаться лишь часть дифракционной решетки. Это уменьшает спектральное разрешение, а из-за неполного заполнения входной апертуры геометрия хода лучей становится отличной от реальных условий измерения. Также, при наличии у решетки локальных дефектов поверхности, диафрагмирование либо приводит к игнорированию этих дефектов в результатах калибровки, либо наоборот, преувеличивает их вклад.

Уменьшение щелей монохроматора также имеет границы. Во-первых, физические, задаваемые точностью микрометрических винтов, во-вторых, в ближней ИК области, спектральные, т.к. присутствующие в воздухе пары воды имеют спектр поглощения с очень узкими линиями (менее 0,5 нм), поэтому получение корректного спектра возможно только при очень частой выборке.

Для ослабления светового потока в видимой области традиционно используются нейтральные светофильтры, например, стекла НС, и фотометрические сетки. Заметим, что в ближней ИК области пропускание стекол перестает быть равномерным, изменяется также пропускание фотометрических сеток, хотя и не столь существенно.

Очевидно, что условия калибровочного эксперимента должны быть идентичны рабочему эксперименту, т.е. в оптическом тракте установки должны присутствовать те же элементы и один и тот же детектор, геометрия установки также д.б. по возможности одинаковой в обоих экспериментах (это касается и ширины входной и выходной щелей). Также считается, что коэффициент усиления электрических

схем не зависит от амплитуды сигнала и точно не зависит от длины волны излучения, поэтому его не учитывают. Это связано с тем, что, обычно, в опыте редко стремятся получить абсолютные величины энергетических параметров излучения, а калибровка требуется только для восстановления формы сигнала. Однако на эти моменты следует обращать внимание при проведении серии измерений, когда задачей является сравнение параметров ряда образцов [1].

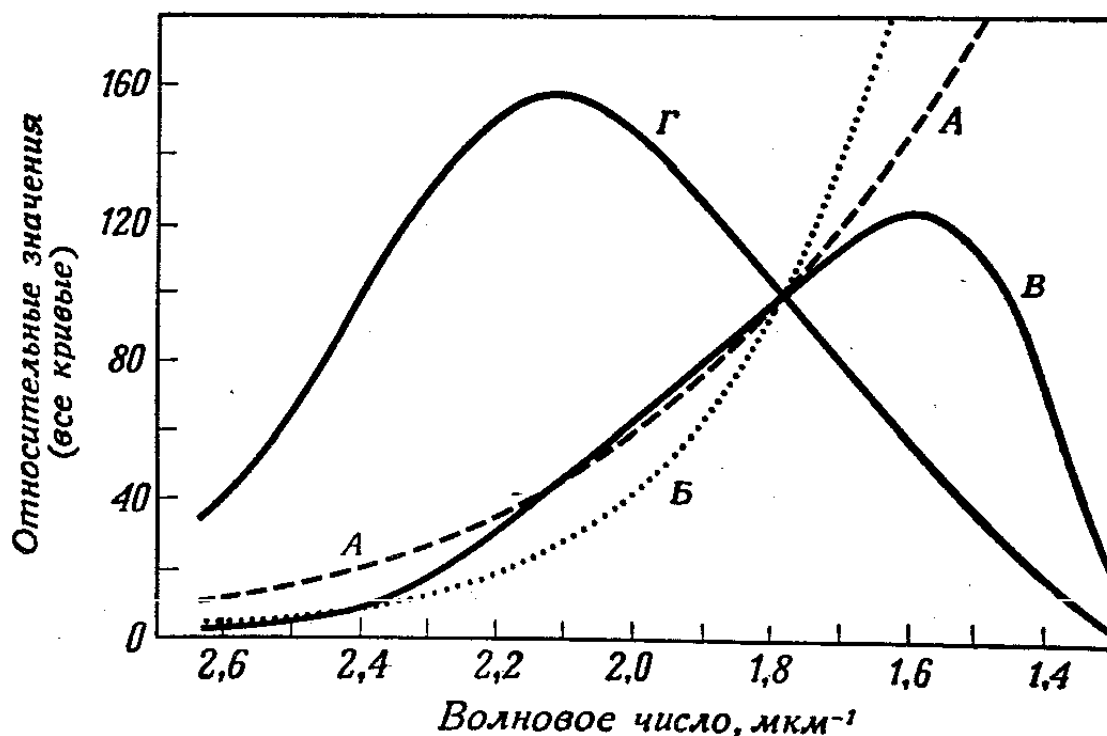


Рис. 1. Определение кривой чувствительности для видимой области. А — относительное спектральное распределение света стандартной лампы, работающей при цветовой температуре 2856 К; Б — то же, что и А, но на единичный интервал волновых чисел, В — выход с фотоумножителя при постоянной ширине щели; Г — кривая спектральной чувствительности (т. е. ординаты кривой В, деленные на ординаты кривой Б) [2]

КАЛИБРОВКА ПО ДЛИНАМ ВОЛН

Калибровка классического спектрографа проводится пропусканием через узкую входную щель излучения источника, содержащего эмиссионные спектральные линии. Поскольку положение линий заранее известно, становится возможным связать положение поворота решетки с длиной волны. Для калибровки по длинам волн используют излучение газовых лазеров и газоразрядных ламп — ртутных или специальных, наполненных смесью, дающей спектральные линии в требуемом диапазоне излучения.

Применять для калибровки полупроводниковые лазеры не следует из-за того, что длина волны таких источников находится в некотором диапазоне, определяемом структурой лазера, а не задается фиксированным переходом между уровнями в атоме.

Существуют специальные газоразрядные источники излучения для калибровки длины волны спектрометра в диапазоне $\sim 200\text{--}2000$ нм. Основные типы таких источников – ртутно-аргоновый (HG-1), криптоновый (KR-1), неоновый (NE-1), аргоновый (AR-1) и ксеноновый (XE-1). При необходимости можно воспользоваться некоторыми бытовыми, промышленными или естественными источниками излучения, содержащими известные спектральные линии – ртутные лампы освещения внутреннего освещения, натриевые лампы уличного освещения, и даже световой фон неба.

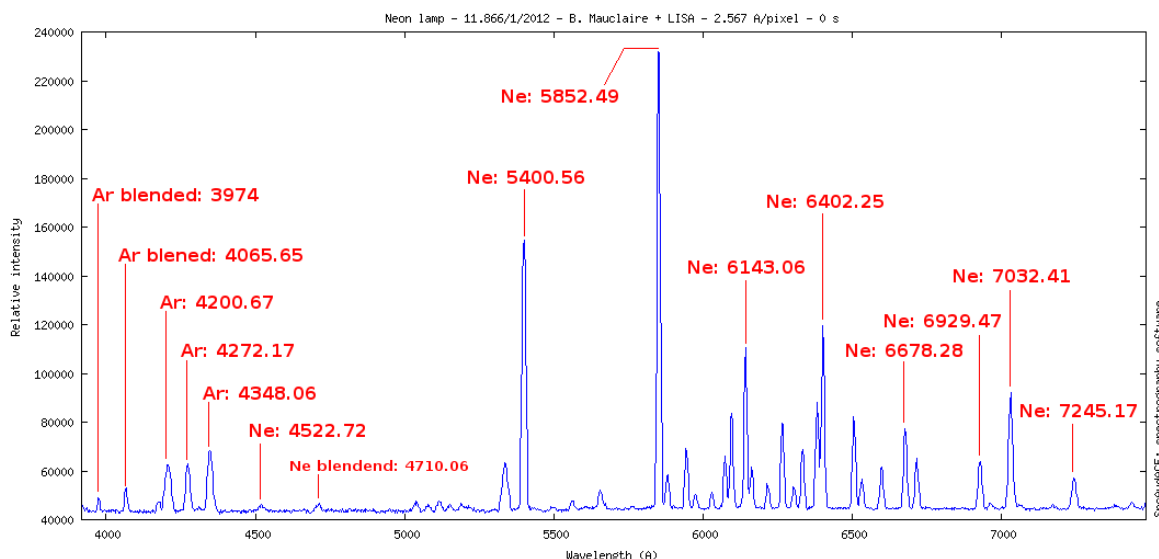


Рис. 2 Типичный спектр калибровочного источника на основе неона [3]

Самым доступным источником для калибровки в видимом диапазоне, ввиду распространенности таких ламп для освещения, пока еще является ртутная лампа. Основное излучение паров ртути приходится на УФ диапазон, на линию 253,7 нм, но отдельные линии наблюдаются и в ближнем ИК диапазоне. Добавим, что в мире ртутные источники, как и другие изделия, содержащие ртуть, постепенно вытесняются из обращения.

В монохроматорах фирмы Acton калибровка по длинам волн завершается вводом поправочных коэффициентов в программе Spectra Pro (см. мануал программы).

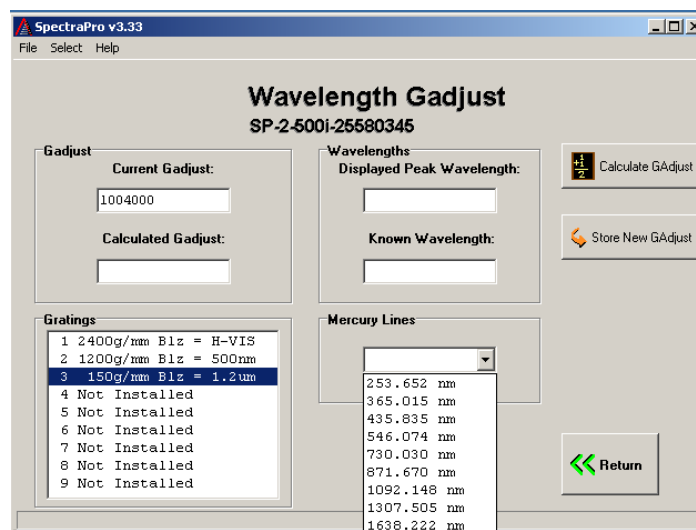


Рис. 3 Окно программы SpectraPro, позволяющее рассчитывать и вводить калибровочные коэффициенты, в т.ч. на основании регистрируемой длины волны ртутных линий.

Таблица 1 Длины волн основных спектральных линий ртути видимого диапазона

Цвет линии	Длина волны, нм
Фиолетовая	404.656
Фиолетовая	407.781
Синяя	435.835
Зеленая	546.074
Желто-оранжевая	576.959
Желто-оранжевая	579.065

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Получить источник излучения (ИИ) со спектром АЧТ и включить его прогрева. В качестве эталонного источника излучения в работе используется лампа накаливания (ЛН) со спектром излучения, соответствующим АЧТ с цветовой температурой 2856 К (максимум излучения находится на длине волны 1,05 мкм)

После установки АЧТ на оптической оси собирающей системы (необязательно в фокусе, т.к. яркость источника избыточна!), попеременно попробовать вывести ИИ из фокуса собирающей системы, диафрагмирование ИИ, фотометрические сетки, нейтральные светофильтры.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Теоретическая часть, краткие сведения об источниках калиброванного излучения и проблеме калибровки по спектру и по длинам волн.
2. Расчет калибровочной кривой.
3. Расчет спектра пропускания добавленного объекта.
4. График со спектром образца и нормированным спектром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марычев М.О., Горшков А.П. Практическое руководство по оптической спектроскопии твердотельных наноструктур и объёмных материалов . Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Физико – химические основы нанотехнологий» Нижний Новгород, 2007, 89 с.
2. С. Паркер. Фотолюминесценция растворов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 512 с
3. Low resolution wavelength calibration [Электронный ресурс] /сайт Wsdiscovey – Электрон. дан. – 2012. – Режим доступа: <http://wsdiscovey.free.fr/astronomie/spectro/experiences/calbr/index.html>, свободный.
4. Парфенов П.С., Литвин А.П., Баранов А.В., Вениаминов А.В., Ушакова Е.В. Калибровка спектральной чувствительности приборов для ближней инфракрасной области // Журнал прикладной спектроскопии. - Минск, 2011. - Т. 78. – № 3. – С. 460–466. – 7 с.
5. Высокочувствительный компактный спектрометр Модель SC125 [Электронный ресурс] / Сайт компании СОЛАР Лазерные Системы – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://solarls.by/ru/products/13/2/14/311.html>, свободный.
6. Spectral calibration [Электронный ресурс] / Портал франкоязычных астрономов-любителей – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.astrosurf.com/buil/us/spe2/hresol4.htm>, свободный.
7. Каталог типичных спектров калибровочных источников Typical spectra of ORIEL spectral calibration lamps [Электронный ресурс] / Портал Massachusetts Institute of Technology – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://web.mit.edu/8.13/8.13d/manuals/Hydrogenic/oriel-typical-spectra-of-calibration-lamps.pdf>, свободный.
8. Strong Lines of Mercury (Hg) [Электронный ресурс] / сайт Physical Measurement Laboratory национального института стандартов и технологии США – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm>, свободный.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- обрести навыки регистрации и анализа спектров люминесценции квантовых точек в ближней ИК области спектра (0,9–2,1 мкм);
- ознакомиться с оптической схемой установки для регистрации люминесценции в ближнем ИК-диапазоне спектра и принципами работы ИК-детекторов на основе InGaAs фотодиодов;
- провести измерения спектров люминесценции образцов растворов квантовых точек PbS или редкоземельных стекол.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Инфракрасное излучение (ИК излучение) – электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным краем видимого света (с длиной волны $\lambda = 0,74$ мкм) и коротковолновым радиоизлучением ($\lambda \sim 1-2$ мм). Инфракрасную область спектра обычно условно разделяют на ближнюю (0,74–2,5 мкм), среднюю (2,5–50 мкм) и дальнюю (50–2000 мкм).

Прецизионные спектральные ИК измерения имеют большое значение при исследовании ионов редкоземельных элементов в различных матрицах, а также люминофоров на основе нанокристаллов (квантовых точек, КТ) узкозонных полупроводников, квантовые переходы которых лежат в ближней ИК области спектра. Это квантовые точки на основе халькогенидов свинца PbS, PbSe, PbTe, которые считаются перспективными для применения в устройствах ИК диапазона.

Для регистрации спектров люминесценции в ближнем ИК диапазоне особую важность имеет выбор подходящего приемника излучения. Приёмники инфракрасного излучения основаны на преобразовании энергии ИК излучения в другие виды энергии, которые могут быть измерены обычными методами. Существуют тепловые и фотоэлектрические приёмники ИК излучения. В тепловых приемниках поглощённое излучение вызывает повышение температуры термочувствительного элемента приёмника, которое и регистрируется. Примером таких приемников являются болометры, основанные на зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры, или фотопроводники группы сернистого свинца (PbS,

PbSe, PbTe). В фотоэлектрических приёмниках поглощённое излучение приводит к появлению или изменению электрического тока или напряжения. Это обычно фотодиоды.

Для ИК диапазона применяют PIN-фотодиоды. В p-i-n структуре обеднённая i-область заключена между двумя областями противоположной проводимости (рис 1). Это обеспечивает чувствительность в длинноволновой части спектра. В области до 1 мкм наиболее распространены pin-диоды на основе кремния. Для больших длин волн в ближнем ИК диапазоне применяются InGaAs pin-диоды. Альтернативой могут быть и германиевые pin-диоды [1].

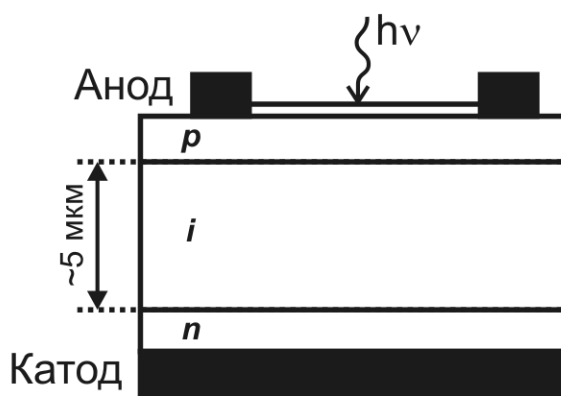


Рис. 1 Схематичное изображение PIN фотодиода

InGaAs pin-фотодиоды, применяемые в ближней ИК-области спектра в качестве детекторов, отличаются с малой емкостью, низким уровнем шума, низким темновым током и высоким быстродействием [2]. При охлаждении с помощью элементов Пельтье достигается очень низкий темновой ток и лучшая пороговая чувствительность. InGaAs детекторы для ближней ИК спектроскопии могут быть разделены на три типа:

- Стандартный тип – InGaAs pin-фотодиоды со спектральным диапазоном 0,9–1,7 мкм, которые обладают высоким быстродействием и низким уровнем шума из-за низкой емкости и большого внутреннего сопротивления.
- Длинноволновые InGaAs pin-фотодиоды имеют спектральный диапазон до 2,1–2,6 мкм. Однако, они обладают большим уровнем шума и большим темновым током.
- Линейки из InGaAs pin-фотодиодов, стандартных либо длинноволновых. Обычно линейки собираются в виде одной интегральной схемы с предусилителями, отдельными для каждого фотодиода, и могут оснащаться одно- или двухкаскадным термоэлектрическим холодильником.

Из особенностей pin-фотодиодов стоит отметить достаточно большой разброс параметров от экземпляра к экземпляру, что вносит дополнительный вклад в разброс напряжения от каждого пикселя в линейках pin-фотодиодов.

Для фотодиодов на основе Ge и InGaAs следует учитывать и то, что, не смотря на общую слабую зависимость от температуры, у верхней границы диапазона наблюдается сильная температурная зависимость. Так, для германия верхняя граница пропускания сдвигается с коэффициентом приблизительно 1 нм/К. Для германия это наблюдается для длин волн выше 1550 нм, для InGaAs – выше 1650 нм. Здесь температурная стабилизация может обеспечивать лучшую воспроизводимость результатов.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка построена на базе монохроматора «Acton SP-2558» с апертурой $f/6,5$, фокусным расстоянием 500 мм и дифракционной решеткой 150 штр/мм, который обеспечивает необходимое спектральное разрешение при достаточно высокой светосиле. Спектр люминесценции регистрируется сменным охлаждаемым до -20°C InGaAs фотодиодом, установленным за выходной щелью монохроматора. Для согласования выходной щели монохроматора с приемной площадкой фотодиода (диаметр 1 мм) применен фокусирующий объектив $21\times 0,4$. После предварительного усиления сигнал фотодиода, оцифровывается интерфейсным модулем «SpectraHub» [1].

В качестве приемников используется охлаждаемый InGaAs фотодиод фирмы Hamamatsu расширенного (G5852-21, 0,9–2,05 мкм) спектрального диапазона [3]. Предусилители сигналов фотодиодов реализованы на основе операционных усилителей с полевыми входами AD645, позволяющих создать трансимпедансный усилитель со сверхмалым входным током [4]. Чувствительность приемника с учетом предусилителя на длине волны, соответствующей максимуму чувствительности фотодиода (1,95 мкм), составляет $1,2\times 10^7$ В/Вт, минимальный уровень детектируемой световой мощности 0,4 пВт. Спектральная чувствительность комплекса приведена на рис 2. Основные параметры фотодиодов приведены в табл. 1.

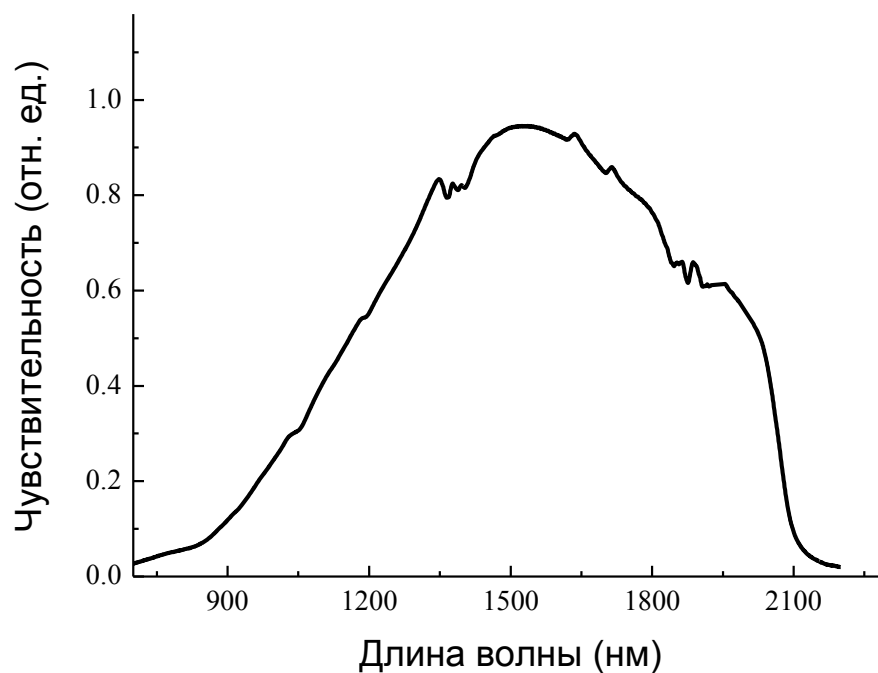


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность комплекса.

Табл. 1. Основные рабочие характеристики

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон	850–2100 нм
Спектральное разрешение	Рабочее – 7 нм при ширине щели 0,5 мм
	Предельное – до 0,1 нм (щель 0,01 мм)
Динамический диапазон	10^4
Лазерное возбуждение	532, 632 нм
Светодиодное возбуждение	520, 590, 640, 840 нм
Предел чувствительности	0,4 пВт

Оптическая схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

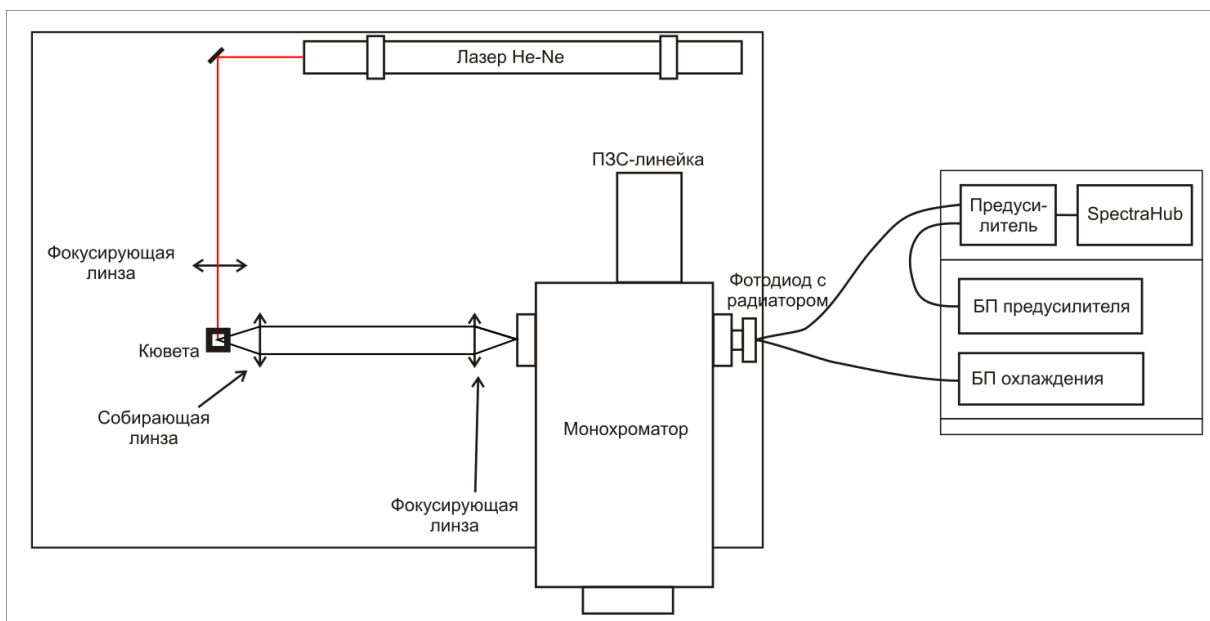


Рис. 3. Функциональная схема лабораторной установки.

Также в работе используется компактный спектрограф, основанный на простой схеме Черли-Тернера, регистрирующий одномоментное сигнал во всем диапазоне работы благодаря тому, что прием идет на линейку интегральных InGaAs фотодиодов (рис. 4). Такая схема имеет и свои минусы – спектральное разрешение прибора не может быть изменено и определяется шагом расположения частей, а полноценная спектральная калибровка затруднительна в силу того, что параметры элементов матрицы друг от друга отличаются. Это менее критично для фотоприемников видимого диапазона, но сильно проявляется в случае приемников с высоким уровнем шума, таких как InGaAs «расширенного» диапазона (с чувствительностью до 2 мкм и далее).

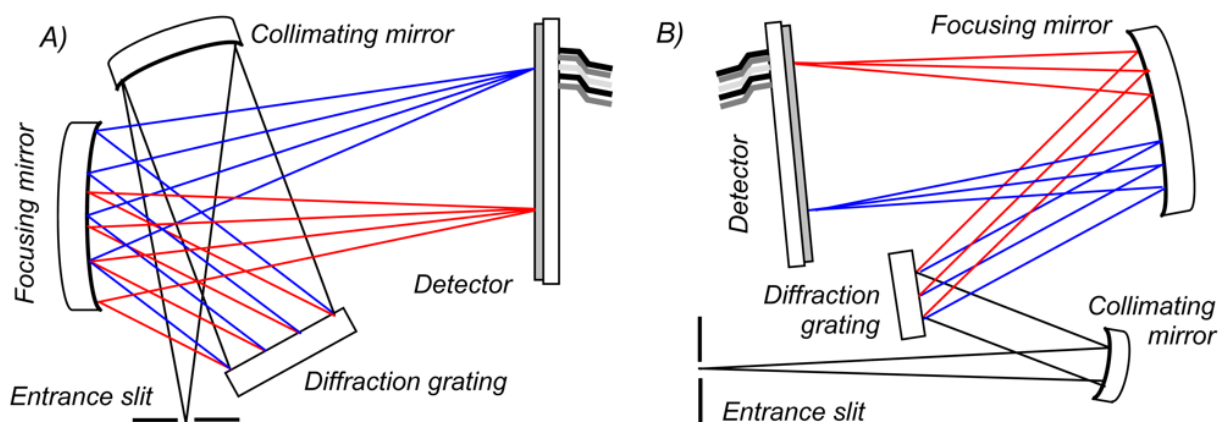


Рис. 4 Варианты схем миниатюрных спектрометров на основе линеек фотододов или ПЗС-матриц [5]

Табл.2. Основные характеристики спектрометра EPP2000-NIRX-SR InGaAs-512 [6]

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон	900–2300 нм
Спектральное разрешение	13 нм (щель 25 мкм)
Относительная апертура	1:4
Дифракционная решетка	300 мм ⁻¹
Количество пикселей	512
Динамический диапазон	10 ³
Отношение сигнал/шум	400 (при включенном охлаждении)
Емкость ячейки ПЗС	130×10 ⁸ электронов
Разрядность АЦП	12 бит (4096 отсчетов)
Вес	0,3 кг

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе мы проведем исследование спектральных характеристик люминесценции образцов нанокристаллов PbS, растворенных в тетрахлорметане, или редкоземельных стекол.

1. ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ

1. Ознакомиться с устройством комплекса для проведения спектральных ИК измерений.
2. Включить для прогрева (время не менее 15 минут) блок питания He-Ne лазера «ГН-15-1 ИП» и блок охлаждения фотодиода «Б5-43».
3. Включить интерфейсный блок «SpectraHub», блок питания предусилителя «Б5-45» и блок питания монохроматора «PUP30-25-N1-S».
4. На входной и выходной щелях монохроматора вращением микрометрических винтов установить ширину щелей равной 0,5 мм.
5. Запустить программу «SpectraSense» (разработчик Princeton Instruments). Ярлык запуска находится на рабочем столе и в меню «Пуск».
6. На вкладке «Hardware Config» («Конфигурация оборудования») перейти на закладку «Detection» («Детектор») и убедиться, что в пункте «Channel 1» («Канал 1») выбран параметр «PreAmp Voltage» («Предусилитель по напряжению (+/-)»), а в пункте «Location» («Расположение») выбраны параметры «Docked to Mono1» («Монохроматор 1») и «Side Exit» («Боковой выход»).

7. На вкладке «Survey Mode» («Режим наблюдения») нажатием кнопки «Optimize» («Оптимизировать») запустить измерение выходного сигнала и убедиться, что при отсутствии исследуемого образца «темновой» сигнал стабилен во времени. Остановить измерение нажатием кнопки «Stop» («Остановка»).
8. Перейти на вкладку «Acquisition» («Получение спектра»), в раскрывающемся списке «Scan Type» («Вид сканирования») выбрать режим «Single Point Scan Mono1» («Однократное сканирование монохроматором») установить следующие параметры измерения:
 - «From» («Начало сканирования», рис. 5, п. 1) – 800 нм.
 - «To» («Конец сканирования», рис. 5, п. 2) – 2100 нм.
 - «Step» («Шаг сканирования», рис. 5, п. 3) – 2 нм.
 - «Time» («Время интегрирования», рис. 5, п.4) – 200 мс, нажать кнопку «Set» («Установить»).
 - «Reads per point» («Отсчетов в точке», рис. 5, п. 5) – 1, нажать кнопку «Set» («Установить»).
 - «Cycles» («Число циклов», рис. 5, п. 6) – 1.
 - «Dark Subtract» («Вычитание темнового тока», рис. 5, п. 7) – отметить «галочкой».

2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установить образец в держатель.
2. На вкладке «Acquisition» («Получение спектра») в пункте «Save data as» («Сохранить данные как») нажать кнопку «Change» («Изменить», рис. 5, п. 9) и указать имя и путь сохраняемого файла.
3. Запустить измерение нажатием кнопки «Acquire» («Получить», рис. 5, п. 8). После появления всплывающего окна «Please Close Baffles/Shutters and Turn Off Light sources to Take Dark Reading» («Закройте затвор и выключите источник освещения, чтобы записать темновой ток») перекрыть входную щель монохроматора и нажать «ОК». После появления всплывающего окна «Dark Readings Taken, Please ReOpen Baffles/Shutters and Turn On Light sources» («Темновой ток получен, откройте затвор и включите источник») открыть входную щель и нажать «ОК».
4. Повторить п. 1–3 для второго образца – раствора КТ с размером, отличным от первого образца.
5. Установить в центр сбора излучения, на месте держателя кюветы, лампу накаливания с регулировкой тока, установить минимальный уровень интенсивности. Записать спектр лампы в диапазоне 1500–2200 нм. Выключить охлаждение фотодиода, подождать 5 минут, записать спектр лампы повторно.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Провести коррекцию полученных данных на спектральную чувствительность прибора с помощью программы «SpectraSense» или «Origin». При работе в программе «SpectraSense» перейти на вкладку «Post Processing» («Постобработка») и выполнить следующую последовательность действий:
 - загрузить файл, полученный в ходе измерений, используя кнопку «Load» («Загрузить») в правом верхнем углу окна;
 - нажатием курсора выбрать строку, соответствующую загруженному файлу;
 - в меню выбрать пункт «File Operation → Math → Division», и в появившемся окне выбора файлов выбрать файл калибровочных измерений «G5852 extend.arc» или «G8605 standart.arc», в зависимости от применяемого фотодиода. На запрос «Enter wave units» («Введите единицы измерения») из выпадающего списка выбрать вариант «nm» («нм»);
 - нажать расположенную в правом нижнем углу кнопку «Save As...» («Сохранить как...») и записать полученный спектр в файл. При работе с программой «Origin» необходимо поделить спектр на данные из калибровочного файла «G5852 extend.opj».
2. Определить максимум люминесценции и полуширину спектральной линии для каждого из образцов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5. Теоретическая часть (краткие сведения о люминесценции и её регистрации в ИК области).
6. Схема лабораторной установки и её описание.
7. Спектр с результатами измерений.
8. Спектр после нормировки на спектральную чувствительность.
9. Выводы по работе (результаты измерений, максимумы люминесценции и полуширина спектра).

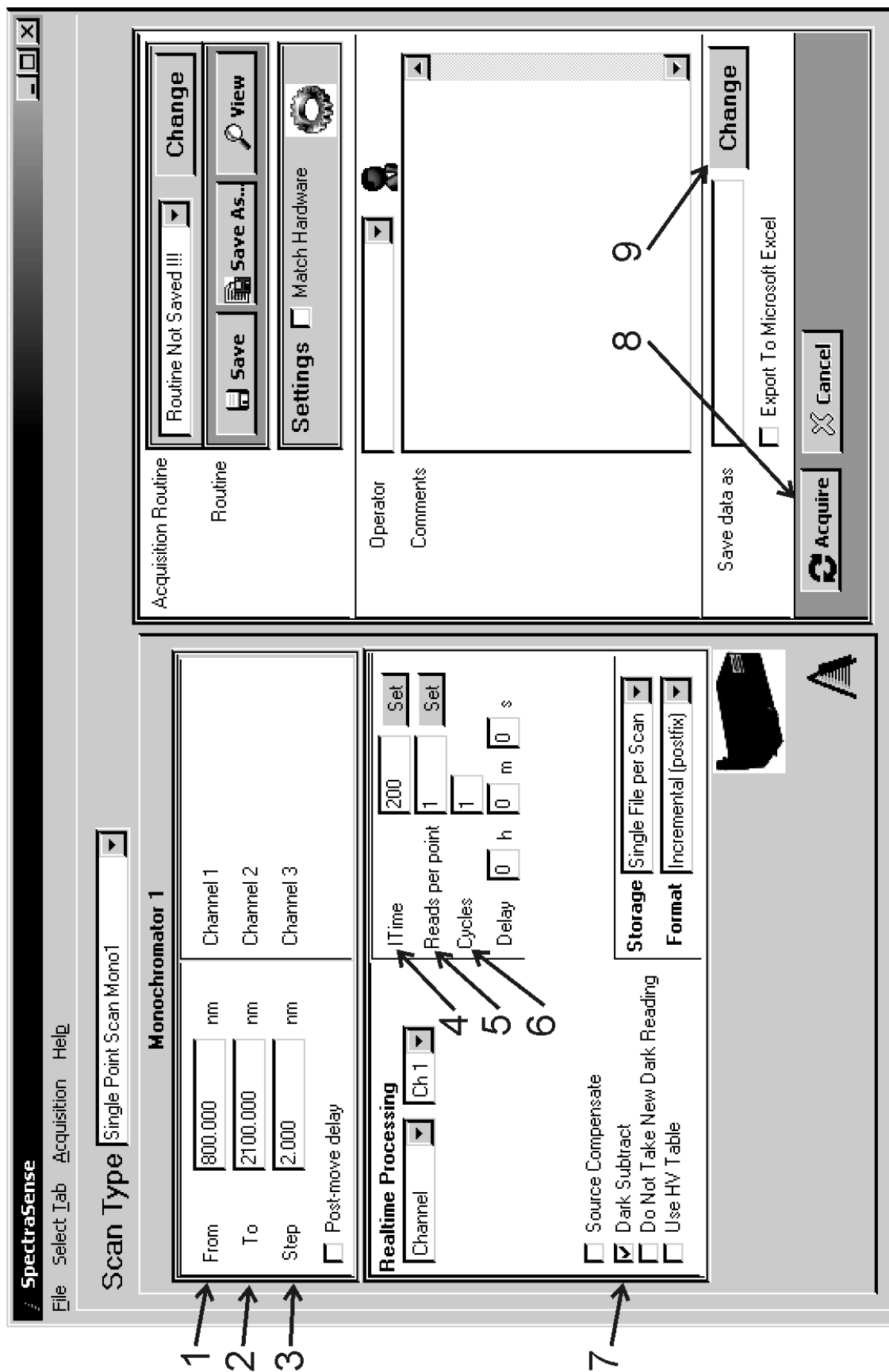


Рис 5. Расположение элементов управления в программе SpectraSense (пояснения в тексте).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Что такое ИК излучение? Что такое ближнее ИК излучение?
2. Какие существуют приемники ИК излучения?
3. Как работает фотодиод, что такое PIN-фотодиод?
4. Какие типы InGaAs приемников существуют?
5. Почему спектр люминесценции зависит от размеров КТ?

ЛИТЕРАТУРА

1. П.С. Парфенов, А.В. Баранов, А.В. Вениаминов, А.О. Орлова. Комплекс для люминесцентного анализа макро- и микрообразцов в ближнем ИК диапазоне // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78. №2. – С. 48–52.
2. Technology: What is InGaAs? [Электронный ресурс] / Goodrich Corporation – Электрон. дан. – 2010. – Режим доступа: <http://www.sensorsinc.com/GaAs.html>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Characteristics and use of infrared detectors [Электронный ресурс] / Hamamatsu Photonics К.К. – Электрон. дан. – 2010. – Режим доступа: http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_infrared_detectors.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
4. Уолт Кестер, Скотт Вёрсер, Чак Китчин. Датчики с высоким импедансом (пер. Горшков Б.Л.) // www.autex.spb.ru/cgi-bin/download.cgi?sensor99_5_rus (из книги Sensor technology handbook. Ред. Jon S. Wilson, Elsevier, 2005. США. С. 108-136).
5. Kantzas, E.P.; McGonigle, A.J.S.; Bryant, R.G. Comparison of Low Cost Miniature Spectrometers for Volcanic SO₂ Emission Measurements. Sensors 2009, 9, 3256-3268.
6. EPP2000-NIR X -SR-InGaAs Spectrometers for Extended Range 0.9-2.3 μm [Электронный ресурс] / Сайт StellarNet Inc. – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.stellarnet.us/public/download/catalog_pdf_updated_7-23.pdf, свободный.
7. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С НАКОПЛЕНИЕМ СИГНАЛА

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Обрести навыки регистрации времен затухания люминесценции в ближней ИК области спектра (0,9–1,7 мкм);
- ознакомиться с методом осциллографической регистрации времен затухания и способом повышения соотношения сигнал/шум путем накопления сигнала;
- ознакомиться с оптической схемой установки для регистрации кинетики люминесценции в ближнем ИК диапазоне спектра.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Люминесцентная спектроскопия является универсальным неразрушающим методом исследования электронной подсистемы КТ. Особое место занимает кинетический анализ параметров люминесценции полупроводниковых КТ, поскольку измерение времен жизни люминесценции дает богатую информацию о физических процессах в возбужденном состоянии, позволяет оценить скорости переноса энергии фотовозбуждения, частоту столкновений с молекулами тушителей, детально исследовать взаимодействие люминофора с его окружением.

Важнейшим параметром кинетики люминесценции является время затухания люминесценции, которое представляет собой средний промежуток времени, в течение которого атом или молекула находятся в возбужденном состоянии. Затухание свечения единственного люминофора можно описать экспоненциальным законом вида:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

где I_0 – интенсивность люминесценции в начальный момент времени $t=0$, τ – время затухания. Зачастую кривую затухания люминесценции нельзя представить в виде одноэкспоненциальной зависимости, однако можно представить в виде суммы экспонент, каждой со своим временем затухания τ_i и предэкспоненциальным множителем α_i . Многоэкспоненциальный закон затухания люминесценции может свидетельствовать о множестве физических явлений: различном окружении для отдельных люминофоров одного типа; присутствии смеси различных люминофоров; наличии процессов, происходящих в возбужденном состоянии. Стоит отметить, что не всегда подобранные

значения τ_i и α_i точно характеризуют определенные спектральные свойства исследуемой системы и вообще имеют физический смысл.

Существует несколько приемников, позволяющих регистрировать кинетику люминесценции в ближнем ИК. Долгое время единственными приемниками были германиевые фотодиоды, чувствительные в области до 1,4 мкм. В настоящее время подходящими приемниками являются также InGaAs фотодиоды, чувствительные в области до 2,5 мкм, InGaAs лавинные фотодиоды (до 1,7 мкм), и микроканальные ФЭУ фирмы Hamamatsu (чувствительны до 1,7 мкм, требуют охлаждения до -70°).

Традиционно для регистрации кинетики люминесценции КТ используется метод время-коррелированного счета одиночных фотонов. Однако характерные времена затухания люминесценции КТ PbS могут превышать несколько микросекунд, что значительно превышает времена для других КТ, например, таких как CdS. В этом случае техника коррелированного счета становится невыгодной из-за больших периодов ожидания. Поэтому часто используют регистрацию с применением многоканальных счетчиков одноэлектронных импульсов ФЭУ или лавинных фотодиодов внутри временных интервалов, сдвинутых относительно импульса возбуждения, или методов прямого наблюдения затухания сигнала с использованием быстродействующего фотодиода, скоростного усилителя и высокочастотного осциллографа. При этом обычно применяется метод накопления сигнала последующим усреднением, т.к. при многократной выборке сигнала вклад случайных шумов и помех уменьшается как \sqrt{N} , где N – число выборок.

Однако такая схема подвержена дрейфу нуля как в силу общих причин (из-за нагревания, например), так и в связи с наводками или помехами от регистрируемого импульса или импульса синхронизации, которые накладываются на полезный сигнал. Не говоря уже о том, что сам сигнал может претерпевать изменения вследствие внутренних изменений, а также изменений окружающей среды. В любом случае, соотношение с/ш не будет уменьшаться до бесконечности по мере роста накопления.

Следует отметить, что при регистрации больших времен затухания амплитуда сигнала люминесценции существенно меньше значения, регистрируемого при коротких временах, поскольку при том же энергетическом выходе люминесценции амплитуда сигнала уменьшается пропорционально увеличению времени затухания. Так для квантовых точек CdS и PbS в растворах разница может составлять 2 порядка, а для ансамблей КТ PbS и InAs, нанесенных на поверхность подложки, из-за дополнительного отличия квантовой эффективности, разница может достигать 5 порядков. Все это приводит к необходимости минимизировать возможные потери света, а также продумать математическую обработку получаемых результатов.

Также важно, чтобы в экспериментах с квантовыми точками интенсивность возбуждающего излучения была достаточно низкой, чтобы исключить возможность одновременного оптического возбуждения нескольких носителей заряда или экситонов.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка предназначена для регистрации кинетики люминесценции в ближней ИК области спектра (0,9–1,70 мкм) во временном диапазоне 10^{-8} – 10^{-5} с. Функциональная схема установки приведена на рис. 1.

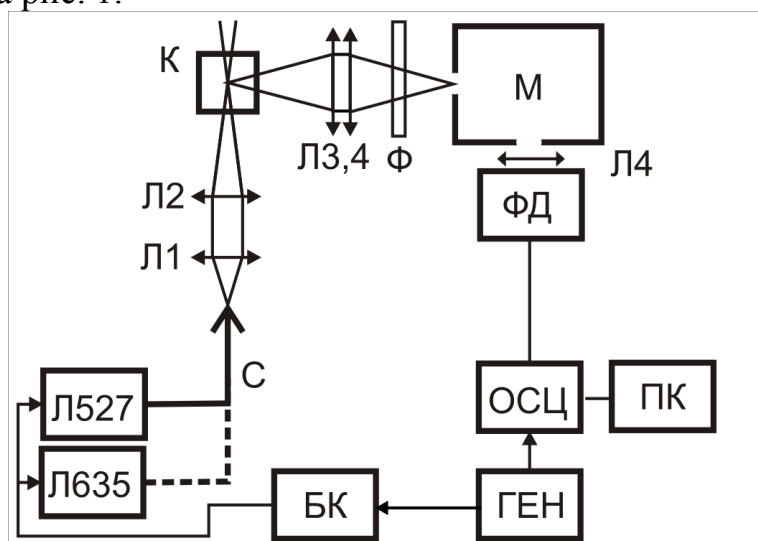


Рис. 1 Функциональная схема лабораторной установки. Л527, Л635 — импульсные лазеры (с длиной волны излучения 527 и 635 нм соответственно); Л1, Л2 — линзы, собирающие и фокусирующие лазерное излучение; К — кюветное отделение / держатель образца; С — световод; Л3, Л4 — линзы, собирающие и фокусирующие люминесцентное излучение, соответственно (у обоих $f=25$ мм); З — зеркало; Ф1 — светофильтр для подавления возбуждающего излучения; Ф2 — светофильтр для выделения полос люминесценции; ФД — фотодиод со встроенным усилителем; ОСЦ — осциллограф, ГЕН — генератор частоты; БК — блок контроля и управления лазерами; ПК — компьютер

В качестве источников возбуждающего излучения используются два импульсных лазера – модель LDH-P-C-635B с волоконным выводом излучения с длиной волны 635 нм (фирмы PicoQuant), с длительностью импульсов ~ 100 пс и максимальной энергией в импульсе 0,4 и 0,3 нДж (интенсивность излучения в импульсе на образце 50 кВт/см²), и лазер DTL-339QT, длинами волн 351/527/1053 нм, максимальной энергией в импульсе 55/52/120 мкДж соответственно и длительностью импульсов на частоте < 5 кГц не более 10 нс (фирмы «Лазер-Экспорт»). Частота

следования импульсов задается с помощью внешнего генератора импульсов (Metex MXG-9810A) и, как правило, составляет 5 кГц.

В качестве приемника используется скоростной фотоприемник Femto HSA-S-200M-IN со встроенным InGaAs-фотодиодом, с диаметром чувствительной площадки 0,3 мм и чувствительным в области 0,9–1,75 мкм. Дополнительное усиление обеспечивается высокочастотным усилителем Stanford Research SR455A с полосой пропускания 350 МГц. Регистрация усиленного сигнала PicoScope 3206A (полоса пропускания 200 МГц, частота дискретизации 500 млн. выборок в секунду). Осциллограф обеспечивает пакетную выборку кривых затухания, которая и задает максимальную частоту следования возбуждающих импульсов.

Измерения проводятся по схеме сбора люминесценции под углом 90° к возбуждению. Эта схема позволяет исследовать как растворы КТ в кювете, так и КТ, нанесенные на различные поверхности и внедренные в тонкие пленки и матрицы. Лазерное излучение, выходящее из волокна (диаметр сердцевины 50 мкм), линзой с фокусным расстоянием $f=3$ мм собирается в параллельный пучок диаметром 5 мм, затем линзой с $f=130$ мм фокусируется в область диаметром 0,1 мм. Изображение люминесцирующей области передается в отношении 1:1 на фотоприемную площадку двумя линзами — собирающей и фокусирующей, для обеих линз $f=17$ мм. При необходимости работы с мощным импульсным лазером возбуждение подается напрямую на образец, минуя волоконный подвод.

При работе с растворами в кюветное отделение устанавливается кварцевая кювета образцом. При работе с образцами в виде пленок или матриц образец приклеивается к предметному стеклу. Далее стекло фиксируется в держателе и устанавливается на месте кюветного отделения, под углом 75° к падающему лучу и углом 15° к оптической оси собирающей системы. Кюветное отделение и держатель стекол устанавливаются на двухкоординатный столик, который с помощью микрометрических винтов можно перемещать в горизонтальной плоскости.

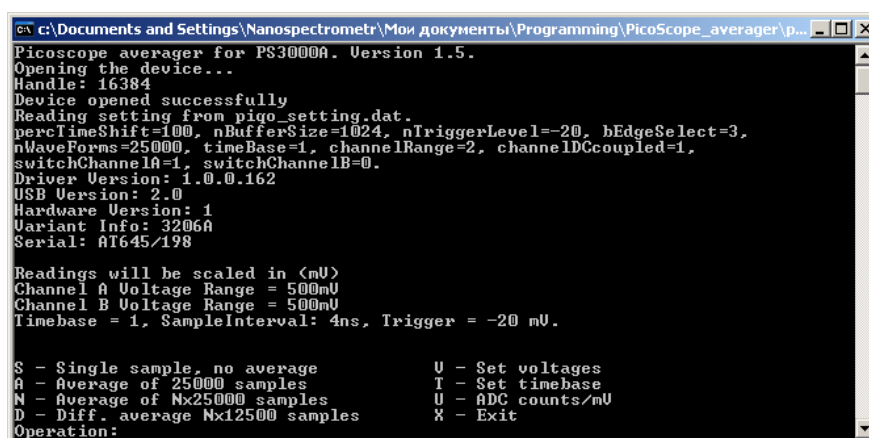
Блокирование возбуждающего излучения осуществляется с помощью стеклянного светофильтра КС19. Для выделения узких спектральных полос люминесценции применяются перестраиваемый фильтр, собранный на базе короткофокусного монохроматора.

При исследовании кинетики люминесценции требуется проводить усреднение большого числа измерений, поскольку измеряемый сигнал очень мал и зашумлен. Для накопления и дополнительного усреднения данных с осциллографа используется программа Picoscope averager, позволяющая проводить единичную выборку, а также блоками по 25 тысяч выборок (рис. 2). Скорость накопления при этом, включая время

на обработку и передачу данных, составляет 100 тысяч выборок в минуту (также возможна работа с программой «Tektronix TDS2022B – averager», написанной на языке LabView, описанной в работе [1]).

Благодаря минималистскому интерфейсу и тому, что она написана на чистом C, программа обеспечивает высокое быстродействие и низкую требовательность к ресурсам системы (но они в свою очередь ограничивают скорость усреднения данных). Также это существенно сократило время создания программы. В тоже время для настройки «в живом режиме» удобнее пользоваться штатной программой «PicoScope 6» [описание основных функций приведено в [2]].

Временное разрешение лабораторной установки составляет 3 нс и определяется быстродействием усилителя со встроенным фотодиодом.



```

C:\Documents and Settings\Nanospectrometr\Мои документы\Programming\PicoScope_averager\p...
Picoscope averager for PS3000A. Version 1.5.
Opening the device...
Handle: 16384
Device opened successfully
Reading setting from pigo_setting.dat.
perTimeShift=100, nBufferSize=1024, nTriggerLevel=-20, bEdgeSelect=3,
nWaveForms=25000, timeBase=1, channelRange=2, channelDCcoupled=1,
switchChannelA=1, switchChannelB=0.
Driver Version: 1.0.0.162
USB Version: 2.0
Hardware Version: 1
Variant Info: 3206A
Serial: AT645/198

Readings will be scaled in (mV)
Channel A Voltage Range = 500mV
Channel B Voltage Range = 500mV
Timebase = 1, SampleInterval: 4ns, Trigger = -20 mV.

S - Single sample, no average          U - Set voltages
A - Average of 25000 samples           T - Set timebase
N - Average of Nx25000 samples        U - ADC counts/mV
D - Diff. average Nx12500 samples     X - Exit
Operation:
```

Рис. 2. Программа накопления данных «Picoscope averager». Пункты меню: S – единичная выборка, A – получение блока в 25000 выборок, N – получение N блоков выборок, D – получение блока в 12500 выборок в дифференциальном режиме, V – установка усиления, T – установка развертки, U – переключение режима единиц измерения отсчеты/мВ, X – выход из программы

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе мы проведем исследование метода накопления сигнала на примере измерения времени затухания люминесценции нанокристаллов PbS.

1. Подготовка к измерениям

1. Ознакомиться с устройством комплекса для измерения затухания времен люминесценции в ИК диапазоне.
2. Ознакомиться с режимами работы цифрового осциллографа PicoScope [3].

3. Включить для прогрева осциллограф, фотоприемник и усилитель (время прогрева не менее 10 минут).
4. Включить лазер в следующем порядке — включить блок питания лазера (переключатель на задней панели), повернуть ключ на передней панели в положение «ON» и установить тумблер «Trigger» в положение «EXT» (внешняя синхронизация).
5. Включить генератор частот, установить частоту 5 кГц.
6. Установить в штатной программе осциллографа «PicoScope 6» временную развертку 4 нс/шаг, усиление по вертикали 5 Вт, уровень триггера – по указанию преподавателя, т.к. он зависит от источника синхронизации.

2. Проведение измерений

Для исследования образцов КТ, внедренных в матрицу, либо представленных в виде пленок, нужно выполнить следующие действия:

1. Зафиксировать предметное стекло с образцом в держателе, под углом 75° к падающему лучу и углом 15° к оптической оси собирающей системы.
2. Заменить запирающий светофильтр KC19 на нейтральное стекло HC13 (пропускание $\tau=0,04$ на длине волны 635 нм).
3. С помощью микрометрических винтов установить стекло так, чтобы на осциллографе получить максимум рассеянного лазерного излучения.
4. Заменить HC13 обратно на KC19 и выйти из программы «PicoScope 6».
5. Запустить программу «Picoscope averager» (расположена в одноименной папке на рабочем столе).
6. Установить в программе шаг временной развертки 4 нс, усиление по вертикали 500 мВт, и выбранный ранее уровень триггера.
7. Поочередно выбрать режимы одиночной выборки, выборки блоком и выборки по нескольким десяткам блоков. После нажатия «Enter» измерения запустятся автоматически.
8. После окончания измерений файлы с результатами первой выборки, усредненной выборки первого блока и усредненной выборки по блокам сохраняются в рабочий каталог программы.
9. Провести дополнительное измерение для получения «фонового» сигнала с перекрытой входной щелью монохроматора.

3. Анализ результатов

Для анализа полученных данных следует воспользоваться программой обработки экспериментальных данных Origin. проанализировать снижение уровня зашумленности сигнала. Как ограничивает регистрацию сигнала уровень «фонового» сигнала,

полученного при отсутствии излучения? Какой уровень пороговой чувствительности соответствует ему, если сигнал не должен быть меньше шума?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Теоретическая часть (краткие сведения о временах затухания люминесценции и их регистрации в ИК области).
2. Схема лабораторной установки и её описание.
3. Кривая затухания люминесценции и результат её аппроксимации.
4. Выводы по работе (результаты измерений, вывод о размерной зависимости времени затухания люминесценции).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. В чем состоит практический интерес к ближней ИК области?
2. Какой функцией описывается затухание люминесценции?
3. Какие существуют приемники, позволяющие зарегистрировать кинетику люминесценции в ИК диапазоне?
4. Какие особенности затрудняют регистрацию люминесценции КТ PbS в сравнении с КТ видимого диапазона?
5. Как меняется постоянная времени люминесценции при увеличении размера квантовых точек?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.
2. TDS1000B and TDS2000B Series Digital Storage Oscilloscopes [Электронный ресурс] / Сайт California Institute of Technology – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.sophphx.caltech.edu/Lab_Equipment/Tektronix_TDS1000_2000_User_Manual.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
3. Technical Data Sheet. PicoScope 3000 Series [Электронный ресурс] / Сайт Farnell – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.farnell.com/datasheets/1694478.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Lakowicz, J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. 4th Printing. / J. R. Lakowicz. – Springer, 2006. – 954 pp.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ НАНОСТРУКТУР МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Ознакомиться со стандартом определения размеров наночастиц методом АСМ;
- ознакомиться с методом Фурье-фильтрации изображений;
- провести измерение образца с микро- или наночастицами;
- провести анализ экспериментальных данных;
- ознакомиться с основными проблемами интерпретации АСМ изображений.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет получать изображение рельефа поверхности с нанометровым разрешением. В то же время точность подобных измерений во многих случаях неясна. Это связано как с проблемой интерпретации АСМ изображений, так и тем, что область нанотехнологий в настоящее время слабо стандартизирована. Так, едва ли не единственным стандартом, существующим в настоящее время для АСМ, является стандарт ASTM E2859, разработанный Национальным институтом стандартов и технологий США [1]. Он оговаривает процедуру подготовки образцов к измерениям, порядок проведения измерений и порядок обработки полученных данных. Поскольку задачей данной лабораторной работы является не стандартизация микроскопа, а освоение методики измерения и обработки результата, мы опустим из рассмотрения часть, посвященную пробоподготовке. Кроме того она посвящена подготовке специального образца – шариков из золота, размещенных на подложке, в то время как мы будем использовать в качестве объекта изучения полупроводниковые наноструктуры. Отметим только, что для калибровки используются специальные образцы с заранее известными размерами – например периодические решетки или калиброванные шарики. Сама процедура калибровки описывается в мануале к микроскопу Solver PRO.

В отличие от сканирующего электронного микроскопа, обеспечивающего двумерную проекцию образца, АСМ дает трехмерный рельеф поверхности. При этом поперечные размеры подвержены закруглению и искажению из-за конволюции формы поверхности с

формой зонда (с этим связана основная проблема интерпретации АСМ изображений – необходимость деконволюции формы зонда и образца), а измерения по высоте достигают разрешения в сотые доли нанометра и позволяют использовать АСМ для оценки высоты наноструктур с высокой точностью. Так, если анализируются сферические частицы, то высота сфер будет соответствовать их диаметру.

Выбор зонда и площади сканирования

Геометрические размеры и механические свойства зонда оказывают основное влияние на качестве получаемого изображения. Можно выделить несколько ключевых моментов:

- Радиус острия и его геометрия. Для минимизации конволюции радиус зонда должен быть по возможности минимальным, желательно менее 10 нм.
- Для работы в полуконтактном режиме рекомендуется жесткость кантилевера около $40 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}$. Жесткость такой величины позволяет преодолевать действие сил адгезии, возникающих из-за образования капиллярного мениска, сил Ван-дер-Ваальса или электростатики. Для мягких образцов рекомендуют меньшую жесткость.
- Наклон кантилевера, обычно составляющий $10\text{--}20^\circ$, не влияет на вертикальные измерения, но приводит к асимметрии исследуемых объектов, а также приводит к раннему контакту боковой грани зонда с образцом. Существуют специальные симметричные зонды.

При выборе размера зоны сканирования следует исходить из следующих положений. Во-первых, невозможно различить детали, расстояние между которыми менее радиуса закругления острия, поэтому шаг сканирования желательно брать не менее 10 нм. Во-вторых, шаг сканирования не должен превышать размеров наименее мелких интересующих деталей образца. В-третьих, в большинстве случаев достаточно изображения размером 256×256 точек – 512×512 точек. Исходя из этого вычисляется размер зоны сканирования. Размеры зоны для предварительного сканирования обычно не превышают 10 мкм, что при 256×256 точках дает шаг сканирования 39 нм.

Обработка результатов

Анализ АСМ результатов, полученных с помощью Solver-PRO, проводится с помощью коммерческой программы Nova (НТ-МДТ), но также можно использовать свободно распространяемую программу WSxM (название происходит от Windows Scanning X Microscope, где = произвольный сканирующий микроскоп). Рассмотрим наиболее важные этапы обработки полученных АСМ данных.

1. Возвращение изображению плоского вида. Из-за неперпендикулярной установки образца, нелинейности сканера, температурного дрейфа изображение обычно характеризуется выраженным перекосом, который устраняется вычитанием из него поверхности определенного порядка, полученной аппроксимацией исходных данных. Вычитание плоскости обычно необходимо всегда (кроме того, оно не вносит искажения в изображение), остальные операции проводятся после этого. При наличии в изображении крупных частиц, не являющихся частью предполагаемого плоского рельефа, их следует исключить из данных, по которым проводится вычитание поверхности.
2. Усреднение по строкам. Требуется, когда наблюдается разброс данных от строки к строке, вызванный внешними воздействиями на зонд во время сканирования. В этом случае интерполяция проводится для каждой строки в отдельности.
3. Выбор подходящего профиля. 2D и 3D изображения, несмотря на самое удобное для восприятия визуальное представление данных, не подходят для количественных измерений. Их удобнее всего делать по профилю. Самый достоверный профиль получается в направлении сканирования, но в общем случае его направление берется произвольно. Помимо количественных оценок, профиль позволяет судить, например, является ли частица изолированной и находится ли она на плоском участке образца.
4. Измерение высоты. В идеале, при правильном вычитании поверхности, достаточно на выбранных профилях, проведенных через центр измеряемых объектов (либо через точку, соответствующую максимальной высоте) вычесть из высоты вершины высоту базовой линии (значения высоты по обе стороны от объекта). Для достоверного статистического анализа эта процедура д.б. проведена не менее чем для 100 частиц. В случае неровной поверхности (или недостаточно корректного вычитания поверхности) нужно подобрать направление профиля, при котором базовая линия остается постоянной, или, при небольших наклонах, брать за неё среднеарифметическое значение высот справа и слева. Следует избегать проведения измерений на сильно отличающихся частицах, а также на агрегировавших, образовавших большие скопления.
5. В ряде случаев возможен автоматический анализ изображения с определением числа и размера частиц (например, функция Grain Analysis в программе Nova). Для этого выравнивание образца является обязательным условием.

Вычисление размера частиц.

Расчет среднего значения высоты и оценку разброса этого параметра следует вести по стандартному алгоритму оценки измеряемой величины. Среднее значение высоты H , полученной в n измерений

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$$

Для описания погрешности значения переменной используется стандартное среднеквадратичное отклонение σ . Однако в случае проведения многократных измерений используется величина стандартного отклонения s , которая связана со СКО коэффициентом $1/\sqrt{n}$, поэтому

$$s_H^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2$$

Также важно не только учесть и другие источники неопределенности, возникающие в ходе эксперимента. В частности, необходимо учесть неопределенность, связанную с шагом высоты тестовой решетки, использованной для калибровки АСМ. Обобщенная неопределенность, учитывающая стандартную неопределенность высоты ступеньки тестовой решетки σ_G , будет

$$U_0 = \sqrt{s_H^2 + \sigma_G^2}$$

Сюда же добавляется приборная погрешность, которая, если не указана в документации, определяется по паспортным данным прибора по формуле $\sigma_{\text{отсч}} = d/3$, где d – шаг округления.

Если одна из величин σ превышает другую в три и более раз, то для дальнейших расчетов берут большую из них.

При использовании величины H для дальнейших расчетов косвенно измеряемых величин обработка результатов прямых измерений на этом заканчивается, если же это окончательный результат эксперимента, то ищут погрешность, соответствующую доверительному интервалу вероятности p . В научных статьях, как правило, приводят доверительный интервал $\pm\sigma$, соответствующий $p=0,68$ [2].

Таким образом, итоговый результат будет записан как $H \pm U_p$ с доверительной вероятностью $p=0,68$.

Если преобладают случайные погрешности и число измерений невелико (менее 5), то погрешность определяют с помощью коэффициентов Стьюдента. Если приборная погрешность превышает остальные, то необходимо указать характер погрешности. Например, $H=10 \pm 1$ нм (погрешность – предельная приборная) [2].

Построение гистограмм

Анализ высоты объектов часто удобно делать с помощью гистограммы плотности распределения высот (вызывается одноименной функцией в разделе «Статистика» программы Nova NT-MDT). Так, гистограмма стандартной калибровочной ступенчатой решетки представляет собой два пика, расстояние между максимумами которого соответствует средней высоте выступов решетки. Основное условия, несоблюдение которого делает применение функции бесполезным – плоскость изображения должна быть корректно выставлена с помощью вычитания поверхности нужного порядка. В программе параметр «Z-Step» задает шаг гистограммы в десятых долях нм. На гистограмме для каждого значения Z (ось абсцисс) по оси ординат откладывается число точек, значения которых лежат в интервале от Z до Z + 0,1 нм×Z-Step.

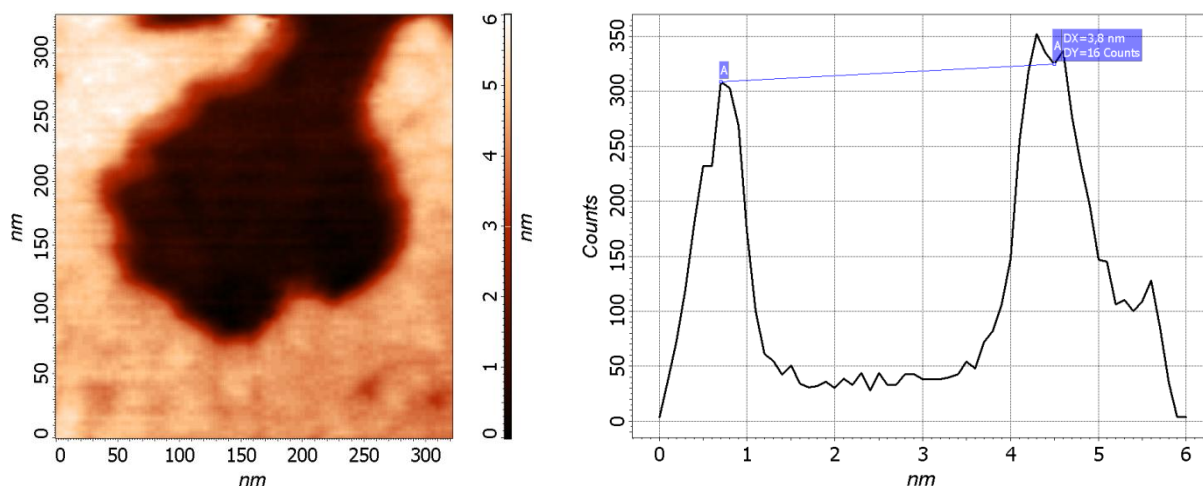


Рис. 1 Измерение толщины слоя по гистограмме распределения на примере монослоя нанокристаллов. а) фрагмент АСМ изображения, б) гистограмма распределения

Исследуемые образцы

Исследуемые объекты должны быть размещены на плоской поверхности. Для исследования наноразмерных, менее 20 нм, частиц лучше всего подходят слюда и высокоориентированный пиролитический графит. Для исследования образцов большего размера возможно использование сапфирового стекла, а также обычного предметного.

Для исследования в указанной работе используются препараты, содержащие относительно крупные частицы – полимерные шарики. поверхность микроканальных пластин, дорожки на компакт-дисках, а также.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка к измерениям

1. Ознакомиться с устройством комплекса, процедурой проведения измерений на ACM Solver PRO-M и работой с управляющей программой Nova [3].
2. Включить ACM Solver PRO-M.
3. Получить препарат у преподавателя (либо файл с результатами измерений, если планируется проводить только обработку данных анализ изображения).

2. Проведение измерений

1. При необходимости провести калибровку АСМ по калибровочной решетке, сертифицированной по высоте. В идеале вертикальный шаг калибровочной решетки должен быть равен ожидаемой высоте образца. Необходимо провести измерения в нескольких разных точках образца и сравнить усредненный результат с высотой, указанной в сертификате. Если значения существенно отличаются, то необходима калибровка прибора по вертикальной оси.
2. Исследуйте в оптический микроскоп каждый образец с тем, чтобы найти область с достаточно равномерным распределением частиц. В большинстве случаев высыхающая капля растворителя, содержащий примеси, капиллярными силами стягивается к собственным границам, в то время как поверхность, соответствующая внутренней части капли, свободна от примесей и отличается подходящим распределением частиц.
3. Выберите режим работы АСМ. Если частицы зафиксированы на поверхности слабыми физическими силами, то подходящим режимом работы является полуконтактный.
4. Выберите подходящий кантилевер (критерии приведены выше).
5. Провести пробное сканирование участка 10×10 мкм.
6. Провести сканирование относительно большого участка, чтобы выбрать участок с относительно равномерным распределением частиц.
7. Провести сканирование выбранного участка (критерии приведены выше). Провести такое сканирование в трех местах образца.
8. Сохранить полученные данные.

3. Анализ результатов

1. Провести вычитание плоскости необходимого порядка. При необходимости применить вычитание по строкам.
2. Выбрать профили, подходящие для измерения высоты и провести измерение не менее чем в 30 точках. Построить гистограмму распределения высот.
3. Вычислить значение высоты и погрешность для доверительного интервала 0,68, с учетом погрешности высоты тестовой решетки (тип решетки – по указанию преподавателя).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Калибровка АСМ.
2. Определение высоты методом АСМ.
3. Обработка изображений АСМ
4. Результаты измерений
5. Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Какие способы калибровки АСМ вы знаете?
2. В каком направлении чувствительность АСМ максимальна?
3. Почему в направлении максимальной чувствительности удобнее всего проводить измерение геометрии образцов?

ЛИТЕРАТУРА

1. ASTM Standard E2859, 2011, "Standard Guide for Size Measurement of Nanoparticles Using Atomic Force Microscopy," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/E2859-11.
2. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. Учебное пособие. – М.: Изд. МИФИ, 2005, – 40 с.
3. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.
4. Jaroslaw Grobelny, Frank W. DelRio, Namboodiri Pradeep, Doo-In Kim, Vincent A. Hackley, and Robert F. Cook. Size Measurement of Nanoparticles Using Atomic Force Microscopy. NIST – NCL Joint Assay Protocol, PCC-6. Version 1.1. Materials Science and Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
5. Nova. Программное обеспечение для СЗМ. Справочное руководство. М.: НТ-МДТ, 2010.
6. Лекция по обработке АСМ изображений с помощью ПО Nova. Часть 5. НТ-МДТ. [Электронный ресурс] / НТ-МДТ. – 2013. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=6wqSunUDKEk>, свободный. – Загл. с экрана.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

ОБРАБОТКА АТОМНО-СИЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

- Знакомство с методом исследования нанорельефа поверхности;
- ознакомиться с методами уменьшения вклада искажений в экспериментальные данные;
- обрести навыки обработки изображений, получаемых с помощью атомно-силовых микроскопов.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Обработка двумерных изображений рассматривается на примере обработки данных, полученных методом АСМ. Приведенные методы могут быть также полезны при обработке данных другого типа.

Стандартное программное обеспечение зондовых микроскопов включает в себя достаточно широкий набор средств по визуализации и обработке СЗМ данных, мы рассмотрим самые базовые из них.

ВЫЧИТАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Изображения поверхности, получаемые с помощью зондовых микроскопов, как правило, имеют общий наклон. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, наклон может появляться вследствие неточной установки образца относительно зонда; во-вторых, он может быть связан с температурным дрейфом, который приводит к смещению зонда относительно образца; в-третьих, он может быть обусловлен нелинейностью перемещений пьезосканера. На отображение наклона тратится большая часть градиента цвета, кодирующего высоту, так что скрадываются мелкие детали изображения. Для устранения данного недостатка производят операцию вычитания постоянного наклона. Для этого на первом этапе методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая плоскость $P^{(1)}(x, y)$, имеющая минимальные отклонения от рельефа поверхности $Z = f(x, y)$. Затем производится вычитание данной плоскости из АСМ изображения. В результате получается массив с меньшим диапазоном значений, и мелкие детали изображения будут отображаться большим количеством цветов, становясь более заметными [1].

Заметим, что это едва ли не единственная операция, которая не уменьшает количество информации в исходном изображении, сохраняет геометрические соотношения в плоскости и, теоретически, является обратимой (вычитание поверхностей более высокого порядка также может быть обратимо, но является более сложной задачей).

Неидеальность свойств пьезосканера приводит к тому, что АСМ изображение содержит ряд специфических искажений. Частично особенности сканера, такие как гистерезис и нелинейность пьезокерамики компенсируются аппаратными средствами и выбором оптимальных режимов сканирования. Однако, несмотря на это, АСМ изображения содержат искажения, которые трудно устранить на аппаратном уровне. В частности, поскольку движение сканера в плоскости образца влияет на положение зонда над поверхностью (по оси Z), СЗМ изображения представляют собой суперпозицию реального рельефа и некоторой поверхности второго (а часто и более высокого) порядка

Для устранения искажений такого рода методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая поверхность второго порядка $P^{(2)}(x, y)$, имеющая минимальные отклонения от исходной функции $Z = f(x, y)$, и затем данная поверхность вычитается из исходного АСМ изображения.

Вычитание целесообразно выполнять различными способами в зависимости от природы наклона [1].

НЕКОТОРЫЕ ФИЛЬТРЫ

Сглаживающие фильтры

Сглаживающие фильтры применяются для уменьшения высокочастотных шумов. Самым простым вариантом сглаживающих фильтров является однородный фильтр (или «Uniform filter»), обеспечивающий простое усреднение по некоторой локальной области исходного изображения, например 3×3 или 5×5 пикселей.

Значения в ядре гауссова фильтра выбираются согласно форме гауссовой функции $K(i, j) = \exp(-(i^2 + j^2)/2\sigma)$. Кроме размера, он определяется также значением σ . Примеры ядра обоих фильтров приведены ниже

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 1 Примеры ядер однородного и гауссова фильтров, слева и справа соответственно

Медианные фильтры

Медианные фильтры являются сглаживающими фильтрами, которые убирают шумы импульсного характера, такие как шумы в виде «отдельных точек», но сохраняют при этом резкость границ. Принцип работы фильтра следующий: окно фильтра, состоящее из $N \times N$ точек, перемещается по изображению от точки к точке. Для каждой точки исходного изображения рассматривается локальная область, равная размеру фильтра. Значения функции в точках окна фильтра выстраиваются по возрастанию, и значение, стоящее в центре этого ряда, присваивается выходному значению функции в данной точке. Таким образом, случайные «выбросы» и «провалы» при такой сортировке оказываются на краях сортируемого массива и не входят в результирующее изображение [2].

ФУРЬЕ ФИЛЬТРАЦИЯ

Фурье-фильтрация изображений основана на преобразовании Фурье и является одним из основных способом устранения помех из экспериментальных данных – спектров, кривых затухания, данных АСМ, а также обычных изображений.

Преимуществом метода является возможность быстрого анализа спектра с одновременной подстройкой параметров фильтрации в режиме реального времени. Как и другие методы спектральной фильтрации, метод наиболее эффективен когда помеха спектрально отстоит от полезного сигнала.

Фильтрация проводится в несколько этапов: прямое преобразование исходных данных, анализ спектра и выбор параметров фильтра, применение подобранного фильтра, обратное преобразование с получением результирующей функции, соответствующей обработанному изображению.

Рассмотрим несколько вариантов применения.

1. Измерение шага регулярной структуры. Фурье-образ регулярной структуры представляет собой набор точек, расстояние которых от центра находится в прямой связи с шагом структуры (примеры вычислений см. в [2]).

2. Фильтрация «прыгающих» строк, возникающих из-за помех во время сканирования или при загрязненности образца. Поскольку при такой помехе каждая строка отличается от предыдущей, то её на Фурье-образе соответствует вертикальная полоса (если сканирование по строке идет в горизонтальном направлении). Исключение этой полосы из образа ведет и к исключению основной части помехи из исходного изображения.

3. Низкочастотная фильтрация. Частотная фильтрация заключается в исключении из Фурье-образа участков, лежащих на определенном расстоянии от центра. При этом низкочастотной фильтрации соответствует исключение части изображения снаружи окружности определенного радиуса, а высокочастотной – внутри такой окружности (нулевые частоты лежат в самом центре Фурье-изображения). Низкочастотная фильтрация применяется для уменьшения влияния высокочастотных шумов, полезный сигнал в этом случае – во внутренней части круга на Фурье-образе.

4. Высокочастотная фильтрация. Применяется для устранения плавных изгибов поверхности, соответствующих низкочастотной части спектра.

Для примера в работе [3] приводится иллюстрация применения Фурье-фильтрации к изображению поверхности кремния с 12 сформированными структурами высотой 1–2 нм. Размер изображения $3,5 \times 3,5$ мкм. Можно предположить, что искажения поверхности вызваны нестабильным положением образца по высоте либо локальными помехами, вызывающими спонтанное смещение зонда дальше или ближе к поверхности.

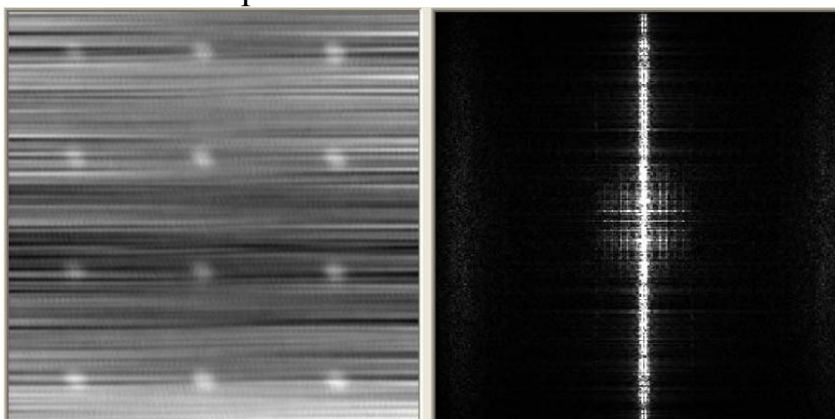


Рис. 2 Поверхность кремния и её Фурье-образ [3]

Изображение, полученное с помощью НЧ фильтра, показывает, что вертикальная линия соответствует сигналу помехи.

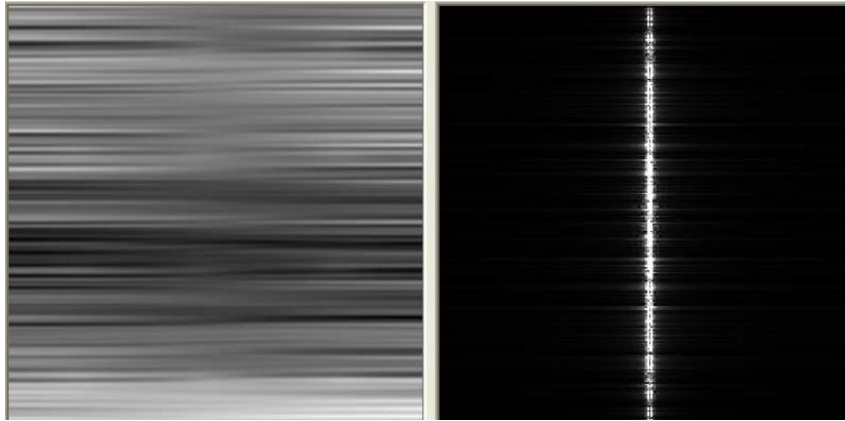


Рис. 3 НЧ шум на изображении и его Фурье-образ [3]

Теперь эту частоту можно вырезать из Фурье-образа.

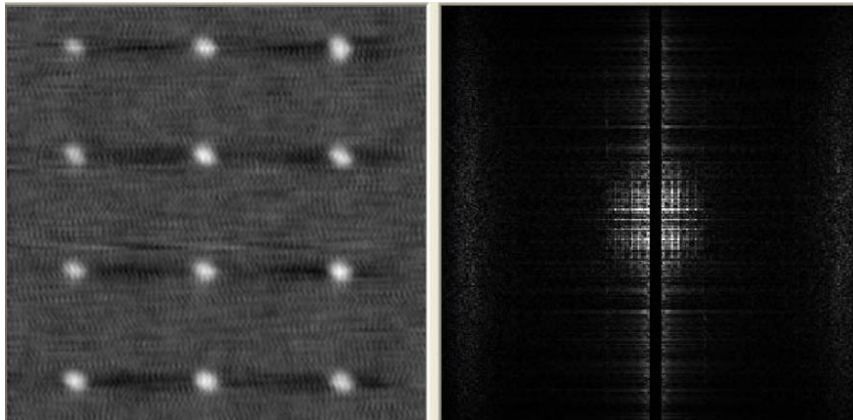


Рис. 4 Применение ВЧ фильтра к изображению и его Фурье-образ [3]

Таким образом, удаление из Фурье-образа вертикальной полосы позволило практически полностью избавиться от помехи.

Дополнительно изображение можно улучшить, применяя низкочастотный фильтр и удаляя, таким образом, ВЧ часть спектра изображения.

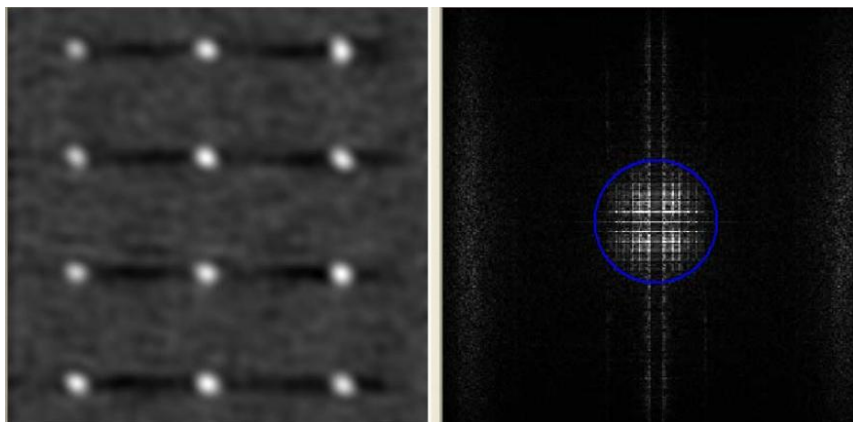


Рис. 5 Применение НЧ фильтра (оставлена только область внутри круга на Фурье-образе) к изображению и Фурье-образ изображения до фильтрации [3]

Остаются провалы между точками, они связаны с тем, что при вырезании вертикальной линии потеряна часть нужного НЧ сигнала, и эту операцию можно повторить, уточнив границы.

В программе NOVA процедура Фурье-анализа запускается либо при выборе пункта Fourier Analysis в выпадающем меню Image Analysis, либо из Дерева методов посредством двойного щелчка на Fourier Analysis ==> FFT Filtering. Окно подпрограммы анализа состоит из правого и левого окон, в левом закладками можно переключаться между исходным кадром Source Frame и его изображением в Фурье-пространстве. Результат преобразования можно наблюдать на закладке Result Frame в правом окне.

По осям X и Y значения пространственных частот (обратной длины волны) представлены в относительных единицах (пикселях), которые можно пересчитать в единицы обратной длины. Так, значение одной относительной единицы по оси X равно отношению $2k_{x\max}/(\text{число пикселей по оси X})$, где $k_{x\max}$ – максимальная пространственная частота, определяемая через шаг по выбранной оси: $k_{x\max} = 1/(2\Delta L_x)$. Максимальная пространственная частота равна отношению размера АСМ кадра в единицах длины к размеру кадра в пикселях – $\Delta L_x = L_{x\max}/N_{x\max}$.

Перед Фурье-анализом, особенно если исследуется периодичность структуры, необходимо выполнить вычитание плоскости из исходного АСМ изображения. Это позволит убрать максимум в области нулевых пространственных частот.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе мы проведем обработку изображений, полученных на АСМ «Solver PRO» (NT-MDT).

1. Подготовка к измерениям

1. Ознакомиться с порядком проведения лабораторной работы по измерению на АСМ, приведенным в [4].
2. Получить тестовый образец или файл с экспериментальными данными.

2. Проведение измерений

1. Получить несколько изображений тестовых образцов в соответствии с процедурой, описанной в [4].
2. Применить к полученным изображениям фильтры, описанные во введении к лабораторной работе. Сочетание фильтров устанавливается в зависимости от наблюдаемых искажений.

3. Анализ результатов

1. С какими особенностями работы АСМ можно связать искажения, наблюдающиеся на полученных изображениях?
2. Какие фильтры потребовалось применять? Какой при этом достигнут результат?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткие теоретические сведения.
2. Описание образца.
3. Примененные фильтры.
4. Обработанные и необработанные изображения.
5. Выводы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Какие причины приводят к тому, что плоскости при АСМ исследовании становятся поверхностями высших порядков?
2. О чем говорят направленные линии на Фурье-спектре изображения?
3. В чем разница между медиальным и линейным фильтром? Какой лучше устраняет случайные «выбросы», работа какого аналогична фильтру низких частот?

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М., Техносфера 2005 г. 144 с. – Электрон. дан. – 2013. – Режим доступа: http://ntmdt.ru/data/media/files/brochures/osnovy_skaniruyushcej_zonдовой_mikroskopii.pdf, свободный.
2. Nova. Программное обеспечение для СЗМ. Справочное руководство. – Москва: ЗАО «Нанотехнология-МТД». 2010. 493 с.
3. Фурье-фильтрация изображений. [Электронный ресурс] / Сайт программы обработки АСМ изображений Callisto. – Электрон. дан. – 2007. – Режим доступа: http://callistosoft.narod.ru/Resources/Fourier_Filtering.pdf, свободный.
4. Парфенов П.С., Баранов А.В., Литвин А.П., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. – 40 с.
5. Фильтрации сигналов и изображений: фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) : монография / Ю. Е. Воскобойников, А.

- В. Гочаков, А. Б. Колкер. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. – 188 с.
6. Р. Гонсалес и Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера. 2006. 1072 с.
 7. Лекция по обработке АСМ изображений с помощью ПО Nova. Часть 5. [Электронный ресурс] / Videоканал Nanoeducator компании НТ-МДТ. – Электрон. дан. – 2013. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=6wqSunUDKEk>, свободный.
 8. Лекция по обработке АСМ изображений с помощью ПО Nova. Часть 6. [Электронный ресурс] / Videоканал Nanoeducator компании НТ-МДТ. – Электрон. дан. – 2013. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=179z_bsnNxg, свободный.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Кафедра основана в 2002 году под названием «Оптическая физика и современное естествознание» в составе факультета «Фотоники и оптоинформатики». Первым заведующим кафедрой был избран М.Н. Либенсон, возглавлявший лабораторию «Фотофизика поверхности» в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова. С 2006 г. ею руководит доктор физ.-мат. наук, профессор А.В. Федоров.

Образовательные программы бакалавриата и магистратуры кафедры ОФиСЕ сориентированы на актуальные потребности предприятий и организации высокотехнологичных направлений экономики в специалистах, а также учитывают новейшие достижения и тенденции развития нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики.

В настоящее время на кафедре преподают профессора А.В. Баранов, Т.А. Вартамян, Е.А. Коншина, В.Г. Маслов, Е.Ю. Перлин, А.В. Федоров; доценты Л.П. Амосова, Г.Н. Виноградова, В.Л. Комолов, М.Ю. Леонов, А.О. Орлова, П.С. Парфенов, Ушакова Е.В.

Авторы данного учебного пособия – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры Баранов Александр Васильевич, доценты кафедры кандидат техн. наук Парфенов Петр Сергеевич и кандидаты физ.-мат. наук Ушакова Елена Владимировна и Литвин Александр Петрович – известные специалисты в области экспериментальных исследований и диагностики наноструктур различными методами микроскопии и оптической спектроскопии.

Петр Сергеевич Парфенов
Александр Петрович Литвин
Елена Владимировна Ушакова
Александр Васильевич Баранов

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный практикум для профиля «Оптика наноструктур»

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49