

УДК 537.533

**Электронная и ионная оптика
и электронно- и ионно-лучевое
оборудование в государственном
институте электронной и ионной оптики
(к 25-летию)**

Б. Н. Васичев

НТЦ Государственного института электронной и ионной оптики (ГП НИИЭИО), Москва, Россия

А. М. Филачев

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,
Москва, Россия

*Дан обзор научно-производственной деятельности института в области
электронной и ионной оптики и созданного технологического оборудования.*

Государственному предприятию «Научно-исследовательский институт
электронной и ионной оптики» (ГП «НИИЭИО») исполнилось 25 лет.

В конце 1973 г. постановлением Правительства СССР в Москве был организован НИИ «Орион» — Институт электронной и ионной оптики

(НИИЭИО). Институт создан на базе некоторых отделов НИИ прикладной физики (Москва) с привлечением ведущих специалистов Москвы. За прошедшие годы в ГП "НИИЭИО" сформировалась самостоятельная научная школа, признанная не только в России и странах СНГ, но и во всем мире. В его становлении принимали активное участие директора НИИ И. В. Птицын и проф. А. М. Филачев, такие ведущие ученые, как проф. А. Н. Кабанов, Б. Н. Васичев, П. А. Стоянов, а также кандидаты наук Г. В. Дер-Шварц, Д. В. Фетисов, А. А. Кафафов, С. А. Дицман, А. П. Бдуленко, Е. П. Бочаров, Б. И. Почтарев, Л. Б. Розенфельд, И. С. Макарова, И. С. Гайдукова, Т. А. Гришина, В. В. Мосеев, Н. М. Мосеева и многие другие. Все они внесли большой вклад в дело становления и развития института, его научных и прикладных направлений, вырастили целое поколение молодых ученых и последователей.

Электронная и ионная оптика — одно из важных направлений науки и техники, имеющее большое народно-хозяйственное значение. Институт (ГП "НИИЭИО") всегда был ведущим предприятием в области электронной и ионной оптики России. Он был и остается единственным научно-исследовательским институтом в данной области знаний и техники в СССР и России. Его роль заключается в проведении фундаментальных и прикладных научных исследований в области электронной и ионной оптики, в разработке теоретических основ электронной и ионной оптики и их реализации в разрабатываемом оборудовании и приборах, в разработке технологий и методик исследования различных объектов, в научно-методическом руководстве предприятиями, осуществляющими серийное производство электронно-лучевого и ионно-плазменного оборудования, в том числе электронных микроскопов, в научно-методическом руководстве предприятиями и фирмами, использующими это оборудование, а также в подготовке научных и инженерных кадров в этой области знания (рисунк), для чего при институте организована базовая кафедра от Московского института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), а в ряде вузов Москвы ведут преподавание ведущие ученые института по данной специализации.

Мы не будем следовать хронологии событий или останавливать Ваше внимание на достижениях отдельных ученых, так как об этом написано в книге, посвященной 25-летию института и отражено в периодической печати. Мы коснемся лишь некоторых научных и прикладных достижений института за истекший период.

В данной статье невозможно перечислить все работы, выполненные в институте, поэтому мы остановимся лишь на тех, которые в большей мере отражают направления теоретических и практических работ.

Фундаментальные исследования

Электронная и ионная оптика (или оптика заряженных частиц) представляет собой раздел физики, изучающий взаимодействие элементарных зарядов как между собой, так и с полями, порождаемыми этими зарядами, а также эмиссию заряженных частиц, включая автоэмиссию, фотоэмиссию и экзотическую эмиссию, природу элементарных зарядов, включая их дуализм, процессы формирования электрических и магнитных полей с заданными свойствами с помощью элементарных зарядов, волновые свойства электронных пучков и нелинейные процессы в них, в том числе когерентные свойства волновых полей ускоренных пучков заряженных частиц, процессы формирования и управления пространственной информацией, переносимой электронно-лучевыми волновыми полями, в том числе голографию, процессы взаимодействия быстрых элементарных зарядов и многозарядных ионов со связанными

в атоме элементарными зарядами, в том числе процессы проплавления, стекания зарядов с поверхности диэлектриков, электронно-стимулированное аномальное легирование чужеродными атомами, процессы, протекающие на поверхности твердого тела и теорию расшифровки спектров вторичных излучений, теорию формирования изображений и теорию контраста изображений, разрешающую способность электронной и ионной оптики в просвечивающем и растровом режимах работы электронно- и ионно-оптических устройств, дифракцию и интерференцию элементарных зарядов, теорию интерпретации изображений в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) и растровом электронном микроскопе (РЭМ), используя частотно-контрастные характеристики, процессы формирования плазмы и изучение ее свойств и т. д. Это довольно обширный круг теоретических и экспериментальных вопросов электронной и ионной оптики, для своего разрешения требующий высококвалифицированных специалистов и первоклассной экспериментальной базы. Коллектив института успешно справляется с этими задачами в период строительства института, и сегодня продолжает их решать.



Функциональная схема основных направлений работ в ИП "НИИЭИО"

Моделирование и поиск оптимальных физических электронно-оптических моделей

Моделирование и оптимизация по различным критериям физических моделей электронно-оптических элементов и устройств позволили создать конкурентоспособные электронно-лучевые системы. К этим системам относятся различные по назначению и характеристикам (плотности потока заряженных частиц, ускоряющему напряжению, первеансу и т. д.) электронные и ионные пушки, электронные линзы высокого разрешения, включая линзы специального назначения, например, для аналитических устройств, высокоэффективные системы отклонения пучков, стигматоры и устройства динамической коррекции аберраций.

Многие из них нашли свое применение в электронных микроскопах высокого разрешения, аналитическом оборудовании, растровых и фотоэмиссионных микроскопах, в различных установках технологического назначения, включая оборудование для прецизионной электронной литографии высокого разрешения и производительности и т. д.

В ГП "НИИЭИО" постоянно велась работа не только по изучению физических моделей электронно-оптических систем (ЭОС), но и разработке алгоритмов и программ для численного моделирования и расчету электронно-оптических элементов просвечивающих и растровых электронных микроскопов и установок электронной литографии и других технологических установок. Методы моделирования и программы постоянно совершенствовались. Многие из этих работ выполнялись совместно с учеными из Сибирского отделения Академии наук Российской Федерации (СОАН РФ), Москвы и Санкт-Петербурга. Были созданы и внедрены в практику пакеты прикладных программ "Эстамп", "Рамзес", "Лаплас-1", "Лаплас-2", COMBI и др.

Одной из последних совместных работ с московскими учеными явилось математическое моделирование современных электронно-лучевых электронно-зондовых технологических установок, предназначенных для прецизионной обработки различных материалов электронным пучком высокой интенсивности, которая предполагает "сквозной просчет" ЭОС с учетом всех ее элементов, включая термоэмиссию, электронную пушку, электромагнитную фокусирующую и отклоняющую системы. Разработан новый пакет прикладных программ CHARGE для персональных ЭВМ типа IBM [1].

Эта работа явилась логическим продолжением ранее начатых работ под руководством Г. В. Дер-Шварца и его учеников, позволившая использовать персональные ЭВМ.

Для моделирования ЭОС обычно используются хорошо развитые традиционные методы расчета электронно-оптических параметров прецизионных электронно-оптических систем, основанные на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих траекторию движения заряженной частицы в наложенных электрических и магнитных полях в цилиндрической системе координат. Этот подход, безусловно, корректен и эффективен при расчете оптики приборов с малыми углами наклона траекторий к оси, малыми расстояниями траекторий от оси, большими начальными скоростями заряженных частиц, а также при расчете приборов с относительно низкой разрешающей способностью.

Однако если перечисленные условия не выполняются, использование традиционных методов может оказаться некорректным или невозможным. Это вызвано прежде всего тем, что область сходимости ряда Буша, на котором

основываются представления распределения электронного (или скалярного магнитного) потенциала в приосевой области осесимметричного поля, неизвестна, и поэтому невозможно оценить, на каком расстоянии от оси этим представлением пользоваться уже нельзя. Кроме того, традиционные методы непригодны для расчета траекторий численными методами при скорости частиц, равных или близких к нулю. А такие задачи возникают при расчете иммерсионных объектов, электронных зеркал, при расчете оптики проекционных и зондовых электронных литографов с большим полем экспонирования, электронных тестеров для контроля микросхем и во многих других случаях.

В связи с этим сотрудниками института был разработан метод (и алгоритм) расчета непараксиальных траекторий в широкоугольных и иммерсионных электронно- и ионно-оптических системах, содержащих электрические и магнитные поля [2].

Метод основан на аппроксимации распределения скалярного потенциала на рабочем участке поля отрезком ряда с оптимальным выбором узлов и использованием полиномов Чебышева. Метод проверен на контрольных задачах и в эксперименте и позволил проводить моделирование широкоугольных ЭОС с высокой точностью.

Для реализации метода разработан пакет программ [3] WIDE-ANGLE OPTICS, позволяющий провести расчет с высокой точностью в декартовой системе координат параксиальных и непараксиальных траекторий заряженных частиц, движущихся в комбинированных полях, включающих в себя осесимметричные, мультипольные и несимметричные электрические и магнитные поля, а также для расчета оптических характеристик 1-го порядка aberrаций указанных систем. Допускается наличие скрещенных электрических и магнитных полей, а также (при произвольных значениях) угла наклона траектории к оси (включая 90°) и произвольные значения скорости частицы (включая случай нулевой начальной или промежуточной скорости). Это позволяет использовать пакет программ при расчете как традиционных систем, так и траекторий в прикатодной области, расчете иммерсионных систем (включая зеркала), широкоугольных систем с большим полем зрения. Точность расчетов зависит только от точности задания полей в приосевой области и на большом удалении от оси.

Полученный программный продукт был использован для широкого круга задач, связанных с проектированием различных электронно- и ионно-оптических систем установок технологического (в том числе литографического) и аналитического назначения (включая фотоэмиссионную установку для контроля за технологическими процессами в микрофотоэлектронике).

Управление пространственной информацией, переносимой волновыми полями электронного пучка

При разработке теории волновых полей необходимо прежде всего иметь правильное представление об элементарных волнах, представляющих заряженные частицы и формирующих плоскую волну пучка. Для описания элементарных заряженных частиц была выбрана волновая функция, которая в полной мере соответствует их физическим свойствам. Эта функция представляет собой геометризованное представление электромагнитного гиротропного солитона [5]. С ее помощью удается объяснить многие физические явления, которые в квантовой физике не объясняются, а постулируются, что затрудняет понимание физической сущности многих явлений и, в частности, связанных с электронной оптикой или оптикой заряженных частиц.

Проанализированы образование такой волны и ее поведение. При анализе движения фронта такой волны были найдены зависимости направления распространения ее от величины диэлектрической проницаемости, зависящей от напряженности поля. Эти взаимодействия относятся к разделау нелинейной физики.

Анализ взаимодействия полей позволил вывести закономерности ускорения заряженных частиц, условия возникновения когерентности пучка электронов, условия фокусировки и отклонения пучка электронов, эффект Бёрша и т. д. Такой подход к описанию элементарных заряженных частиц позволил создать теорию управления пространственной информацией (амплитудой и фазой), переносимой волновыми полями электронного пучка, и на ее базе — методы управления частотно-контрастными характеристиками ЭОС, организовать синтез полей, переносящих заданную пространственную информацию, изучить влияние квантования (дискретности) при фурье-преобразовании электронно-лучевых волновых полей, выполнить синтез неоднородных волновых полей и их фильтрацию с помощью управляемых (синтезируемых) транспорантов и фильтров [4, 5].

Синтез аксиально-симметричных полей

Известно, что аксиально-симметричное поле можно синтезировать, используя неаксиально-симметричные поля. Это позволяет управлять положением оптической оси в пространстве. Получены аналитические выражения для расчетов токов и напряжений, обеспечивающих формирование аксиально-симметричных синтезированных полей с переменной оптической осью. Разработаны конструкции электронно-оптических элементов. Изменением величин токов в обмотках корректирующих элементов изменяют положения в пространстве оптической оси ЭОС. Подобные соотношения получены для электронных линз с подвижной и криволинейной оптическими осями. Выполнен абберационный анализ конкретных ЭОС.

Таким образом, решена проблема формирования подвижных осесимметричных полей, позволившая, в частности, решить задачу формирования осесимметричного фокусирующего поля в окрестности подвижной оптической оси электронной линзы с синтезированным магнитным полем.

Эта проблема решена путем создания достаточно точной математической модели, связывающей конструктивные параметры основной электронной линзы, например магнитной, положение и форму подвижной оси симметрии поля, конструктивные параметры и режимы возбуждения корректоров, создающих осевую симметрию поля.

Задачи синтеза сведены к решению некорректной задачи интегрального уравнения первого рода, связывающего заданное распределение поля и искомое распределение токов возбуждения в обмотках мультиполей. Решение обратных задач в такой постановке можно считать доказательством возможности или невозможности реализации конструктивного элемента ЭОС с заданными свойствами.

Электронные линзы с синтезированными полями открывают возможность реализации нового класса электронно-зондового технологического и контрольно-аналитического оборудования, позволяющего проводить исследования или обработку электронным пучком на неплоских поверхностях с глубоким рельефом [6, 7].

Теория формирования контраста изображения электронным пучком при взаимодействии с кристаллической решеткой образца

Для успешной интерпретации результатов электронно-микроскопических и электронно-графических исследований кристаллической решетки твердых

тел необходимо такое описание дифракционного взаимодействия электронной волны с кристаллической решеткой, в котором амплитуды и фазы электронной волны, испытывавшие дифракционное взаимодействие с полем кристаллической решетки и выходящей из кристалла, были бы представлены в виде функций параметров решетки, толщины кристалла и значений ориентации решетки по отношению к направлениям падения первичного пучка электронов и выхода диафрагмированной волны из кристалла.

Для такого описания в разное время различными авторами были разработаны теоретические подходы, однако в ряде случаев они не могут удовлетворить исследователей твердых тел.

В процессе разработки электронно-оптической формулировки предложена интерпретация разложения экспоненты $\exp [2\pi i g(hkl) r]$ на синусоидальную и косинусоидальную составляющие, принципиально отличающаяся от интерпретации, принятой в динамических аппроксимациях, оперирующих блоховскими волновыми функциями. После такой операции были проведены исследования [8].

В результате получено строгое аналитическое решение задачи о дифракционном взаимодействии электронов с кристаллической решеткой в дарвиновском представлении. С помощью этого решения удалось выявить физическую сущность эффектов аномальной абсорбции и других динамических дифракционных эффектов, не прибегая к феноменологическим приемам. Предложена новая трактовка амплитудно-фазового дуализма в дифракционном взаимодействии электронов с полем кристаллической решетки.

Анализ распределения энергии в электрических и магнитных полях ЭОС

При анализе взаимодействия аксиально-симметричного или иного поля с электронами, двигающимися с некоторой скоростью, обычно пользуются инерциальной системой координат. Однако для оценки влияния распределения энергии в импульсе поля и анализа взаимодействия этого поля с электроном пучка удобнее пользоваться иной системой координат — помещенной на ускоренном электроне. Новая система координат позволяет рассматривать поле (магнитное или электрическое) в зазоре электронной линзы или отклоняющей системы как магнитный или электрический импульс [9].

Длительность такого импульса определяется величиной рабочего зазора электродов, скоростью и ускорением электрона или иона, т. е. существует связь линейных и временных характеристик поля, и параметрами движения заряженной частицы. Налетающий электрон воспринимает изменение напряженности поля как импульс этого поля, который может быть динамической характеристикой этого поля и представленным как количество движения, которым обладает поле в данном объеме.

Такой подход очень важен для понимания взаимодействия заряженных частиц с импульсом поля. Тела, помещенные в это поле, испытывают действие механических сил, которое связано с поглощением энергии поля или изменением направления движения.

Известно, что импульс поля обладает импульсом движения. Определен спектральный состав "импульсных" полей. Изучено распределение энергии в "импульсных" полях, используемых в современных электронно-оптических устройствах и оборудовании. Показано влияние распределения энергии "импульсных" полей на эффективность электронной оптики, так как оно в большей мере влияет на эффективность взаимодействия полей элементарной частицы и полей, генерируемых электродами.

Теория аномального удаления заряда с поверхности диэлектрика при обработке электронным пучком

При взаимодействии электронного пучка с поверхностью диэлектрика на ней скапливается заряд, который влияет на качество технологического процесса. Выбрав правильный режим обработки, возможно избежать этого отрицательного эффекта. Рассмотрены физические процессы, имеющие место при электронно-лучевой обработке поверхности диэлектрических материалов, в частности, экспериментально исследованы механизмы стекания внесенного пучком электрического заряда величиной порядка $1 \cdot 10^{11}$ электронов или $1 \cdot 10^{-8}$ Кл. Обнаружено, что обработка поверхности ряда таких диэлектриков с удельным сопротивлением порядка $1 \cdot 10^{12}$ Ом·см (например, стекло) сопровождается аномально высокой электронной эмиссией, которая приводит к быстрому исчезновению внесенного заряда. Время диэлектрической релаксации составляет $\epsilon_r/4\pi \approx 0,3$ с. Показано, что данный эффект не может быть обусловлен вторичной эмиссией электронов [10, 11].

Теория аномального электронно-стимулированного легирования материалов чужеродными атомами

Разработана теория аномального электронно-стимулированного легирования материалов чужеродными атомами [12], связанного со спин-спиновыми взаимодействиями электронов атома и электронов релятивистского пучка. Потери энергии электронами пучка в основном связывают с ионизацией налетающими электронами атомов вещества. Считают, что только в этом случае могут протекать радиационно-стимулированные реакции. Однако существуют и другие скрытые от прямого наблюдения экспериментатора физические эффекты. На самом деле, большую часть энергии электроны пучка расходуют на возбуждение, а не на удаление электронных оболочек атома. Эти эффекты связаны с изменением траекторий (в основном валентных) электронов атома, вызываемым изменением ориентации спинов этих электронов.

Налетая, атомы пучка изменяют поле решетки и поле вблизи атомов, еще больше нарушая их асимметрию. Возможны два вида воздействия налетающего электрона на электроны атома в рамках классического и привычного нам рассеяния свободного электрона на электронах атома: взаимодействие магнитных моментов электронов и взаимодействие электрических полей, т. е. в более привычной терминологии, зарядов.

Если происходит взаимодействие магнитных моментов электронов пучка и валентного электрона (время такого взаимодействия измеряется фемтосекундами), то электрон атома, получив дополнительный к имеющемуся импульс, может не только изменить орбиту, но и начинает процессировать, что влечет за собой еще большее изменение основной траектории вокруг ядра (ядер в молекуле).

В возбужденных таким образом атомах могут образовываться новые или изменяться имеющиеся межатомные связи. Вместе с ионизацией отдельных атомов и групп эти явления приводят к радиационным дефектам, наблюдаемым в эксперименте.

Проникновение одних атомов сквозь решетку других можно объяснить с позиций аномальной связи в молекулах таких атомов, которая имеет ярко выраженный дипольный момент. Под действием электронного "ветра" диполь разворачивается, и при новой "ионизации" один из атомов отделяется и двигается почти вдоль направления "ветра" до новой встречи. После этого структура решетки временно восстанавливается.

Из теории нелинейной физики известно, что среди неравновесных диссипативных сред, склонных к самоорганизации — созданию структур, в природе чаще других встречаются так называемые возбудимые среды (они известны, в частности, в биологии и химии), к ним следует отнести и находящиеся в возбуждении искусственно. По сравнению с обычными волновыми средами они обладают одной принципиальной особенностью — образующие их элементы могут находиться лишь в нескольких качественно различных состояниях. Это могут быть, в частности, состояния “возбуждения” и “восстановления” — “стационарном”. Связь же между этими элементами (как правило, диссипативная) делает возможным переход данного элемента среды под действием возмущения, передаваемого от соседнего или внешнего элемента, из одного (начального) состояния в другое.

Действие магнитного поля пучка на стационарные системы через переориентацию спинов электронов приводит лишь к деформации так называемой трехмерной сетки из молекул, соединенных в этом случае растянутыми, изогнутыми и частично разорванными, например водородными или другими подобными связями. Система, характеризующаяся статистической закономерностью межмолекулярных расстояний и ориентаций, перестраивается, нарушая установившийся порядок. Это обуславливает возможность возникновения и исчезновения долгоживущих микрообластей, так называемых “пульсирующих групп”. Их появление и распад не связаны со значительными энергетическими изменениями: Известно, что энергия, необходимая для изгиба водородных связей (изменение угла между линией, соединяющей центры ближайших молекул, и направлением связи) одной из этих групп (молекул), много меньше энергии их разрыва (для разрыва водородной связи молекулы необходимо затратить энергию порядка 16,7–25,1 кДж/моль). Известно, что одновременная деформация угла и длины связи молекул энергетически более выгодна, чем деформация только угла или только длины связи.

Таким образом, изменение структуры конденсирования системы возможно при затрате энергии, намного меньшей энергии водородных и подобных им связей.

Прикладные исследования

При реализации полученных теоретических и экспериментальных результатов необходимо выполнить еще массу прикладных исследований и опытно-конструкторских работ, заканчивающихся, как правило, созданием нового электронно- и ионно-лучевого и ионно-плазменного оборудования, включая электронные микроскопы или аналитические установки различного класса и назначения. За последние 25 лет в ГП “НИИЭИО” выполнен большой объем научных и опытно-конструкторских работ. Среди них можно выделить следующие:

исследование электронной оптики: электронно-оптических преобразователей (приборов ночного видения) в целях их оптимизации по тем или иным показателям качества, фотоэмиссионных микроскопов и установок, просвечивающих электронных микроскопов низкого, высокого и сверхвысокого ускоряющего напряжения, растровых электронных микроскопов, в том числе контрольно-измерительного и аналитического оборудования на их основе, оборудования для электронной литографии;

исследование трактов СВЧ-ускорения сфокусированных электронных пучков;

исследования в области катодной электроники;

исследования в области электронной и рентгеновской спектроскопии;

исследование систем: автоматизированной обработки изображений и расшифровки спектров, формирования стерео-, псевдоголографических и цветowych изображений в РЭМ, осуществляющих контроль параметров электронного и ионного пучков, механизмов точной механики, работающих в вакууме, и вакуумных вводов движения, автоматического управления электронно- и ионно-оптическими системами;

исследование и разработка ионно-плазменной технологии и оборудования; разработка методик исследования различных материалов и изделий, включая методы рентгеноспектрального микроанализа и метрологию определения физических свойств исследуемых объектов.

Каждое из представленных направлений можно разбить на составные научные исследования. Ряд из этих исследований имеет большое самостоятельное значение. Результаты этих работ использованы при создании оборудования, отвечающего современному уровню науки и техники. Каждая из единиц оборудования является сложным комплексом, так как электронно-ионно-лучевое и ионно-плазменное оборудование может быть создано только при комплексном подходе к проблеме.

Разработка электронно-лучевого, ионно-лучевого и ионно-плазменного оборудования

Электронные микроскопы и аналитическое оборудование

Коллектив ГП “НИИЭИО” традиционно осуществлял разработку просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ), позволяющих исследовать образцы в виде тонких пленок или реплики. Основная доля отечественных ПЭМ создана коллективом ГП “НИИЭИО” и Сумским заводом электронных микроскопов (СЗЭМ) (Украина).

Одна из последних разработок ГП “НИИЭИО” — просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ) различного назначения с разрешающей способностью до 0,2—0,12 нм и с ускоряющим напряжением до 75, 100, 200 и 2000 кВ. Среди них: ЭВМ-100Л, ЭВМ-125, ПЭМ-200, ПЭМ-75, СВЭМ-1 с увеличением изображения от 45 до 1 000 000 крат. Эти разработки стали возможны благодаря созданию ряда новых электронно-оптических узлов и систем [13].

Наряду с ПЭМ, в ГП “НИИЭИО” постоянно велись разработка и совершенствование аналитических просвечивающих электронных микроскопов типа ЭММА [14]. Создан параметрический ряд подобных микроскопов-микроанализаторов, которые долгие годы серийно изготавливались Сумским заводом электронных микроскопов. Конструкция этих микроскопов позволила с высокой точностью определять элементный состав в локальных точках исследуемого объекта, добиться наибольшей локальности и чувствительности элементного анализа исследуемого объекта (до 10^{-9} %) при сохранении традиционного для просвечивающих электронных микроскопов разрешающей способности, а следовательно, прицельности анализа до 0,2 нм [15].

Созданы аналитические электронные микроскопы, снабженные спектрометром электронов (сначала это был электростатический спектрометр, а позже магнитный), позволяющим исследовать образцы по спектрам характеристических потерь энергий электронов, проходящих через образец с высокой разрешающей способностью.

Одна из последних разработок — аналитический электронный микроскоп типа ЭММА, отличающийся от известных тем, что его ЭОС способна фор-

мировать электронный пучок с изменяемой формой и размерами сечения пучка, равномерным распределением плотности тока по сечению пучка. Это дало возможность значительно повысить достоверность микроанализа тонких пленок и экстракционных реплик. Аналогов за рубежом пока нет.

Наряду с ПЭМ и ЭММА, разрабатываются и растровые электронные микроскопы различного функционального назначения для исследования поверхности материалов. Результаты научных исследований передавались на Сумской завод электронных микроскопов и запускались в серийное производство. Там совместно с работниками ГП "НИИЭИО" были выпущены РЭМ-100, РЭМ-200.

Один из первых растровых электронных микроскопов ГП "НИИЭИО" общенаучного и промышленного назначения был многофункциональный

РЭМ-100-75 с разрешающей способностью 75 \AA . Последняя разработка —

РЭМ-50 — имеет разрешающую способность 50 \AA . Все микроскопы оснащались рентгеновскими спектрометрами и другими аналитическими приставками и приспособлениями, необходимыми при исследовании поверхности твердых тел.

Создано устройство для объективной оценки микрорельефа объекта (изломов стали) по их изображениям в РЭМ [16], и разработан метод количественной оценки морфологии объекта [17].

Рентгеновские микроанализаторы "Спрут-1" и "Спрут-2" отличаются от известных тем, что ЭОС способна формировать электронный пучок с изменяемой формой и размерами сечения пучка, равномерным распределением плотности тока по сечению пучка, изотропной разверткой пучка, высокоэффективными системами регистрации рентгеновского излучения, обеспечивающими микроанализ гетерогенных образцов, в том числе и на границе гетерогенных образований. Установка снабжена как парносимметричными блоками из полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, так и светосильными спектрометрами с кристалл-анализаторами, что позволяет обеспечить элементный анализ от Na до U. Ускоряющее напряжение может изменяться в пределах 0,5—30 кВ. Размер анализируемого образца составляет 100 мм. Азимутальный угол анализа можно менять от 0 до 360° , а полярный угол — от 22° до 48° . Имеется возможность как охлаждать, так и нагревать образцы до температур от 85 до 500 К. Абсолютная чувствительность элементного анализа на тонких пленках составляет 10^{-17} г. Минимальная возможная погрешность анализа — 0,5—0,8 %.

Устройства снабжены предметным столиком, работающим в диапазоне температур 80—500 К, СВЧ-резонатором (частота $(4\pm 9)\cdot 10^9$ Гц), обеспечивающим измерение проводимости и времени жизни носителей тока, ионно-плазменным источником для препарирования и очистки исследуемого образца, устройством для катодOLUMИнесценции исследуемого образца. Энергию электронов можно изменять от 0,5 до 50 кэВ; размер сечения электронного зонда — в пределах 5÷5000 нм. Аналогов за рубежом также пока нет.

Разработан метод количественного элементного микроанализа тонких свободных пленок и гетерофазных объектов [14, 18].

Электронно-лучевое оборудование для контроля за технологическими процессами

Контроль за результатами технологических процессов можно осуществлять, используя аппаратуру, предназначенную для научных исследований. Так в большинстве случаев и поступали долгие годы. Однако это не позволяло осуществлять контроль в полной мере, кроме того, аппаратура для научных исследований, как правило, требует разрушения объекта исследования. Для решения этой проблемы стали разрабатывать специализированную аппаратуру, приспособленную для контроля в процессе производства.

Электронная фотоэмиссия и экзоэмиссия позволяют контролировать основные интегральные и локальные свойства поверхности материалов и изделий полупроводниковой техники, а также визуализировать изменения, происходящие на поверхности при различных технологических операциях.

Этот метод исследования и контроля за состоянием поверхности является неразрушающим и неповреждающим в отличие от многих электронно-лучевых методов. Существующие электронные фотоэмиссионные микроскопы не позволяют проводить контроль поверхности больших размеров, так как обладают недостаточной величиной поля зрения.

Методом численного эксперимента проведен анализ влияния наложения аксиально-симметричных электрических и магнитных полей на аберрации иммерсионного объектива. Разработан иммерсионный объектив с оптимизированной конфигурацией электронов и магнитопровода, учитывающих эффективное освещение объекта УФ-излучением в широком телесном угле и обеспечение контроля поверхностей большого размера (до 45×45 мм). Шлюзовое устройство на два объекта позволяет быстро заменять их при контроле за качеством технологических процессов.

Создана установка для контроля чистоты, структуры и внутренних напряжений и различного рода скрытых дефектов в полупроводниковых пластинах и изделиях микроэлектроники, способная обеспечить контроль за качеством технологических процессов [19, 20]. Она обладает высокой чувствительностью к малым скоплениям чужеродных атомов на поверхности (0,5 монослоя) и

высокой разрешающей способностью по глубине ($3-5 \text{ \AA}$).

Создана также установка для диагностики отказов изделий микроэлектроники методом наведенного тока (МНТ) и получения качественной и количественной информации об их электрофизических характеристиках [21].

Наличие в материале дефектов структуры или дефектов, связанных с примесями, может привести к изменению основных характеристик микроэлектронных приборов. Поэтому своевременное обнаружение и диагностика дефектов являются актуальной задачей современного производства изделий микрофотоэлектроники.

Одним из приложений МНТ в растровой электронной микроскопии являются контроль и отбраковка несовершенных и содержащих микропримеси полупроводниковых материалов. Различные термические и механические технологические процессы также приводят к нежелательному возникновению дефектов и выделению примесей в обрабатываемом материале. Метод наведенного тока позволяет исследовать и кристаллографические дефекты в полупроводниковых структурах; наблюдать $p-n$ -переходы, области пространственного заряда; выявлять электрически-активные дефекты; проводить измерения таких характеристик, как диффузионная длина и время жизни

неосновных носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации и других в локальных областях, определяемых размерами электронного зонда.

Контраст на изображении формируют дефекты, влияющие на время жизни носителей, а также действующие как локальные центры рекомбинации или генерации. Контраст, связанный с генерацией или умножением носителей заряда, возникает в результате возникновений в окрестности некоторых дефектов сильных электрических полей. Локальное повышение напряженности электрического поля может быть обусловлено, например, зарождением выделенных примесей на кристаллографических дефектах, непланарностью перехода и т. д.

Слабый электронный пучок генерирует в полупроводнике избыточные носители заряда. Если в образце создать "собирающее" поле, например сформировать $p-n$ -переход или барьер Шотки (контакт металл — полупроводник), то носители заряда будут диффундировать в обедненную область этого поля и вызывать электрический ток во внешней цепи. Сигнал этого наведенного тока в растровом режиме используется в качестве видеосигнала для формирования изображения на экране ЭЛТ. Изображение, сформированное на экране, отражает пространственное изменение эффективности собирания носителей заряда, т. е. возникает "электрическое" изображение участка образца — изображение в "наведенном токе".

Установка имеет следующие технические характеристики: увеличение — до 100 000 крат; локальность обнаружения дефектов — до 0,8 нм; ускоряющее напряжение — 25 кВ, ток электронного пучка — $1 \div 10^{-8}$ А.

Электронно-зондовая установка типа УКЛ предназначена для контроля качества катодолминофоров и экранов [22]. Она позволяет с высокой локальностью (до 10 нм) определять однородность свечения, разрешающую способность, светоотдачу, временные характеристики и т. д., что не под силу оптическим методам. Установка незаменима в производстве электронно-оптических преобразователей и других приборов.

С уменьшением размеров элементов топологии изделий микроэлектроники до 0,5—0,3 мкм (а по прогнозам эти размеры будут неуклонно уменьшаться) возникла необходимость в создании надежных средств их измерения. Такая аппаратура дает возможность контролировать точность процесса экспонирования, проявления электронорезиста и травления подложки при микролитографии. В этой связи были созданы измерительные растровые электронные микроскопы РЭМ-И [23].

Конструкция РЭМ-И представляет собой модуль, содержащий электронно-оптическую систему, формирующую электронный зонд диаметром до 5 нм, технологическую камеру, в которой размещены координатный стол с автоматическим электроприводом и лазерным интерферометром, контролирующим перемещение стола по двум координатам. Стол закреплен на штанге и не имеет опор внутри вакуумной камеры, чем обеспечивается исключение привносимой дефектности контролируемых изделий. Регистрация вторичных электронов осуществляется сцинтилляционными парносимметричными детекторами, а регистрация отраженных электронов — полупроводниковыми. Управление и регистрация измерений осуществляются с помощью ЭВМ.

Основные технические характеристики РЭМ-И: разрешающая способность в течение 8 ч — 10 нм; диапазон измеряемых величин линейных размеров 150 мм — 0,5 мкм; максимальный размер контролируемого изделия (стеклянный шаблон или кремниевая пластина) — 150×150 мм; погрешность измерения: в диапазоне 0,1—100 мкм — 0,02 мкм, в диапазоне 150—100 мкм —

0,1 мкм. Установка снабжена вакуумным автоматическим шлюзовым устройством с магазином на 10 изделий.

Растровый электронный микроскоп РЭМ-ИММАШ предназначен для исследования материалов и образцов в процессе их механических и термических испытаний. Разрешающая способность его 0,08 мкм. Максимальная достижимая нагрузка, прикладываемая к стандартному образцу с помощью установки ИММАШ, — 500 кг; максимальная температура испытуемого образца 1100 °С.

Технологическое оборудование для микросварки и размерной обработки

Одна из первых электронно-лучевых установок — ЭЛУРО, предназначенная для размерной обработки, создана А. Н. Кабановым. На ее базе создавались и другие устройства. Развита методика гравировки рисунков большой площади и изготовления высокохудожественных изделий.

Вскоре после организации НИИ была создана установка ЭЛУМС-25/0,5 для сварки тонкостенных сосудов и микросварки при изготовлении изделий микрофотоэлектроники [24]. Параметры установки следующие: мощность пучка 0,5 кВт; ускоряющее напряжение 25 кВ; рабочий вакуум в технологической камере 1,33·10 Па; толщина свариваемого изделия 0,1—2,0 мм; максимальный диаметр свариваемых деталей 0,1—2,0 мм; средства откачки — безмасляные; система наблюдения за ходом сварки — оптическая.

Для сварки более толстых деталей создана электронно-лучевая установка ЭЛУС-50/5. Она предназначена для сварки, пайки и термообработки металлов и сплавов, полупроводниковых материалов и изделий. Ее технические характеристики несколько отличаются от предыдущей установки: мощность электронного пучка 5,0 кВт; ускоряющее напряжение 50 кВ; объем рабочей камеры 0,3 м³; толщина свариваемого материала — до 15 мм; диаметры свариваемых деталей 200 мм; точность слежения за сварным швом 0,1 мм; вакуум в рабочей камере 1,33·10 Па; камера имеет сменную оснастку; средства вакуумной откачки — безмасляные; увеличение системы наблюдения за процессом сварки 2—5 — крат.

Первым электронно-лучевым агрегатом, предназначенным для комплектации вакуумных установок различного назначения, был ЭЛА-50/5. Его конструкция допускает размещение электронно-лучевой системы (пушки) в любом положении (даже под углом 90°). Основное назначение его — это сварка и пайка, термообработка материалов и изделий [25].

Позже, используя опыт эксплуатации агрегата ЭЛА-50/5, был создан параметрический ряд агрегатов, представленных в таблице: ЭЛА-50/5м (м — модернизированная модель), ЭЛА-60/15, ЭЛА-50/5т и ЭЛА-60/15т (модель для термической обработки деталей и изделий) со следующими параметрами:

Показатели	ЭЛА-50/5м	ЭЛА-60/15	ЭЛА-50/5т	ЭЛА-60/15т
Максимальная мощность электронного пучка, кВт	5	15	5	15
Ускоряющее напряжение, кВ	50	60	50	60
Диаметр электронного пучка, мм	0,5—1,0	1—2	1	2
Увеличение системы наблюдения за технологическим процессом, крат	2—10	2—10	—	—
Частота импульсов тока, Гц	3—100	6—50	3—100	6—50
Длительность импульсов тока пучка, мс	5—120	5—160	3—120	5—160
Частота развертки пучка, Гц	3—150	3—1500	3—1500	3—1500
Размеры разверток, мм, не менее:				
линейной, круговой, крестообразной	10	10	10	10
растровой	40×40	40×40	40×40	40×40
Максимальная толщина свариваемого материала, мм, не более	15	30	15	30

Предусмотрено управление током пучка, фокусировкой, током отклонения пучка от внешней управляющей системы. Имеется выносной пульт управления для работ на некотором расстоянии от агрегата.

Оборудование для электронно-лучевого испарения

Широкое внедрение электронно-лучевых испарителей в технологию микрофотоэлектроники и микроэлектроники потребовало создание универсальных электронно-лучевых испарителей УЭЛИ. Это позволило сократить номенклатуру вакуумного оборудования, предназначенного для испарительного осаждения материалов. Устройство представляло собой собственно блок испарителя с несколькими тиглями, параметрический ряд фланцев для стыковки собственно испарителя с технологической камерой, вторичные источники питания и переключатель, систему управления движением и параметрами электронного пучка. Такая конструкция дала возможность при использовании одного источника питания работать с несколькими агрегатами, куда встраивались испарители мощностью 6—12 кВт. Позже был создан параметрический ряд электронно-лучевых испарителей по этому же принципу.

Оборудование для электронно-стимулированной имплантации

Разработана установка, формирующая электронный пучок с энергией электронов до 2 МэВ. В основе установки лежит СВЧ-ускоритель электронов. Установка снабжена технологической камерой со специальной оснасткой, позволяющей обрабатывать полупроводниковые пластины. Исследования показали, что при облучении импульсными потоками электронов полупроводниковых пластин, покрытых слоем атомов другого вещества, под действием электронного пучка эти атомы быстро диффундируют в глубь полупроводника. Электронно-стимулированная имплантация обеспечивает более глубокое проникновение легирующей примеси. Возможно регулирование концентрационных распределений по глубине [26, 27].

Разработана феноменологическая теория процесса электронно-стимулированной имплантации [29].

Ионно-плазменное оборудование

Ведутся работы по созданию ионно-плазменного оборудования для удовлетворения потребностей различных технологических процессов. Ионный распылитель магнетронного типа "Магнетрон-2" предназначен для нанесения покрытий на оптические изделия и полупроводниковые пластины в производстве изделий микрофотоэлектроники. Отличительной особенностью агрегата являются его технические характеристики: номинальная мощность 16 кВт; максимальная скорость осаждения пленки 50 нм/с; диаметр мишени 200 мм; коэффициент использования мишени до 75 % [29].

Ионно-лучевое оборудование

Для ионно-лучевой или ионно-химической обработки часто необходим ионный источник, встраиваемый в технологическую камеру при нанесении на изделие тонкопленочных покрытий методом ионного распыления при изготовлении оптических изделий. В микроэлектронике для этих целей разработан параметрический ряд ионных источников различной конструкции. Один из них — "Ион-4" обладает следующими показателями: ускоряющее

напряжение 0,5—4,0 кВ; плотность тока на мишени до 2,0 мА/см²; диаметр ионного пучка 200 мм; потребляемая мощность — 8 кВт.

Установка “Рельеф” для ионного травления с диаметром ионного пучка 90—110 мкм при плотности ионного тока от 0,1 до 10 мА/см² используется для производства оптических изделий и изделий микрофотоэлектроники, а также может быть использована для анализа и контроля за технологическими процессами. Установка легко встраивается в любой технологический процесс для травления поверхности изделия или распыления с осаждением. Ускоряющее напряжение можно изменять в пределах 0,5—4,0 кВ, плотность ионного тока — 0,1—10 мА/см². Предусмотрена возможность работы с ускоренным пучком нейтрализованных ионов (атомов). В качестве рабочих газов могут использоваться Ag, O₂, N и др. [30].

Ведутся исследования и создаются установки для обработки материалов тонкосфокусированным ионным пучком. Одна из таких установок предназначена для микрофрезерования тонких поверхностных слоев различных материалов управляемым ионным зондом. В качестве источника ионов использован жидкометаллический источник. Эффективный диаметр ионного зонда составляет 1 мкм. Глубина фрезерования может меняться от 5 до 8 мкм при ширине фрезеруемой дорожки 1 мкм.

Комплексы на базе электронно-лучевого оборудования

Накопленный опыт по созданию различного электронно-лучевого, ионно-лучевого и ионно-плазменного оборудования позволил нам приступить к созданию целевых комплексов на базе этого оборудования.

Комплекс оборудования для электронной литографии

На основе приводимых в настоящей работе материалов были созданы интегрированные проблемно-ориентированные электронно-лучевые устройства, управляемые с помощью компьютера, обладающие высокими показателями качества. Среди них наиболее представительным является комплекс для осуществления процесса электронной микролитографии с высоким разрешением на большом поле.

В состав комплекса входят: установка электронной литографии ПЭЛ-1, автоматизированный растровый электронный микроскоп РЭМ-И для контроля за результатами электронной литографии и измерения линейных размеров элементов топологических слоев с обратной связью на управляющую ЭВМ установки ПЭЛ-1, автоматический перегрузчик полупроводниковых и стеклянных пластин из технологических контейнеров и обратно, вакуумные модули для транспортирования пластин к другим технологическим установкам, электронорезист с повышенной чувствительностью для “сухой” электролитографии, математическое обеспечение, тестовые структуры и программы для настройки и юстировки ЭОС литографа и растрового электронного микроскопа.

Электронно-оптические системы с программируемыми параметрами электронного пучка позволили перейти к созданию электронно-зондовых устройств нового поколения, с более широкими функциональными и технологическими возможностями.

Установка ПЭЛ-1 снабжена электронной пушкой с прямонакальным катодом на LaB_6 со стабилизацией температуры катода, что позволило добиться высокой надежности. ПЭЛ-1 позволяет формировать программно-управляемые электронные пучки как прямоугольного сечения (от $0,2 \times 0,2$ до 10×10 мкм) с равномерным распределением плотности тока, так и круглого сечения (диаметром $0,2$ — 10 мкм) с гауссовым распределением плотности тока, высокой электронной яркостью (до $5 \cdot 10^6$ А/(см²·ср)) и большим быстродействием отклонения за счет малой индуктивности и высокочастотных свойств отклоняющих систем (более 20 МГц) для синтезирования (формирования) изображений на поле $1,6 \times 1,6$; $3,6 \times 3,6$; $6,3 \times 6,3$ мм. Погрешность совмещения $\pm 0,1$ мкм. Производительность определяется чувствительностью резиста, сложностью рисунка, размером чипа, диаметром пластин. Для резиста с чувствительностью $1 \cdot 10^{-9}$ К/см² и 50%-ной площадью экспонирования, с диаметром пластины 150 мм производительность установки составляет 6 пластин в час.

Опоры и привод координатного стола размещены вне вакуума, что сокращает привносимую дефектность. Скорость перемещения стола 40 мм/с, точность позиционирования ± 1 мкм. Дискретность позиционирования электронного пучка $\pm 0,01 \div 0,1$ мкм. Система позиционирования пучка связана с лазерным интерферометром, контролирующим положение стола по осям x и y . Ускоряющее напряжение — 25 кВ. Размер стеклянных пластин и кремниевых пластин 100×100 и $\varnothing 100$ мм, соответственно. Автоматический шлюз с механизмом загрузки и выгрузки вмещает до 10 пластин. Время откачки до $1 \cdot 10^{-2}$ Па — не более 25 с. Описываемая установка находится в эксплуатации много лет, и это позволило накопить большой экспериментальный материал по ее эксплуатации.

Позже установка для электронной микролитографии была модернизирована (ПЭЛ-1м), благодаря чему поле сканирования пучка было увеличено до 10×10 мм при минимальном сечении пучка $0,2 \times 0,2$ мкм.

РЭМ-И, как и ПЭЛ-1, оснащен лазерным интерферометром для контроля за перемещением координатного стола с точностью отсчета его положения $\pm 0,005$ мкм (скорость перемещения стола 40 мм/с). Данные контроля накапливаются в управляющей ЭВМ, а затем передаются в управляющую ЭВМ литографа для коррекции экспонируемого рисунка топологического слоя.

Важное место в технологии изготовления полупроводниковых приборов занимает разработка высокочувствительных электронорезистов и ионостойких масок. Моделирование атомной структуры материала позволило выявить такую атомную структуру, которая обеспечивает высокую чувствительность к электронно-лучевому экспонированию, а также стойкости электронорезиста и маски к ионному травлению [31].

Аналитический комплекс для анализа отказов изделий микрофотоэлектроники

В целях создания аналитического центра, необходимого для анализа отказов в процессах разработки и производства изделий микрофотоэлектроники, были проведены многие из тех научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, о которых говорилось выше.

В специально построенном здании — лабораторном корпусе — были размещены лаборатории, оснащенные как стандартным, так и нестандартным электронно-лучевым, ионно-лучевым и ионно-плазменным оборудованием.

Многие электронные микроскопы как просвечивающего типа (среди них и сверхвысоковольтный электронный микроскоп [32]), так и растровые, фотоэmissive и многие другие со специализированными приспособлениями и приставками были созданы для решения этой задачи.

Созданное оборудование для контроля за технологическими процессами позволяло выявлять отказы на ранних стадиях изготовления изделий микроэлектроники. Оборудование, необходимое для препарирования объектов и исследования на базе ионных пучков, а также ионно-плазменное оборудование и оборудование для электронного испарения с осуждением также специально разрабатывалось для оснащения аналитического комплекса.

Сегодня лабораторный корпус представляет собой уникальную лабораторию комплексного исследования причин отказов полупроводниковых изделий.

Мобильный (транспортабельный) комплекс для мониторинга окружающей среды

В состав комплекса входят малогабаритный просвечивающий электронный микроскоп, электронно-зондовый рентгеновский микроанализатор, установка для обнаружения малых радиоактивностей в предметах обихода и на теле человека, оборудование для приготовления проб, включая воздух.

Комплекс предназначен для контроля загрязнения окружающей среды вредными для человека веществами, радиоактивной пылью, включая и бактериологические. Комплекс был представлен на Международной выставке в Брюсселе в 1995 г. и удостоен золотой медали и диплома.

Л и т е р а т у р а

1. Филачев А. М., Андреев С. В., Монастырский М. А., Тарасов В. А., Белуга И. Ш., Гайдукowa И. С., Муравьев А. Г. Разработка вычислительных методов и пакета прикладных программ для моделирования электронно-лучевых технологических установок//Прикладная физика. 1998. № 2. С. 5—18.

2. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. В., Чернова-Столярова Е. Е. Метод расчета широкоугольных осесимметричных электронно-оптических систем//Изв. Академии наук. Сер. физич. 1993. Т. 57. № 8. С. 106—109.

3. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. В. WIDE-ANGLE OPTICS: пакет программ для моделирования электронно- и ионно-лучевых аксиально-симметричных систем, содержащих непараксиальную широкоугольную и иммерсионную оптику с наложенными электрическими и магнитными полями// Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 166—168.

4. Васичев Б. Н. Управление пространственной информацией, переносимой электронно-лучевыми волновыми полями, в электронной микроскопии и электронно-лучевых вычислителях: Тез. докл. на IV Всероссийском семинаре "Проблемы теоретической и прикладной электронной оптики". М., октябрь 21—22. 1999.

5. Васичев Б. Н. Управление пространственной информацией электронно-лучевых волновых полей в электронно-лучевых вычислителях и электронных микроскопах//См. наст. журн. С. 67.

6. Балашов В. Н. Магнитная электронная линза с синтезированным полем//Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 168—172.

7. Балашов В. Н., Васичев Б. Н. Метод расчета распределения плотности тока в обмотке отклоняющей системы электронной линзы с подвижной оптической осью //Изв. Академии наук. Сер. физич. 1990. Т. 54. № 2. С. 346—349.
8. Гришина Т. А., Гришина В. Ю. //Там же. 1995. Т. 59. № 2. С. 113.
9. Васичев Б. Н., Зотова М. О. Распределение энергии в аксиально-симметричном магнитном поле //Там же. 1999. Т. 63. № 7. С. 1268—1275.
10. Филачев А. М., Фукс Б. И. Проблемы электронно-лучевой обработки диэлектриков // Прикладная физика. 1996. № 3. С. 39—46.
11. Гринфельд Д. Э., Филачев А. М., Фукс Б. И. Исследование зарядки диэлектриков при их импульсной обработке электронным лучом //Там же. 1997. № 2—3. С. 24—31.
12. Васичев Б. Н. Ионная проводимость твердых тел при электронно-лучевом облучении //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1990. Т. 54. № 2. С. 353.
13. Стоянов П. А., Мосеев В. В., Ренский И. С. Электронный микроскоп ЭВМ-100Л //Там же. 1977. Т. 41. № 5. С. 842.
14. Васичев Б. Н. Электронно-зондовый микроанализ тонких пленок. — М.: Металлургия, 1977.
15. Васичев Б. Н. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1977. Т. 41. № 7. С. 1437—1439.
16. Васичев Б. Н. Сб. докл.: Приборы для научных исследований. — М.: Изд.-во Секретариата СЭВ, 1980. Т. 2.
17. Васичев Б. Н. //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1972. Т. XXXVI. № 9. С. 1885.
18. Васичев Б. Н. Информационные особенности опознания образов в виде элементной неоднородности, структуры и топологии объектов в полупроводниковых и других материалах методами аналитической электронной микроскопии //Прикладная физика. 1999. № 4. С. 52—61.
19. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Крапунин В. В., Розенфельд Л. Б. и др. Фотоэмиссионный электронный микроскоп (ФЭМ): Тез. докл. VIII симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. — г. Черногловка, 1993.
20. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. П. Моделирование иммерсионного объектива технологической фотоэмиссионной установки, предназначенной для исследования и контроля эмиссионных характеристик полупроводниковых материалов, используемых в микрофотоэлектронике: Тез. докл. XV Международной науч.-техн. конф. по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. М., октябрь, 1998.
21. Дицман С. А. Формирование изображения дефектов в кремнии в сигнале наведенного тока в РЭМ //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1995. Т. 59. № 2. С. 165.
22. Васичев Б. Н., Короб Е. Б., Розенфельд Л. Б., Дервицкий К. А., Погудина Р. В. Установка для исследования и контроля катодолюминофоров //Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1985. № 2(107). С. 53—54.
23. Васичев Б. Н. Измерение линейных размеров субмикронного размера в РЭМ //Изв. АН РФ. Сер. физич. 1993. Т. 56. № 3. С. 147—158.
24. Васичев Б. Н., Вольфсон Л. Ю., Бдуленко А. П. Электронно-лучевая установка для сварки тонкостенных корпусов //Оптико-механическая пром-сть. 1983. № 3. С. 33—34.
25. Кабанов А. Н., Васичев Б. Н., Бдуленко А. П., Поливанов В. В. Электронно-лучевой агрегат ЭЛА-50/5 // Там же. 1983. № 1. С. 40.
26. Васичев Б. Н. Сб. докл. Приборы для научных исследований. — М.: Изд.-во Секретариата СЭВ, 1980. Т. 2.
27. Васичев Б. Н., Балашов В. Н., Плясунов В. А. Электронно-лучевая установка для исследования радиационно-стимулированных технологических процессов в производстве интегральных микросхем //Приборы и техника эксперимента. 1988. № 3. С. 227—230.
28. Васичев Б. Н. Ионная проводимость твердых тел при электронно-лучевом облучении //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1990. Т. 54. № 2. С. 353.
29. Еремин А. П., Смолянинов В. Д., Филачев А. М. Ионно-плазменная технология изготовления оптических элементов на подложках из полимерных материалов //Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 84—92.
30. Еремин А. П., Смолянинов В. Д., Филачев А. М. Ионные источники для технологического ионно-плазменного оборудования //Там же. С. 18—24.
31. Васичев Б. Н., Рыбаков Ю. Л. Моделирование и выбор атомной структуры материалов для ионно-стойких масок, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов //Микроэлектроника. 1986. Т. 15. № 6. С. 519—522.
32. Филачев А. М., Васичев Б. Н., Макарова И. С., Розенфельд Л. В., Чернова-Столярова Е. Е. Анализ возможности использования сверхвысоковольтного электронного микроскопа СВЭМ-1 для исследования радиационной стойкости материалов //Прикладная физика. 1998. № 3—4. С. 19—22.

**Electron and Ion optics and electron- and
ion-beam equipment in State research
Institute for electron and Ion optics
(It is 25 old)**

B. N. Vasichev

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A. M. Filachev

The State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

The review of research-and-production activity of institute in electron and ion optics and created technological equipment is given.