

Электронные и ионные пучки

УДК 537.533.3, 621.3.032.26

Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики

А. И. Дирочка, А. М. Филачёв

Проведен анализ тематики и докладов 10-го Всероссийского семинара по проблемам теоретической и прикладной электронной и ионной оптики, который состоялся в Москве 24—26 мая 2011 г.

PACS: 41.75.-i, 41.85.-p

Ключевые слова: движение заряженной частицы, электрон, ион, оптика, электрические и магнитные поля.

Введение

24—26 мая 2011 г. в Москве на площадке Государственного научного центра Российской Федерации ФГУП «НПО "Орион"» проведен 10-й Всероссийский семинар "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики"*.

Семинар организован Государственным научным центром РФ ФГУП «НПО "Орион"» при поддержке Научных советов РАН по проблемам "Ускорители заряженных частиц" и "Релятивистская сверхточечная электроника и пучки заряженных частиц".

Тематика семинара:

- теоретическая электронная и ионная оптика, абберационный анализ электронно-оптических элементов и систем, электронная и ионная оптика интенсивных пучков, компьютерное моделирование электронно-оптических систем;
- электронно-оптические и ионно-лучевые приборы, устройства и оборудование аналитического и технологического назначения, электронно-лучевые установки технологического назначения, ионно-плазменное технологическое оборудование, электронно-лучевые трубки, электронно-оптические преобразователи;
- прецизионные электронно-лучевые, ионно-лучевые и ионно-плазменные приборы и устройства в создании и исследованиях микро- и наноструктур и наноматериалов;

- инжекторы ускорителей заряженных частиц, электронные пучки в системах электронного охлаждения, электронные пучки с рекуперацией энергии;

- проблемы взаимодействия электронных и ионных пучков с веществом, электронно-лучевые и ионно-плазменные технологии, эллионные методы контроля в технологии производства полупроводниковых структур.

Для участия в семинаре было представлено свыше 80 докладов. В работе семинара приняли участие более 100 чел., среди них 2 члена-корреспондента РАН и 25 докторов наук из 41 организации Азербайджана, Беларуси, Германии, Казахстана, Польши, России и Украины.

Направления работы конференции

На первом заседании были заслушаны приглашенные доклады группы авторов от ОИЯИ и ВЭИ "Проект системы электронного охлаждения для коллайдера NICA", где были представлены состояние разработки проекта и планы его осуществления.

В ОИЯИ ведется разработка системы электронного охлаждения на энергию электронов до 2,5 МэВ для ускорительного комплекса на встречных пучках Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA). Главным отличием разрабатываемой системы является использование двух охлаждающих электронных пучков (по пучку на каждое кольцо коллайдера), ускорение и замедление которых осуществляется одним высоковольтным блоком.

Разработан концептуальный проект системы электронного охлаждения. Приведены его детали. Охладитель состоит из трех герметичных металлических сосудов, заполняемых газом SF₆, системы соленоидов для транспортировки электронных пучков и их совмещения с ионными пучками.

Дирочка Александр Иванович, ученый секретарь.
Филачёв Анатолий Михайлович, генеральный директор.
ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (499) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru
Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

© Дирочка А. И., Филачёв А. М., 2012

* Тезисы докладов 10-го Всероссийского семинара "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики". — М.: ФГУП «НПО "Орион"». 2011.

В приглашенном докладе **В. П. Ильина** "*Задачи петафлопного моделирования в электрофизике*" из Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН анализируется появление первых в мире компьютеров петафлопной производительности, а также грядущий приход "эксафлопной" эры (по закону Мура — 2019 г.). Эти события ставят перед научным сообществом принципиально новые проблемы, обусловленные переходом на многопроцессорные вычислительные системы (МВС) с числом ядер до нескольких миллиардов. Согласно опубликованной Международной программой эксафлопного программирования "Дорожной карты" (IESP, Road Map), предстоит глобальная смена прикладного программного обеспечения с ориентацией на свободный доступ (Open Source) и на адаптацию к гетерогенным архитектурам МВС со встраиваемыми специализированными ускорителями на основе графических процессорных элементов (GPU) и программируемых логических интегральных схем.

Доклад посвящен актуальным вопросам математического моделирования широкого круга электрофизических процессов, включающих междисциплинарные и обратные задачи (уравнения электромагнетизма, электронно-ионная оптика, сильноточное оборудование, тепловые и прочностные режимы, синтез устройств с заданными свойствами). Обсуждена концепция открытой базовой системы моделирования (БСМ), поддерживающей основные этапы крупномасштабного вычислительного эксперимента: геометрическое и функциональное моделирование, генерация сеток, аппроксимация краевых задач, решение алгебраических систем, алгоритмы оптимизации, постпроцессинг и визуализация результатов, средства принятия решений. БСМ рассматривается как интегрируемая инструментальная среда, на основе которой могут разрабатываться конфигурации пакетов прикладных программ для конкретных предметных областей.

Обзор возможностей кластерных нанотехнологических комплексов (включая и электронно-лучевые устройства) для создания и исследования приборов нанoeлектроники сделал **В. А. Быков** из Научно-производственной группы предприятий НТ-МДТ и ФГУП "НИИ ФП им. Ф. В. Лукина".

Он отметил, что, начиная с уровня размеров 130 нм и меньше, развитие микроэлектроники потребовало создания кластерных комплексов, и в настоящее время именно такие комплексы и используются в современных технологических линиях.

Отличительной особенностью нанотехнологических модулей НТ-МДТ является то, что они предназначены не только для исследования техно-

логических процессов, но и для создания нанотехнологических функциональных элементов. В ходе их создания была решена задача прецизионного репозиционирования. Разработаны специальные двухкоординатные системы, оснащенные высокоточными датчиками линейного перемещения, позволяющие с точностью до нескольких десятков нанометров быстро находить заданный участок поверхности пластины при переносе образца из одного модуля в другой. Кроме того, конструкция держателя пластины и позиционера обеспечивают возможность репозиционирования образца исходно с точностью 2—3 мкм.

В зависимости от конкретного типа изделий, на разработку которых ориентируется комплекс, требования к точности реализации тех или иных элементов, квазипланарных или трехмерных функциональных структур могут составлять от десятков нанометров до долей нанометра с атомарным дискретом. Модули комплексов НАНОФАБ 100, -25 можно разделить на два типа: модули формирования пленочных структур (напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, лазерная абляция, химическое осаждение из газовой фазы, модули плазменных технологий, химической модификации и т. п.), для которых прецизионное позиционирование в плоскости не требуется и необходим интегральный контроль процессов и контроль качества пленочных структур — модули "групповых" технологий, и модули, требующие взаимосовмещения, обеспечивающие возможность быстрого репозиционирования с возможностью обращения к тому или иному элементу или участку поверхности — модули "локальных" технологий (модули сканирующей зондовой микроскопии и литографии, электронной микроскопии и литографии, модули с использованием фокусированных ионных пучков, модули для измерения свойств и характеристик элементов, модули рентгеновской микроскопии, модули проекционного инициированного роста и т. п.).

Транспортная система комплексов базируется на шестипозиционных сверхвысоковакуумных радиальных модулях со встроенными манипуляторами, обеспечивающими захват и перемещение образца из модуля в модуль. В модули встроены системы для вращения и линейного перемещения образцов, обеспечивающие точность репозиционирования образца, закрепленного на специализированном держателе-носителе с точностью до 10 мкм при выносе 1280 мм у НАНОФАБ 100 и 780 мм у НАНОФАБ 25.

Продемонстрированы технологические возможности комплексов и их интеграция с рабочими станциями источников синхротронного излучения ИАЭ им. И. В. Курчатова и Института физических проблем им. Ф. В. Лукина.

В системах фокусировки современных электронно-лучевых приборов первостепенную роль играют магнитные поля. В **докладе группы авторов "Постоянные магниты, применяемые в современных ЭВП СВЧ"** (ФГУП «НПП "Торий"», ФГУП "Спецмагнит" и ОАО "МиМС") проанализирован современный рынок постоянных магнитов.

Учитывая стремление к улучшению массогабаритных характеристик рекомендованы два типа магнитов, удовлетворяющих требованиям современных приборов — магниты на основе редкоземельных металлов (РЗМ) типа Sm—Co и Nd—Fe—В.

Характеристики РЗМ-магнитов различаются как по магнитным параметрам, так и по условиям применения, что необходимо учитывать при проектировании магнитных элементов и систем фокусировки электронных пучков конкретного прибора. Необходимо учитывать следующие характеристики материалов в комплексе.

1. Основные гистерезисные характеристики и их температурно-временную стабильность.

2. Особенности процессов намагничивания и перемагничивания, формы петли гистерезиса, в зависимости от типа магнита и его технологической предыстории.

3. Приемы и особенности "остаривания" магнитов при подготовке к сборке элементов магнитных систем.

4. Электрические, теплофизические и механические параметры материалов магнитов, в том числе их анизотропию.

5. Устойчивость магнитов против коррозии, комплекса экстремальных нагрузок и радиационную стабильность магнитных материалов.

Магнитные системы (МС), обеспечивающие фокусировку электронных пучков ЭВП СВЧ, делят на МС, создающие однородное поле, магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) и магнитные реверсные фокусирующие системы (МРФС).

В современной технике все гораздо многообразнее.

1. МС, создающие однородное магнитное поле, применяются для удержания электронов в пространстве взаимодействия пучка с высокочастотным полем резонаторов в приборах М-типа (наиболее простой случай); в приборах О-типа:

с экранированным катодом для минимизации величины поля;

в случае с частично экранированным катодом; для реализации принципа сопровождения пучка.

2. С другой стороны, усложнение конструкций ЭВП О-типа при реализации гибридных схем фокусировки пучка: комбинация электростатической и магнитной фокусировки или совмещение МПФС

с окончательным однородным участком поля, выдвигает новые требования к магнитам и магнитным системам.

3. В современных клистронах, имеющих до 100 электронных пучков, расположенных концентрически вокруг центральной оси либо группами (от двух до шести) многолучевых ячеек, для фокусировки используются МС с однородным или реверсным магнитным полем. Задачи проектирования таких систем, безусловно, усложняются на порядок.

В докладе на конкретных примерах рассмотрены проблемы и приемы использования РЗМ-магнитов в современных конструкциях ЭВП.

Большая группа докладов посвящена компьютерному моделированию процессов, теоретическим и вычислительным проблемам электронной и ионной оптики: **В. А. Сырового с сотр.** (ВЭИ), **М. А. Монастырского с сотр.** (ИОФ РАН), **Ю. К. Голикова с сотр.** (СПб политехнический университет), **И. Ф. Спивак-Лаврова с сотр.** (Казахстан) и др.

В докладе **В. А. Сырового "Геометризованная теория узких электронных пучков с эллиптическим сечением"** представлена общая теория вихревых релятивистских пучков с пространственной осью и эллиптическим сечением, описываемым четырьмя траекторными функциями продольной координаты. Рассмотрение ведется в неортогональной криволинейной системе ζ, ξ, ψ , связанной с трубками тока $\xi = \text{const}$ и катодом $\zeta = 0$. Ряд Тейлора по ξ дает систему уравнений в частных производных для коэффициентов разложения, зависящих от ζ, ψ . Построено точное решение этой системы, описываемое обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Обсуждается степень произвола в задании геометрии потока и осевого распределения потенциала при фиксированном внешнем магнитном поле, а также зависимость кривизны катода и плотности тока эмиссии от начального угла поворота эллиптического сечения.

В докладах **В. А. Сыровой и Т. М. Сапронова** показана эффективность геометризованных моделей при описании непараксиальных потоков с криволинейных стартовых поверхностей при неоднородном распределении плотности тока в поперечном сечении. Продемонстрирована роль перемаркировки поперечной координаты для повышения точности решения. Приведены примеры, когда использование "наиболее естественной" поперечной координаты в алгоритме может приводить к результатам, не имеющим физического смысла. Показано, что каждому решению уравнений пучка в элементарных функциях соответствует точное решение уравнений асимптотической теории.

В работе **О. Н. Петрович и В. А. Груздева** "Программный комплекс *ELIS* для моделирования плазменных процессов в ЭОС" (Беларусь, Полоцкий университет) предложен алгоритм моделирования плазменных источников электронов с эмиттером большого сечения в нестационарном режиме и алгоритм моделирования плазменных процессов в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда. Указанные алгоритмы были положены в основу программного комплекса *ELIS*.

В цикле работ **И. Ф. Спивак-Лаврова и др.** (Казахстан) исследуется влияние краевых полей на движение заряженных частиц и динамика пучков заряженных частиц в электрических и магнитных полях.

Большой интерес вызвал доклад **В. Д. Саченко** "Проективное соответствие Гауссовых точек оптических систем с поворотной осью" (ELMITEC, Германия), в котором автором выявлено фундаментальное проективное свойство оптически сопряженных осевых точек оптических систем с поворотной осью, названное *биполярно проективным соответствием* (БПС). Показано, что данное свойство присуще любым оптическим системам с поворотной осью, в которых справедливо Ньютоново сопряжение осевых точек, и угол поворота оптической оси отличен от πl (где $n = 0, 1, \dots$). С геометрической точки зрения, концепция БПС обобщает классическую центральную проекцию. Доказано, что особые точки, обеспечивающие БПС сопряженных Гауссовых точек оптической системы с поворотной осью (*оптические полюса*), расположены на прямых, *полярах*, которые проходят через оптические фокусы параллельно сопряженным им оптическим плечам; при этом положения оптических полюсов относительно соответствующих фокусов сопряжены оптическим уравнением Ньютона. Выделены особые (*главные*) оптические полюсы. Показаны однозначность их определения, местоположение и оптический смысл: при таком выборе оптических полюсов *отношение длин полярных радиус-векторов Гауссовых точек равно оптическому увеличению данной оптической системы*. При отсутствии иммерсии оптической системы с поворотной осью главные полюсы расположены на равных расстояниях от соответствующих фокальных точек.

С оптической точки зрения, главные оптические полюса являются аналогом кардинальных узловых точек оптических систем с прямолинейной оптической осью, в которых свойством БПС обладают любые оптически сопряженные внеосевые точки. С практической точки зрения, знание местоположения оптических полюсов масс- или энергоанализаторов заряженных частиц дает сво-

боду в выборе положений источника и детектора заряженных частиц, поскольку, при любом положении объекта на оптической оси, путем БПС мгновенно определяется местоположение его оптического изображения. Показаны возможности решения обратной задачи, а именно, нахождение оптимальной геометрии анализатора, исходя из требуемых аналитических свойств и конструкторских ограничений. Приведены практические примеры расположения оптических полюсов в широко известных вариантах статических масс- и энергоанализаторов заряженных частиц.

В докладе **А. В. Щербакова** "Применение математических моделей для управления процессом электронно-лучевой сварки" (МЭИ) изложены используемые методы моделирования процесса электронно-лучевой сварки, основанные на численном решении дифференциальных уравнений. Результаты моделирования процессов сварки изделий различного типа сопоставлены с экспериментом. Проведенный анализ позволил классифицировать модели процесса электронно-лучевой сварки и определить критерии выбора той или иной модели, обеспечивающие корректность принимаемых допущений применительно к решаемой технологической задаче.

Основные доклады посвящены электронно-лучевым приборам, оборудованию и технологиям, оптике пучков заряженных частиц.

Коллектив авторов из Дубны (ОИЯИ) представил совместный доклад Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории физики высоких энергий под названием "*Сверхпроводящий ЭЦР-источник ионов DECRIIS-SC2*". Основной целью создания источника DECRIIS-SC2 является получение более интенсивных пучков ионов в диапазоне масс тяжелее аргона. Для нагрева ЭЦР-плазмы будет использована микроволновая (14 ГГц) система. С учетом этого факта была спроектирована магнитная система источника, имеющая следующие параметры: минимальное магнитное поле — 0,4 Тл, максимальное магнитное поле в области экстракции и инъекции — 1,4 и 1,9 Тл, соответственно.

Конструкция сверхпроводящей магнитной системы нового источника существенно отличается от предыдущего. Магнитное поле формируется четырьмя обмотками, магнитным ярмом и магнитными пробками.

В докладе представлены основные особенности конструкции и результаты первых стендовых экспериментов по получению пучков ионов аргона.

К. И. Мельник в докладе "*Применение элементарно-статического сканера совместно с квадрупольными системами фокусировки субмикронных ионных зондов*" (Институт прикладной физики НАНУ, г. Сумы) также рассматривает ионные потоки сканирующего микрозонда для новой установки протонно-пучкового экспонирования.

Проведен тщательный анализ возмущений, вносимых электростатическим сканером при его размещении между магнитными квадрупольными линзами фокусирующей системы.

Для компенсации расфокусировки пятна по мере удаления от оптической оси предлагается использовать динамическую перефокусировку линзовой системы. Под перефокусировкой понимается изменение токов квадрупольных линз по определенному закону, чтобы в каждой точке раstra пятно оставалось наименьшим. Глубина фокуса при сканировании, естественно, динамически изменяется. Показано, что перефокусировка помогает контролировать параметры зонда и уширение не будет очень значительным.

В работе **В. И. Переводчикова** с сотр. "Разработка высоковольтного ключевого прибора для применения в энергетике" (ВЭИ) приводятся соображения по выбору путей создания оптимальной электронно-оптической системы (ЭОС) прибора, обеспечивающего коммутацию постоянного тока 30 А при напряжении до 100 кВ. Рассматриваются результаты расчетов многолучевых ЭОС с многофакторной оптимизацией параметров. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями единичного луча многолучевой системы. На основании разработанной ЭОС создана конструкция и изготовлены экспериментальные образцы электронно-лучевых вентилей. Экспериментальные исследования характеристик приборов показали, что на его основе возможно создание ключа преобразователя мощностью 1 МВт при напряжении 35 кВ, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции.

В. М. Белкин, М. А. Завьялов и В. А. Сыровый в докладе "Плоский биполярный диод с релятивистскими электронами" (ВЭИ) подробно исследовали характеристики биполярного диода с релятивистскими электронами и нерелятивистской ионной составляющей, образованной частицами трех видов, а также влияние собственного азимутального и внешнего продольного магнитного поля на адекватность теории одномерных биполярных и униполярных потоков. Оценки основаны на модели периферической частицы, движущейся под действием электрического поля плоского диода, пинчующего собственное и стабилизирующего внешнее магнитные поля. Проведен сравнительный анализ результатов различных авторов. Рассмотрены вопросы актуальности использования биполярных пучков в современных приборах, включая приборы плазменной СВЧ-электроники.

Группа авторов из ФГУП «НИИ "Торий"» представила цикл докладов: "Транспортировка электронных потоков в мощных вакуумных приборах со сложными магнитными полями"; "Рас-

чет предельно-волноводного магнетрона с реверсной магнитной системой"; "Получение предельных импульсных токов эффективных термокатодов" и др.

Доклады, посвященные электронно-оптическим преобразователям, были представлены в основном из НПО "Геофизика-НВ" Москва, ИОФ РАН и ВТЦ "Баспик" Владикавказ.

В докладе **О. В. Чистова** и др. "Система защиты приборов ночного видения на основе ЭОП от световых помех" рассмотрен макет системы защиты приборов ночного видения от световых помех на основе матрицы микрозеркал (DMD-панели) и приведены результаты его испытаний, подтвердившие работоспособность такой системы. Основной сложностью при создании такой системы является создание алгоритма, управляющего DMD-панелью.

В сообщении **А. А. Матышева** "Изотракторный протонный микроскоп" (СПб политехнический университет) показано, что для изотракторного протонного микроскопа (ИПМ) характерно, с одной стороны, высокая контрастность, как у низковольтного растрового электронного микроскопа, а с другой — пространственное разрешение ИПМ формируется, как в высоковольтном электронном микроскопе просвечивающего типа и как компромисс между дифракцией и аберрациями ионно-оптического тракта.

Таким образом, ИПМ концентрирует в себе основные достоинства низковольтности и контрастности с хорошим пространственным разрешением. Кроме этого, благодаря иному механизму взаимодействия низковольтных протонов с поверхностями твердых тел, вероятно обнаружение новых эффектов, связанных с перезарядкой протонов вплоть до образования отрицательно заряженных ионов водорода.

В каком-то смысле как иллюстрацию к докладу **В. А. Быкова** можно рассматривать группу докладов от ФГУП «НПО "Орион"», а именно, "Ионное травление в технологии формирования индиевых микроконтактов"; "Ионно-плазменные процессы для наноразмерной обработки поверхности в технологии микрофотоэлектронных устройств"; «Исследование многослойных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на электронно-ионном растровом микроскопе "Quanta 3D FEG"»; «Высокочастотное катодное травление и магнетронное распыление для создания антиотражающих покрытий в "флип-чип"-технологии матричных фотоприемников» и др. Эти работы ярко демонстрируют основной принцип современного полупроводникового приборостроения — тесное переплетение чисто полупроводниковых и электронно-лучевых технологий.

Заключение

Обзор докладов прошедшего семинара показал увеличение их числа по электронно-лучевым приборам, высокий уровень результатов ведущих фирм, в результате чего можно утверждать, что представленные доклады охватывают значительный круг проблем, стоящих перед этой важной и интересной отраслью науки и техники.

Более полное представление о докладах семинара можно получить из сборника тезисов докладов [1], а также на основе целой серии статей, подготовленных по материалам семинара и рекомендованных Программным комитетом к публикации в журнале "Прикладная физика" (в том числе в данном выпуске журнала).

Problems of the theoretical and applied optics for electrons and ions

A. I. Dirochka, A. M. Filachev

Orion Research-and-Production Association,
9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Made is the analysis of themes and reports of the Tenth All-Russian seminar on problems of theoretical and applied optics for electrons and ions, which took place May 24—26, 2011 in Moscow.

PACS: 41.75.-i, 41.85.-p

Keywords: movement of the charge particle, electron, ion, optics, electric and magnetic fields.

Bibliography — 0 references.

Received September 22, 2011