

Программа кандидатского экзамена по специальности (аспирантура Института аналитического приборостроения РАН)

Направление подготовки: **03.06.01 Физика и астрономия**

Направленность: **01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики**

Раздел: «Аналитические приборы на основе микрочиповых технологий»

Введение. Современные тенденции развития аналитических приборов и систем для биологических и медицинских исследований. «Дорожные карты развития нанотехнологий».

Теоретические основы микро- и нанофлюидики. Флюиды: жидкости и газы. Гидродинамические и реологические свойства жидкости. Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Гипотеза сплошной среды и границы ее применимости. Характеристические числа и критерии (Кнудсена, Рейнольдса, Пекле, Прандтля, Шмидта, Грасгофа). Турбулентное и ламинарное движение жидкости. Базовые математические модели: система уравнений Навье-Стокса, Пуассона-Больцмана, диффузии, закон Фика, неразрывности, метод моментов для приближенного аналитического решения уравнения Навье-Стокса. Численное моделирование в микрофлюидике. Поверхностные и капиллярные силы. Гидрофобные и гидрофильные поверхности. «Капельная» микрофлюидика.

Электрокинетические процессы в микро- и нанофлюидике. Двойной электрический слой – ДЭС, оценивание дебаевской длины и толщины ДЭС. Дзета-потенциал. Электроосмотический поток в микро- и наноканалах. Электротермический поток. Электрофорез. Струящийся потенциал. Потенциал седиментации. Электрофоретическое разделение проб. Электроосмотическая и электрофоретическая подвижность. Концентрирование проб.

Методы управления движением и разделение частиц в жидкости. Диэлектрофорез. Электроротация. Фотофорез. Оптофорез. Оптический пинцет. Магнитофорез. Электромагнитофорез. Ультразвуковые поля. Особенности воздействия внешних полей на биологические частицы (макромолекулы, клетки). Реализация методов в микрофлюидных системах.

Сенсоры и биосенсоры. Состав и особенности сенсоров. Принципы функционирования. Селективные и неселективные сенсоры. Мультисенсорные системы (электронный нос, электронный язык). Характеристики сенсоров. Микро- и нанотехнологии при создании сенсорных систем. Биосенсоры. Биоселективные чувствительные элементы (нуклеиновые кислоты, антитела и рецепторы, ферменты, клетки и т.д.) и преобразователи (трансдюсеры). Требования, предъявляемые к биосенсорам. Физические и химические методы иммобилизации молекул (биологического материала). Биочипы: состав, принципы функционирования и области применения.

«Micro total analysis system» и Lab-on-a-chip - "микросистемы полного анализа" и "лаборатория на чипе". Микрочипы (гибридизационные (матричные), микро- и нанофлюидные, гибридные микрочипы) как элементы аналитических и технологических систем. Функциональные элементы микро- и нанофлюидных чипов: интерфейсы ввода пробы, транспортные каналы, устройства дозирования, микрокамеры и микросмесители, клапаны, микронасосы, нагреватели, микродатчики, наноструктуры. Идеология Т и Н – сенсоров. Фильтрация и фракционирование на микро- и нано- структурах. Седиментационные методы разделения на микрочипе. Многоканальные CD – чипы. Экстракция. Теория экстракции. Твердофазная, жидкость-жидкостная и микрофлюидная экстракции. Диэлектрофорез на микрочипе. Разделение биологических структур (клеток, бактерий, вирусов).

Наночастицы и наноструктуры в биологических и медицинских исследованиях. Наночастицы: методы и способы получения. Применение для транспортировки веществ,

управления движением потоками жидкости, разделения молекул, концентрирования и извлечения частиц. Нанопоры и нанопористые материалы. Нанокристаллы. Квантовые точки. Использование наноструктур для обнаружения и анализа веществ, для извлечения и концентрирования компонентов. Нанопоровое секвенирование нуклеиновых кислот.

Методы и технологии изготовления микрочипов. Материалы микрочипов (кремний, кварц, стекло, полимеры и др.). Получение микро- и нано- размерных структур и элементов для микрочипов: механическая микрообработка, прецизионное литье, литография (фотолитография, рентгеновская, ультрафиолетовая, ионная, СЗМ – литография, наноимпринтная литография и др.), травление материала, LIGA – технологии (литография, гальваника, импринтинг), лазерная абляция, нанесение тонкослойных покрытий (магнетронное, электрохимическое осаждение и т.д.). Сравнительные характеристики. Технологии и материалы для оперативного изготовления микрофлюидных устройств в лабораторных условиях. Методы «мягкой» литографии при изготовлении микрофлюидных чипов. Герметизация микрочипов.

Топология (архитектура) и конструкции микрочипов. Микроканалы, смесители, дозаторы, клапаны, фильтры, реакционные камеры, микронасосы, детекторы. Принципы функционирования. Интерфейсы микроустройств. Методы и способы управления микропотоками.

Методы и способы детектирования проб, содержащих биологический материал. Оптические, электрохимические, масс-спектрометрические и др. методы. Особенности детектирования сверхмалых количеств пробы. Детектирование и визуализация биологических объектов. Высокоразрешающая микроскопия (флуоресцентная микроскопия, микроскопия ближнего поля, конфокальная сканирующая, сканирующая зондовая микроскопия) при изучении макромолекул, клеток и других структур.

Анализ нуклеиновых кислот. Методы и приборы для анализа нуклеиновых кислот. Полимеразная цепная реакция (ПЦР) и другие методы амплификации генетического материала (ДНК, РНК) на микрочипе. Стадии амплификации и компоненты реакции. Кривая логистического роста, как математическая модель ПЦР. Эффективность полимеразной цепной реакции. Специфические и неспецифические методы ПЦР. Методы и приборы «цифровой» ПЦР. Секвенирование биополимеров. Секвенирование по Сэнгеру. Пиросеквенирование. Системы следующего поколения секвенирования. Анализ единичных молекул. Современные приборы и устройства для секвенирования.

Рекомендуемая литература

1. Микрофлюидные системы для химического анализа / Под ред. Золотова Ю.А., Курочкина В.Е. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 528 с. - ISBN 978-5-9221-1315-1
2. Принципы и методы молекулярной биохимии и молекулярной биологии / под ред. Кейта Уилсона, Джона Уолкера; пер. с англ. Т. Мосоловой, Е. Бозелек-Решетняк - Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 848 с.
3. Научные основы нанотехнологий и новые приборы : учебник-монография / [Р. Брайдсон [и др.]] ; под ред. Р. Келсалла, А. Хамли, М. Геогегана ; пер. с англ. А. Д. Калашникова .— Долгопрудный : Издательский Дом "Интеллект", 2011 .— 527, с. : ил., табл. — Авт. указаны на с. 14-15 .— Библиогр. в конце гл.
4. Основы нанотехнологий. Часть 1 : учебное пособие / А. А. Евстапов, Я. С. Посмитная ; М-во образования и науки РФ, Университет ИТМО .— СПб. : [Университет ИТМО], 2014. Ч. 1: Микро- и нанотехнологии для биологических и медицинских исследований. — 2014 .— 118, с. : ил. — . Библиогр.: с. 113-118.

Дополнительная литература

- 1 Фостер, Линн. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности : [сборник] / Л. Фостер ; [сост. и ред. Л. Фостера] ; пер. с англ. А. Хачояна .— М. : Техносфера, 2008 .— 349 с. : ил .— (Мир материалов и технологий ; VI-18) .— На тит. с. и пер. указ. авт.: Л. Фостер .— Библиогр. в конце ст .— 0 В доп.: Оборудование для исследований в нано- и

- микрoэлектронике / А. Г. Ульяненко .— ISBN 978-5-94836-161-1 ((в пер.)) .— ISBN 0-13-192756-6 ((англ.)) .
- 2 Ребриков, Д.В. ПЦР в реальном времени [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д.В. Ребриков, Г.А. Саматов, Д.Ю. Трофимов. — Электрон. дан. — М. : Бином. Лаборатория знаний, 2011. — 224 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=8804
 - 3 Смирнов, А.В. Мир белковых молекул: учебное пособие [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Электрон. дан. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 125 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=56892
 - 4 Уилсон К. Принципы и методы биохимии и молекулярной биологии [Электронный ресурс] : / Уилсон К., Уолкер Дж. — Электрон. дан. — М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 859 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=8704
 - 5 Наноструктуры в биомедицине [Электронный ресурс]: — Электрон. дан. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 547 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=8685
 - 6 Fundamentals of BioMEMS and Medical Microdevices//Ed. Saliterman S.S. Washington: SPIE PRES. 2006. 610 p.
 - 7 John C. Miller, Ruben M. Serrato, Jose Miguel Represas-Cardenas, Griffith A. Kundahl The Handbook of Nanotechnology. Business, Policy, and Intellectual Property Law. John Wiley & Sons, Inc. 2005. 368 p.
 - 8 Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics/ Editor-in-Chief Dongqing Li. Springer Science&Business Media, LLC., New York, USA. 2008. 2226 p.
 - 9 Bruus H. Theoretical microfluidics. Oxford University Press. Inc. USA. 2008. 346 p.
 - 10 Handbook of capillary and microchip electrophoresis and associated microtechniques/ Ed. J.P. Landers. CRC Press, Tailor & Francis Group, Boca Raton. 2008. 1598 p.
 - 11 Tabeling P. Introduction to Microfluidics. Oxford University Press. Inc. USA. 2005. 301 p
 - 12 Microarrays. Preparation, Microfluidics, Detection Methods, and Biological Applications/ Editors Kilian Dill, Robin Hui Liu, Piotr Grodzinski. Springer Science&Business Media, LLC., New York, USA. 2009. 356 p.
 - 13 Handbook of capillary and microchip electrophoresis and associated microtechniques/ Ed. J.P. Landers. CRC Press, Tailor & Francis Group, Boca Raton. 2008. 1598 p.
 - 14 Methods In Molecular Biology, 509. Microchip Methods in Diagnostics/ Edited by Dr. Ursula Bilitewski. Humana Press, a part of Springer Science+Business Media, LLC. 2009. 198 p.
 - 15 Microfluidics for Biological Applications/ Ed. Wei-Cheng Tian and Erin Finehout. Springer Science&Business Media, LLC., New York, USA. 2008. 416 p.
 - 16 Biosensors and Biodetection. Methods and Protocols, Volume 503: Optical-Based Detectors //Ed. Avraham Rasooly and Keith E. Herold. Humana Press, Springer Science&Business Media, LLC., New York, USA. 2009. 452 p.

Раздел: «Масс-спектрометрия»

Введение. Что такое масс-спектрометрия (ионизация, разделение по массе, детектирование, вакуум). Краткий исторический обзор. Масс-спектр и его особенности. Основные понятия и определения масс-спектрометрии: диапазон масс, разрешающая способность, чувствительность, скорость записи масс-спектра. Виды масс-спектрометрического анализа: изотопный, элементный и молекулярный.

Масс-спектрометр, его блок-схема. Состав блок-схемы: система ввода пробы, источник ионов, масс-анализатор, приемник ионов, вакуумная система, система детектирования и обработки информации, система электронного питания и управления.

Методы ионизации и источники ионов. Методы ионизации летучих и нелетучих, стабильных и нестабильных веществ, в высоком вакууме (элементарные процессы), при повышенном давлении и при атмосферном давлении (газокинетические процессы) Ионизация веществ в твердой фазе.

Источник ионов как электронно-оптическая система. Назначение элементов системы, особенности формирования пучка ионов.

Методы ионизации летучих веществ: электронная: ионизация, химионизация, однофотонная ионизация вакуумным УФ-излучением (фотоионизация). Основные соотношения. Элементарные процессы в газовой фазе. Ион-молекулярные реакции в масс-спектрометрии как метод ионизации и как артефакт. Источники ионов с ионизацией в газовой фазе (с электронным ударом).

Методы анализа твердых проб. Поверхностная термоионизация солей и окислов – основной метод изотопного анализа. Ионизация твердых образцов в разряде (искровом, тлеющем, скользящем), лазерная ионизация, ионизация в индуктивно-связанной плазме.

Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Масс-спектрометрия быстрых атомов (FAB). Источники ионов. Физические факторы, определяющие основные погрешности анализа при ионизации твердых проб в разряде, при вторичной ионной эмиссии с поверхности и при ионизации в индуктивно-связанной плазме.

Анализ нелетучих веществ, макромолекул, биополимеров (спрей-методы). Методы – предшественники электроспрея: термоудар, плазменная десорбция, термоспрей. ЭРИ АД и электроспрей, сходство и различие. Основные физические принципы, лежащие в основе электроспрея. Многозарядные ионы. Возможности количественного анализа сложных смесей. Наноспрей, его особенности. Метод МАЛДИ, его отличительные особенности.

Источники ионов с газодинамическими интерфейсами для реализации метода электроспрея.

Электронно-оптическая теория масс-анализа в фазовом пространстве: эмиттанс и аксептанс. Транспортировка пучков заряженных частиц - основа чувствительности масс-спектрометрических приборов.

Принципы разделения масс и фокусировки пучков ионов в электрических и магнитных полях. Масс-анализаторы статические магнитные с одинарной и двойной фокусировкой. Принципы расчета магнитных масс-спектрометров, физические основы приборных артефактов.

Динамические масс-анализаторы: физические принципы. Квадрупольные масс-анализаторы, особенности расчета, достоинства и ограничения. Времяпролетные масс-анализаторы. Современные подходы к расчету и конструированию времяпролетных масс-анализаторов.

Методы и системы регистрации ионов. Погрешности и ошибки, связанные с регистрацией малых ионных токов вторичным электронным множителем: потенциальная и кинетическая вторичная электронная эмиссия, зависимость коэффициента умножения от массы иона.

Особенности масс-спектров биополимеров: многозарядные ионы, изотопные распределения, их использование для определения молекулярного веса и брутто-формулы вещества.

Методы первичной и вторичной обработки масс-спектральной информации. Анализ сверхслабых сигналов, выделение сигнала из фона, алгоритмы разделения мультиплетов масс в масс-спектрах, анализ формы линии.

Современные приборные комплексы: ГХ-МС, ХЖ-МС, МС-МС, ЭлФ-МС с различными масс-анализаторами, методики масс-спектрометрического анализа изомеров. Сочетание приборных масс-спектрометрических комплексов с другими приборными методами “on line” и “of line”

Рекомендуемая литература

1. С.М.Чупахин, О.И.Крючкова, Г.И.Рамендик. Аналитические возможности в искровой масс-спектрометрии. М., Атомиздат, 1972, 224с.
2. Масс-спектрометрический метод определения следов. Под ред. М.С.Чупахина. М., МИР, 1975, 453с.

3. Джонстон Р. Руководство по масс-спектрометрии для химиков-органиков. М., МИР, 1975, 236 с.
4. А.А.Сысоев. Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М. Энергоатомиздат, 1983, 265с.
5. Терентьев П.Б. Масс-спектрометрия в органической химии. М. ВШ, 1979, 223 с.
6. Полякова А.А. Молекулярный масс-спектрометрический анализ органических соединений. М. Химия, 1983, 248 с.
7. Тальрозе В.Л., Ревельский И.А., Полякова А.А. Масс-спектрометрия органических соединений с применением ион-молекулярных реакций. М. Наука, 1986, 240 с.
8. Тахистов В.В. Органическая масс-спектрометрия. Л. Наука, 1990, 223 с.
9. Заикин В.Г., Варламов А.В., Микая А.И., Простаков Н.С. Основы масс-спектрометрии органических соединений. М. Наука/интерпериодика, 2001, 286 с.
10. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М. «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2003, 493 с.
11. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. 2013, М., ТЕХНОСФЕРА, 631с
12. Л.Н.Галль. Физические основы масс-спектрометрии и ее применение в аналитике и биофизике. С-Петербург, Изд. Политехнического университета, 2010, 164с.

Дополнительная литература

1. Л.Н.Добрецов, М.В.Гомоюнова. Эмиссионная электроника. М., НАУКА, 1966, 564с.
2. А.Бенфорд. Транспортровка пучков заряженных частиц. М. АТОМИЗДАТ, 1969, 239с.
3. М.Л.Александров, Ю.С.Куснер. Газодинамические молекулярные, ионные и кластеризованные пучки. Л., Наука, 1989, 271с.
4. А.П.Веренчиков, Н.В.Краснов, Л.Н.Галль. Тандемные масс-спектрометры в биохимии (Обзор). Научное приборостроение, 2004, т.14, №2, с.4-23.

Раздел: «Основы электронно- и ионно-оптических приборов»

Электромагнитные поля и общие законы движения заряженных частиц. Уравнения Максвелла. Потенциал и напряженность электростатического поля. Закон Остроградского-Гаусса. Влияние диэлектриков на электростатическое поле. Осесимметричные, двумерные и мультипольные электростатические поля. Напряженность и индукция магнитного поля. Магнитное поле в присутствии ферромагнетика. Гистерезис. Магнитное сопротивление. Законы Кирхгофа для магнитопроводов. Магнитная защита. Формирование магнитных полей постоянными магнитами и электромагнитами. Осесимметричные и мультипольные магнитостатические поля. Методы расчета электростатических и магнитных полей.

Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Закон сохранения энергии. Магнитная и электростатическая жесткость. Законы подобия движения заряженных частиц в электростатических и магнитостатических полях. Фазовый объем и теорема Лиувилля. Симплектическое соотношение.

Аберрационные разложения в оптике заряженных частиц. Аберрационные разложения для параксиальных пучков. Линейные характеристики систем корпускулярной оптики. Гауссова плоскость, фокальная плоскость, увеличение, дисперсия в пространстве и по времени пролета, пространственная и временная разрешающая способность. Стигматичная и астигматичная пространственная фокусировка. Кроссовер пучка заряженных частиц. Параксиальные симплектические соотношения. Метод матриц перехода. Основные виды матричных преобразований. Системы с зеркальной и точечной симметрией. Параксиальные свойства симметричных систем. Бездисперсионные симметричные системы. Интегральное соотношение для дисперсии по жесткости в статических электромагнитных полях.

Аберрации изображений. Геометрические аберрации и их основные виды в системах с одной и двумя плоскостями симметрии. Хроматические аберрации. Линия фокусов. Аберрации и разрешающая способность. Симплектические соотношения для коэффициентов аберраций

второго порядка. Матрицы перехода высокого порядка. Устранение aberrаций в симметричных системах. Схема расчета aberrационных разложений траекторным методом. Эффективная граница поля.

Транспортировка и фокусировка заряженных частиц в статических полях. Кардинальные элементы линз и их линейные матрицы перехода. Осесимметричные и двумерные электростатические линзы. Иммерсионные и одиночные линзы, линзы с ускоряющим и замедляющим полем. Aberrации осесимметричных и двумерных линз. Апертурные линзы. Катодные линзы. Трансаксиальные линзы. Полые линзы. Скращенные линзы и их мультиплеты. Электростатические зеркала. Формирование изображений в осесимметричных магнитных линзах. Соленоид. Электростатические и магнитные квадрупольные линзы. Линейные матрицы перехода квадрупольных линз. Aberrации квадрупольных линз. Квадрупольные мультиплеты и их применения. Комбинированные ахроматичные квадрупольные линзы.

Движение заряженных частиц в периодических статических полях. Условие линейной устойчивости движения. Нелинейные эффекты в периодических статических полях.

Транспортировка заряженных частиц в радиочастотных полях. Псевдопотенциал неоднородного радиочастотного электростатического поля. Транспортировка заряженных частиц в квадрупольных и мультипольных вакуумных радиочастотных каналах. Условие устойчивости движения в радиочастотных квадрупольных. Отражающие радиочастотные поверхности. Транспортировка ионов в газонаполненных радиочастотных каналах на низких давлениях. Столкновительное охлаждение ионов. Модели ионно-молекулярных столкновений. Транспортировка ионов в газонаполненных радиочастотных каналах на промежуточных давлениях.

Магнитные масс-анализаторы. Секторные магнитные анализаторы. Анализаторы с однородным магнитом: фокусировка, дисперсия по массе и энергии. Анализаторы с объектом и изображением в бесполом пространстве. Влияние формы края магнита на его свойства. Конические и клиновидные магнитные анализаторы. Aberrации секторных магнитов и способы их коррекции. Многокаскадные магнитные анализаторы. Ахроматичные многокаскадные магнитные системы. Магнитные анализаторы с фокусировкой по энергии. Газонаполненные магнитные анализаторы.

Электростатические энергоанализаторы. Интегральное соотношение для дисперсии для электростатических анализаторов. Предторможение пучка частиц в электростатических анализаторах. Секторные электростатические энергоанализаторы. Фокусировка и дисперсия в цилиндрическом, сферическом и тороидальном анализаторе. Формирование тороидального поля с помощью пластин Мацуды. Aberrации электростатических секторных анализаторов. Многокаскадные электростатические секторные анализаторы. Омега-фильтр.

Зеркальные электростатические энергоанализаторы. Дисперсия зеркальных анализаторов. Фокусировка и дисперсия в плоском и цилиндрическом зеркале. Многокаскадные зеркальные анализаторы. Другие типы зеркальных анализаторов. Зеркальные анализаторы с аксиально-неоднородным полем. Энергоугловые анализаторы. Полярно-тороидальный анализатор. Электростатические энергоанализаторы с задерживающим полем.

Масс-анализаторы, использующие комбинацию электростатического и магнитного полей. Секторные масс-анализаторы с фокусировкой по энергии. Интегральное соотношение для многокаскадных секторных анализаторов. Масс-анализатор Нира-Джонсона и Маттауха-Герцога. Ахроматичные системы. Фильтр Вина.

Принцип Фурье-спектрометров. Ловушка Пеннинга. Орбитрэп.

Времяпролетные масс-анализаторы Принцип времяпролетного масс-анализа. Формирование импульсных пакетов ионов. Аксиальные и ортогональные источники. Временной фокус импульсного источника. Энергоразброс и ширина импульса во временном фокусе. Время разворота ионов. Применение ионных зеркал во времяпролетных масс-

анализаторах. Фокусировка по энергии. Квадратичные ионные зеркала. Секторные изохронные времяпролетные анализаторы.

Многоотражательные и многооборотные времяпролетные масс-анализаторы. Анализаторы с замкнутым и разомкнутым типом движения. Секторные многооборотные масс-анализаторы. Зеркальные многоотражательные масс-анализаторы.

Радиочастотные масс-анализаторы. Квадрупольный масс-фильтр. Принцип работы. Диаграмма стабильности. Зоны стабильности движения. Ввод ионов в квадрупольный масс-фильтр. Нелинейные эффекты в квадрупольных масс-фильтрах. Монопольный масс-фильтр. Трехмерные радиочастотные ионные ловушки Пауля. Диаграмма стабильности для ловушки Пауля. Метод резонансной масс-селективной экстракции ионов. Линейные ловушки. Комбинированные ловушки.

Рекомендуемая литература

1. П.Хокс, Э.Каспер. Основы электронной оптики. В 2-х тт. М.: Мир, 1993.
2. Г.Вольник. Оптика заряженных частиц. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
3. M.Yavor. Optics of charged particle analyzers. Elsevier, Amsterdam, 2009.
4. М.Силадьи. Электронная оптика.
5. В.М.Кельман, С.Я.Явор. Электронная оптика. Л.: Наука, 1963.
6. Л.А.Баранова, С.Я. Явор. Электростатические электронные линзы.
7. В.П.Афанасьев, С.Я.Явор. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
8. С.Я.Явор. Фокусировка пучков заряженных частиц квадрупольными линзами. 1968.
9. Слободенюк. Квадрупольные масс-анализаторы.
10. R.E.March, J.F.J.Todd. Quadrupole ion trap mass spectrometry. Wiley, N.Y., 2007.
11. P.K.Ghosh. Ion traps. Oxford Sci. Publ., Oxford, 1995.
12. А.Бенфорд. Транспортировка пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1969.
13. А.А. Матышев Изотраекторная корпускулярная оптика. СПб.: Наука, 2000. 375 с.
14. В.М.Кельман, И.В.Родникова, Л.М.Секунова. Статические масс-спектрометры. Алма-Ата: Наука, 1985. 264 с.

Раздел: «Методы и техника автоматизации физического эксперимента»

Аналого-цифровые преобразователи. Три классических метода аналого-цифрового преобразования. Классификация в зависимости от количества «эталонных» устройств. АЦП построенный по методу считывания. АЦП на основе метода поразрядного уравнивания. Понятия об интегрирующих АЦП. Простейшей интегрирующий АЦП. АЦП с компенсационным интегрированием. Преобразователи напряжения в частоту. Сигма-дельта АЦП. Интегральные характеристики АЦП. Динамической погрешности АЦП и оценка апертурного времени.

Цифро-аналоговые преобразователи. Последовательные ЦАП. ЦАП с широтно-импульсной модуляцией. Последовательный ЦАП на переключаемых конденсаторах. Параллельные ЦАП. ЦАП с суммированием весовых токов. ЦАП на переключаемых конденсаторах. ЦАП с суммированием напряжений. Статические и динамические параметры ЦАП. Шумы ЦАП.

Параллельные интерфейсные системы. Классификация интерфейсных подсистем по способу их организации. Особенности магистральных интерфейсных подсистем. Магистраль PCI, перечень основных сигналов магистрали. Ввод и вывод информации для периферийных устройств в магистрали PCI. Прерывания в магистральных системах. Назначения основных элементов в системах прерывания программ. Понятие о прямом доступе в память. Системы микро PCI. Магистраль VME. Арбитраж в системе VME. Интерфейс IEEE-488. Цепочечная организация систем с интерфейсом IEEE-488. Байт-последовательная, бит-параллельная передача данных в системах с интерфейсом IEEE-488.

Последовательные интерфейсные системы. Последовательная передача данных. Квитирование при установлении связи. Основные сигналы при передаче данных в последовательном коде. Стартовые и стоповые биты. Биты для проверки на четность. Код ASCII. Учет особенностей линии связи при последовательной передаче. Передача данных по витой паре. Линейные формирователи и приемники. Электрические характеристики сигналов. Передача данных по волоконной линии. 6.3 Способы борьбы с ошибками при передаче данных в последовательном коде. Вычисление бита четности. Вычисление контрольных сумм. Символьная и блочная проверка четности и контрольных сумм. Понятие о циклическом коде. Понятие о кодах с исправлением ошибок Хемминга. Основные последовательные интерфейсы в системах с распределенным интеллектом (постановка задачи и обзор). Последовательный интерфейс RS-485. Интерфейс I²C. CAN-интерфейс. Интерфейсы SPI, SCI. Интерфейс USB.

Микропроцессорные контроллеры (МК) в системах сбора данных и управления. МК на основе микросхемы 8051 (МК-51). Программирование МК -51.

Проектирование цифровых устройств на основе программируемых логических матриц (PLA). PLA- современная база для цифровых устройств. PLA различных типов фирмы Altera. Технические средства проектирования цифровых устройств на основе микросхем фирмы Altera.

Основные алгоритмы обработки сигналов в системах сбора данных и управления. Классификация сигналов. Преобразование Фурье для периодических сигналов. Преобразование Фурье для непрерывных функций. Точность вычисления спектра для функций ограниченных по времени. Физический смысл преобразования Фурье. Формула Пуассона. Условия существования и свойства преобразования Фурье. Примеры функций и их преобразование Фурье. Мощность и энергия сигналов. Теорема Парсеваля. Понятие о свертке сигналов. Уравнение свертки. Прямая и обратная задачи, связанные с операцией свертки. Теорема Планшереля. Временная и частотная фильтрации. Основные типы фильтров. Корреляция. Автокорреляционные и кросскорреляционные функции. Стационарные и эргодичные случайные процессы. Основные параметры таких процессов. Теоремы дискретизации. Спектральная плотность случайных сигналов. Теорема Винера-Хинчина. Отыскание параметров случайных сигналов методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов для линейных функций. Отбраковка выбросов в массивах данных спектральной информации. Сглаживание сигналов. Алгоритмы обнаружения спектральных пиков на основе метода максимального правдоподобия. Обнаружение пиков гауссовой формы на основе корреляционных алгоритмов при моделировании формы пиков трапецией и треугольником. Алгоритмы оценки параметров неразделившихся спектральных пиков. Признаки «мультиплетности» спектральных пиков. Понятие о методе Эткинда для интерполяции экспериментальных функций. Понятие об идентификации веществ методом сравнения с библиотечными спектрами. Обработка сигналов с использованием вейвлет преобразований. Возможности вейвлет-преобразования по локализации сингулярности сигналов. Детализация и аппроксимация сигналов с помощью вейвлет-преобразования. Реконструкционные фильтры на основе вейвлет функций. Выбор оптимального количества уровней декомпозиции основанный на свойствах данного ортогонального вейвлета и информационного критерия.

Рекомендуемая литература:

1. Ж.Макс Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Том 1. Москва «МИР» 1983.
2. Автоматизация обработки масс-спектрометрической информации Авторы: Гуревич А.Л., Русинов Л.А., Могильницкий А.М., Иванова Г.В., Борнгардт А.Ф., Шутов М.Д. Серия «Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества». «ЭНЕРГИЯ» Москва 1978.
3. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. «Наука» Москва 1971.

4. Левин Б.Р. «Теоретические основы статистической радиотехники» Москва «Радио и связь» 1989.
5. Рик Р. Энциклопедия аппаратных средств. 2001 г.
6. Гитис Э.И. Пискулов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи, М. Энергоиздат 1983.
7. Микросхемы АЦП и ЦАП. Справочник. Москва. Издательский дом «Додэка» 2005 г.
8. И. Добеши Десять лекций по вейвлетам. Москва-Ижевск НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2001 г , 464 стр.

Раздел: «Оптические методы исследований»

Волновые свойства света. Свет как электромагнитные волны. Волновое уравнение (одномерный случай). Плоская монохроматическая световая волна. Скорость света. Поляризация света. Энергия, переносимая световой волной. Единицы измерения световых величин. Бегущие и стоячие волны. Отражение и преломление света. Интерференция. Интерферометр Фабри-Перо. Дифракция света. Рассеяние света. Излучение абсолютно черного тела.

Квантовые свойства света. Формула Планка. Энергия фотона. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Теория фотоэффекта Эйнштейна.

Источники света. Лампа накаливания. Газоразрядные источники. Светодиоды. Лазеры.

Приемники света. Внешний и внутренний фотоэффект. Фотоэлемент. Фотоумножитель. Фотодиод. Многоэлементные приемники излучения. Линейные и матричные фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ПЗС).

Шумы (флуктуации) света. Когерентность световых колебаний. Детектирование случайного светового поля. Формула Манделя. Флуктуации интенсивности. Флуктуации числа фотонов. Дробовой шум.

Преобразование изображений оптическими приборами. Тонкая линза. Продольное и поперечное увеличение. Лупа, микроскоп, телескоп, фотоаппарат. Глаз как оптический прибор. Формирование изображения в голографии.

Лазеры. Свойства лазерного излучения. Лазер как генератор света. Оптические резонаторы. Принципы усиления света. Свойства лазерного излучения. Основные типы лазеров: газовые, твердотельные, полупроводниковые, жидкостные, химические, лазеры на центрах окраски, газодинамические, эксимерные, на свободных электронах. Лазеры, как стандарты частоты.

Оптическое приборостроение. Основные характеристики оптических приборов: дисперсия, разрешающая сила, светосила, пропускание. Спектральные приборы. Лазерные приборы. Приборы для поляризационно-оптического анализа.

Рекомендуемая литература.

1. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики.
2. Н.И. Калитеевский. Волновая оптика.
3. Лебедева. Техника оптической спектроскопии.
4. Н.В.Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., Наука. 1983.
5. В. Демтредер, Лазерная спектроскопия. М.: Наука. 1985.
6. С.А.Ахманов, Ю.Е.Дьяков, А.С.Чиркин. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука. 1961.
7. С.М.Рытов. Введение в статистическую радиофизику. Ч.1.Случайные процессы. М, Наука. 1986.
8. А.Мэйтленд, М.Данн. Введение в физику лазеров. М.: Наука. 1978.
9. Физическая энциклопедия. М.: Сов. Энциклопедия, 1988-1998.

Раздел: Методы и приборы микро- и нанотехнологий»

Введение в дисциплину. Пучковые и зондовые методы микро- и нанотехнологии. Краткая историческая справка. Изобретение электронного микроскопа Русска. Микропрофилометр Янга Изобретение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) Г. Биннигом и Г. Рорером. Нобелевская премия по физике 1986 года за изобретение электронного и туннельного микроскопов. Просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия. Электронная микроскопия сверхвысокого разрешения. Сканирующая зондовая микроскопия (туннельная, силовая, ближнепольная). Технология фокусированных электронных и ионных пучков. Электронная и ионная литография. Зондовая литография. Манипулирование микро- и нанообъектами. Преимущества и недостатки пучковых и зондовых методов, объединение пучковых и зондовых методов в одном приборе.

Физические основы сканирующей туннельной микроскопии. Уравнение Шредингера. Выражение для плотности потока вероятности. Прохождение квантовой частицы через потенциальный барьер. Надбарьерное отражение. Туннельный эффект. Вероятность туннелирования. Выражение для вероятности туннелирования в квазиклассическом приближении. Примеры туннельных явлений в природе. Радиоактивный α – распад. Ионизация нейтрального атома в сильном электрическом поле. Полевая электронная эмиссия. Автоэлектронный проектор. Межзонной туннелирование. Эффект Зинера. Ионизация нейтрального атома в электрическом поле у поверхности металла. Автоионный проектор. Контакт сильнолегированных полупроводников n- и p- типов. Туннельный диод. Туннельный контакт металл- диэлектрик- металл (М-Д-М). Вывод выражения для туннельного тока М-Д-М контакта для малых ($eV < \Phi$) и больших ($eV > \Phi$) туннельных напряжений. Идея сканирующего туннельного микроскопа. Оценка пространственного разрешения СТМ.

Инструментальные принципы СТМ. Нанозонд для СТМ. Измерение туннельного тока. Дробовый и тепловой шум в туннельном токе. Методы прецизионного механического сканирования. Методы измерения малых перемещений. Электродинамический сканер. Пьезосканер. Преимущества и недостатки электродинамического и пьезосканеров. Гистерезис пьезосканера. Линеаризация пьезосканера. Системы сближения зонда с образцом. Алгоритм захвата туннельного взаимодействия. Принципы защиты от механических и акустических вибраций, активная и пассивная защита. Защита от термодрейфа. Стабилизация туннельного контакта с помощью следящей системы. ПИД-регулятор. АЧХ и ФЧХ петли обратной связи. Компромисс между быстродействием и точностью слежения. Режим постоянного туннельного тока. Режим постоянного зазора. Методы измерения высоты потенциального барьера локального туннельного контакта. Особенности СТМ-эксперимента в вакууме, газе и жидкости. Получение атомного разрешения в СТМ. Примеры визуализации объектов различной природы в СТМ. Использование спин-поляризованных электронов.

Сканирующая туннельная спектроскопия. Упругая электронная туннельная спектроскопия. Энергетическое разрешение метода электронной туннельной спектроскопии. Определение плотности электронных состояний из вольт-амперных характеристик туннельного контакта. Туннельный контакт металл-изолятор-сверхпроводник. Измерение ширины энергетической щели в сверхпроводниках, эксперименты Гивера. Определение положения краёв зон в полупроводниках. Неупругий канал туннелирования. Неупругая электронная туннельная спектроскопия (НЭТС), энергетическое разрешение НЭТС. Измерение спектра молекулярных колебаний методом НЭТС. Преимущества НЭТС молекулярных колебаний по сравнению с ИК спектроскопией. Возбуждение плазмонов при неупругом туннелировании электронов. Локальный туннельный контакт – локальный источник электромагнитного излучения. Интегрирование наноантенны в локальный туннельный контакт. Плазмонный резонатор, увеличение эффективности излучения света из туннельного контакта. Ортодоксальная теория Лихарева-Аверина одноэлектронного

туннелирования. Эффект одноэлектронных осцилляций в туннельных контактах при низких температурах. Одноэлектронный транзистор при комнатной температуре. Построение «спектроскопических» изображений. Примеры исследований микро и наноструктур методом упругой и неупругой локальной туннельной спектроскопии. Визуализация вихревой решётки Абрикосова в сверхпроводниках методом «спектроскопических» изображений.

Сканирующая туннельная литография. Наноманипулирование. Токовая литография в СТМ. Механизмы токовой литографии. Локальное окисление поверхности в СТМ. Пространственное разрешение СТМ-литографии. Преимущества и недостатки СТМ-литографии. Манипулирование проводящими и диэлектрическими наночастицами с помощью сфокусированного электронного пучка и металлической иглы, закреплённой на 3Дмикроманипуляторе. Примеры создания функциональных наноструктур с помощью методов СТМ-литографии и наноманипулирования.

Физические основы сканирующей силовой микроскопии. Силовое взаимодействие между зондом и поверхностью образца. Силы Казимира. Взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Потенциал Ленарда-Джонса. Ориентационное взаимодействие. Индукционное взаимодействие. Дисперсионное взаимодействие. Капиллярные силы. Электростатическое взаимодействие проводящего зонда и образца. Магнитное взаимодействие магнитного зонда и образца. Ван-дер-Ваальсовское притяжение зонда к образцу. Адгезионные силы. Отталкивание зонда от образца. Модель Герца.

Инструментальные принципы и методики силовой микроскопии. Датчики измерения локального силового взаимодействия зонд-образец. Оптический и пьезоэлектрический методы измерения локальной силы. Типы и характеристики кремниевых кантилеверов. Пьезокантилеверы и их характеристики. Измерение резонансных частот кантилеверов. Зависимость «сила-расстояние», кривые подвода, силовая спектроскопия. Контактная, полуконтактная и бесконтактная измерительные моды. Колебательная многопараметрическая силовая микроскопия. Особенности измерительных мод. Фазовый контраст. Микроскопия латеральных сил (фрикционная микроскопия). Микроскопия электростатических сил, ёмкостная микроскопия. Измерение локального электрического потенциала (Кельвин-микроскопия). Магнитная силовая микроскопия. Многопроходные методики. Нанотвердомеры. Структура аппаратно-программных средств ССМ. Примеры применения ССМ для измерения модуля Юнга нанотрубок, исследовании локальной твёрдости материалов, исследовании магнитных доменов, измерении локального потенциала, исследовании полупроводниковых наногетероструктур.

Сканирующая силовая литография. Типы силовой литографии. Контактная силовая литография. Полуконтактная динамическая силовая литография. Зонды для силовой литографии. Условия функционирования нанозонда в режиме силовой литографии. Примеры создания наноструктур методом силовой литографии.

Оптическая микроскопия ближнего поля (ОМБП). Физические основы ОМБП. Дифракционный предел пространственного разрешения метода оптической микроскопии. Прохождение электромагнитной волны сквозь субволновую апертуру. Зонды на основе заостренного оптического волновода. Кремниевые кантилеверы с субволновой апертурой. Эффект усиления электромагнитного поля в нанозазоре у поверхности иглы. Принцип безапертурного оптического микроскопа ближнего поля. Оптическая микроскопия и спектроскопия ближнего поля в ИК и ТГц диапазоне. Схемы ОМБП на отражение и на просвет. Пространственное разрешение ОМБП, преодоление дифракционного предела. Примеры применения ОМБП при исследовании микроструктур в оптическом, инфракрасном, терагерцовом и радиочастотном диапазонах электромагнитного излучения.

Разновидности сканирующей зондовой микроскопии. Принцип сканирующей электрохимической микроскопии. Зонд для электрохимического микроскопа. Сканирующий микроскоп токов ионной проводимости. Зонд для сканирующего микроскопа токов ионной проводимости. Пространственное разрешение микроскопа токов ионной проводимости. Исследование биологических клеток в нативном состоянии. Сканирующий акустический

микроскоп. Картирование локальных тепловых полей. Картирование локальных магнитных полей с помощью SQUID-микроскопа. Литография на основе электрохимического микроскопа. Примеры применения различных типов СЗМ.

Аппаратно-программные средства СЗМ. Вопросы метрологии. Структура аппаратно-программных средств СЗМ. Методы сканирования. Проблема увеличения скорости сканирования. Способы увеличения скорости сканирования. Сканеры с датчиками перемещений. Линеарезация сканеров с помощью петли обратной связи. Учёт влияния формы острия на СЗМ изображения поверхности. Первичная и вторичная обработка СЗМ данных. Методы фильтрации СЗМ данных. Способы представления СЗМ данных. Линейные меры для сканирующих электронных и зондовых микроскопов. Калибровка СЗМ с помощью тестовых структур.

Пучковые методы микро- и нанотехнологий. Современные тенденции развития пучковых и зондовых методов нанодиагностики и нанолитографии. Электронно-оптическая схема просвечивающего и растрового электронных микроскопов. Источники электронов. Термокатод. Катод Шоттки. Автоэмиссионный катод. Преимущества и недостатки автоэмиссионных катодов. Зависимость пространственного разрешения от энергии электронного пучка. Высокора разрешающая электронная микроскопия. Режим отраженных электронов. Режим вторичных электронов. Природа контраста в режиме отраженных и вторичных электронов. Характеристическое рентгеновское излучение, возбуждаемое фокусированным электронным пучком. Рентгеновский микроанализ. Пространственное разрешение в режиме рентгеновского микроанализа. Энерго-дисперсионные и волно-дисперсионные детекторы рентгеновского излучения. Режим электронной дифракции в просвечивающем электронном микроскопе. Методика темнопольной микроскопии. Катодолюминесценция. Методика измерения токов, наведенных электронным пучком (ЕВИС). Методы электронной литографии. Ионная микроскопия. Источники ионов. Жидкометаллический источник ионов галлия. Полевой ионизационный источник ионов гелия. Пространственное разрешение ионного микроскопа. Методы ионной литографии. Методика совмещения электронного и ионного пучка. Использование синхротронного излучения для диагностики и литографии. Примеры применения пучковых методов. Современные тенденции развития пучковых и зондовых методов нанодиагностики и нанолитографии. Многозондовые картриджи. Преимущества совмещения РЭМ-СЗМ. Преимущества совмещения СЗМ с времяпролетным масс-спектрометром с вторичной ионизацией при послойном элементном анализе с нанометровым пространственным разрешением.

Рекомендуемая литература:

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy: from birth to adolescence // Rev. Mod. Phys. -1987. — V.6. -P. 615-625.
2. . Справочное руководство «Проведение измерений (подготовка прибора, основные методы измерений)» для сканирующего зондового микроскопа NTegra производства NT-MDT.
3. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М., 2004.
4. Галлямов М.О., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов.
5. Сивухин Д.В. Курс общей физики: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1983.
6. Бобринецкий И.И., Неволин В. К. Зондовая микроскопия в нанотехнологии. М., 2008.
7. Сивухин Д.В. Курс общей физики: Электричество. – М.: Наука, 1983.
8. Ландау Л.Д. Квантовая механика: Нерелятивистская теория. –М.: Наука, 1989.
9. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985.
10. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1987.
11. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии // Микросистемная техника. -2000. -№1. -С. 21-33.

12. Рыков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур // СПб: -Наука. -2001.
13. Мошников В.А. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наноэлектронике: учеб. пособие // СПб.: -Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
14. <http://www.ntmdt.ru>
15. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и наноэлектроники // Часть 1. Микроэлектроника. - 1999. -Т. 28. -№6. -С. 405-414; Часть 2. Микроэлектроника. -2000. -Т.29. -№1.
16. Нанотехнология. Физика. Процессы. Диагностика. Приборы. Под ред. В.В.Лучинина // — Москва. Физматлит. -2006.
17. Дедков Г.В. Физические аспекты взаимодействий зонд– поверхность в сканирующей зондовой микроскопии. Часть 1. //Нано- и микросистемная техника. -2006. -№8; Часть 2 // Нано- и микросистемная техника. – 2006.-№9.
18. Бухараев А.А., Овчинников Д.В., Бухараева А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микро-скопии (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1997. — Т. 63. — №5. — С. 10.
19. Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. «Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазона для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии» // Труды Института Общей Физики им. А. М. Прохорова, 62 (2006) С. 36.
20. Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В. «Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах» // Микроэлектроника. 31 (2002), № 4. С. 243-262.
21. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия (обзор) // ПТЭ. 1989. — №5.
22. Бахтизин Р.З., Галлямов Р.Р. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии. –Уфа. Изд. Баш. ГУ. -2003.
23. Ю.А. Новиков, Ю.В. Озерин, Ю.И. Плотников, А.В. Раков, П.А. Тодуа. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды института общей физики им. Прохорова, т.62, 2006.
24. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления. ГОСТ Р 8.628 – 2007.
25. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика поверки. ГОСТ Р 8.629 – 2007.