

На правах рукописи

Цыбин Олег Юрьевич

**Генерация ионов при воздействии импульсных электрических полей и токов на многокомпонентные поверхностные структуры**

Специальность 01.04.04. - "Физическая электроника"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Санкт-Петербург

2003 год

Диссертация выполнена в Санкт - Петербургском государственном политехническом университете на кафедре Физическая электроника.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Баранов Игорь Александрович

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Пронин Игорь Иванович

Доктор физико-математических наук, профессор Санин Андрей Леонардович

Ведущая организация: Институт Аналитического приборостроения РАН

Защита состоится 17 апреля 2003 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.01 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, II учебный корпус, ауд.470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке университета.

Автореферат разослан 17 марта 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

профессор

Водоватов И.А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Диссертация посвящена процессам поверхностной генерации ионов (ПГИ) при быстрой диссипации высокочастотной (ВЧ и СВЧ диапазонов) электромагнитной энергии, поступающей от внешних источников, на поверхности твердого тела в вакууме. Рассматриваются стимулированные фазовые переходы, в результате которых адсорбированные частицы освобождаются и покидают поверхность в различных зарядовых состояниях. Это направление принадлежит к приоритетным фундаментальным исследованиям и их приложениям в физической электронике, включающим взаимодействие ионов с поверхностью, физику и диагностику поверхности и потоков частиц, а также физику процессов в электронных вакуумных приборах (ЭВП), ионных источниках (ИИ) масс-спектрометров (МС) и др. Построение детальной микроскопической картины ПГИ необходимо для развития фундаментальных физических представлений и их прикладного использования. Физика и техника ПГИ находятся в стадии развития, перед ними ставятся новые задачи, например, относящиеся к получению и исследованию макромолекулярных ионов. Состояние поверхности в виде многокомпонентной поверхностной структуры (МПС), содержащей адсорбированные атомные и многоатомные частицы в различных зарядовых состояниях, поверхностные дефекты и т.д., является наиболее распространенным в вакуумных устройствах, однако характеризуется сложностью и недостаточной изученностью. Несмотря на широкие исследования и применения известных методов ПГИ (корпускулярных, лазерных, полевых, химических, плазменных, термических, и др.), требуются новые эффективные способы генерации ионов и методы их исследования, особенно в сочетании с МПС.

Тема данной диссертации, в которой созданы такие способы, основанные на воздействии импульсных распределенных электрических полей и токов (ИРЭПТ), основные спектральные составляющие которых находятся в диапазоне частот МГц-ГГц (ВЧ ИРЭПТ), на МПС, а также методы их исследования, основанные преимущественно на масс-спектральном анализе (МСА), выявлены фундаментальные физические эффекты и построены прикладные решения электродинамической ПГИ (ЭПГИ), представляется **актуальной**.

**Целями** диссертации явились:

- создание способа и устройств реализации ЭПГИ в МПС;
- создание методов исследования физических процессов, происходящих при этой генерации;
- построение комплекса знаний о физике ЭПГИ в МПС и выявление способов практических применений этих знаний.

В соответствии с указанными целями определены **основные задачи**:

- разработка способа и устройств реализации ЭПГИ, основанных на воздействии ВЧ ИРЭПТ на МПС в вакууме, а также методов исследования потоков частиц, переходящих из адсорбированного состояния на поверхности в ионизованную газовую фазу в вакууме;
- получение основных экспериментальных характеристик процессов преобразования ансамбля частиц из адсорбированного состояния в ионизованную газовую фазу при воздействии ВЧ ИРЭПТ на МПС в вакууме, и формирование на этой основе комплекса теоретических знаний о закономерностях ЭПГИ;
- применение созданных физических представлений для анализа процессов ЭПГИ и сопутствующих явлений в ЭВП;
- разработка прикладных физико-технических решений на основе созданных физических представлений и результатов анализа.

**Научная новизна** полученных и представленных в диссертации результатов работы.

Принципиально новыми являются следующие результаты:

1. Созданы способ и устройства реализации эффективной ЭПГИ при воздействии ВЧ ИРЭПТ на МПС в вакууме.
2. Разработаны и апробированы методы исследования процессов ЭПГИ, обладающие масс-спектральным (М-Сп), динамическим и пространственным разрешением в системах с высокой плотностью потоков мощности; способы диагностики МПС, а также активных сред и физических явлений в ЭВП.
3. Выявлены и изучены не известные ранее физические эффекты десорбции атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц с МПС металлических, полупроводниковых, диэлектрических и композиционных образцов, обусловленные ЭПГИ.
4. Получены с М-Сп разрешением характеристики ЭПГИ из поверхностных слоев электродов в рабочем объеме ЭВП, определено влияние генерации ионов на особенности физических явлений и предельно-достижимые значения параметров, в том числе на формирование

активной среды, нестабильности высоковольтных зазоров, качество получаемых электронных и ионных пучков.

5. На основе полученных результатов предложены способы управления параметрами физических процессов в ЭВП, включающие выбор режимов и применение специальных видов пространственного распределения электрического поля.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием широкого набора различных экспериментальных установок и приборов, тщательной обработкой комплекса различных методик исследования, многократной проверкой получаемых данных, заблаговременной широкой апробацией и публикацией результатов, сопоставлением с данными, имеющимися в научно-технической литературе.

**Научная значимость** диссертационной работы состоит в том, что в ней получили развитие физические представления, относящиеся к энергетическим возбуждениям в твердом теле, создаваемым воздействием ВЧ ИРЭПТ, к процессам релаксации в объеме и на поверхности, фазовым переходам на поверхности, кинетике стимулированной десорбции, ионизации, фрагментации и синтезу частиц. Эти представления аналитически и непротиворечивым образом дополняют имеющиеся физические знания, расширяют подготовленность научной базы к дальнейшему развитию фундаментальных знаний, а также методов исследований и технологий. Они могут быть использованы для интерпретации ряда соответствующих физических явлений в физике твердого тела, физической электронике, микроэлектронике и т.д. Развита новая методическая решения, которые расширяют возможности исследований поверхности, активных сред, ионообразования, формирования потоков частиц.

**Практическая ценность** диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть непосредственно использованы (например, обзоры [1-4]) при разработке и использовании экспериментальных методов в диагностике поверхности и физике твердого тела, где позволят получать более широкую и подробную научную информацию, относящуюся к генерации ионов и быстрым процессам энергетического активирования образцов. На основе созданных физических представлений разработаны и испытаны новые технологии, включающие диагностику электронных и ионных пучков, конструирование ЭВП, в том числе электронных пушек, импульсных ИИ для МС. Результаты могут быть использованы при разработке ЭВП, где позволят улучшить предельно-достижимые параметры и получить новые функции, в том числе повысить качество активной среды, надежность и долговечность устройств, а в МС - реализовать новый класс ИИ, в частности, необходимых для исследования макромолекул.

В настоящее время указанные результаты используются в учебных курсах и научных исследованиях в СПбГПУ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Десорбция атомных и многоатомных частиц из связанного состояния в МПС в газовую фазу в вакууме в различных зарядовых состояниях осуществляется воздействием ВЧ ИРЭПТ при плотности потока мощности выше порогового значения на твердотельные МПС с металлическими, полупроводниковыми, диэлектрическими и композиционными подложками в широком семействе электродинамических устройств: волноводных, контактных, индукционных, эмиссионных, инжекционных и разрядных, что явилось основой созданного способа реализации ЭПГИ.
2. Разработанные методы позволяют осуществлять исследования процессов ЭПГИ, в том числе измерять М-Сп, пространственные и динамические характеристики в системах с высокой плотностью потоков мощности, а также параметры состояния твердотельных МПС, активных сред и физических явлений в ЭВП.
3. Обнаружены и изучены эффекты генерации атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц, обусловленной активирующим воздействием ВЧ ИРЭПТ на МПС в вакууме с металлическими, полупроводниковыми, диэлектрическими и композиционными подложками, в том числе выявлены:
  - Десорбция отрицательных ионов и нейтральных частиц с поверхности эффективного термоэммиттера (ЭТ), стимулированная отбираемым током в режиме импульсной эмиссии электронов.
  - Процесс рециклинга, т.е. приповерхностного переноса атомных и многоатомных частиц по замкнутому циклу, включающему распыление, ионизацию распыленных частиц и их ускорение в электрическом поле, который при определенных условиях нарастает с интенсивным самораспылением и выходом кластеров.
  - Десорбция с электропроводящих поверхностей металлов и полупроводников адсорбированных газов и осажденных молекул, характеризуемая быстрым (безинерционным) отрывом частиц, наличием нейтральной, положительной и отрицательной ионизованных составляющих в эжектированной парогазовой фазе, явлениями формирования прочной поверхностной фазы, матричного усиления выхода макромолекул, наличием корреляции между экспериментальными и известными параметрами масс-спектров частиц.
  - Две последовательные стадии импульсной ЭПГИ на МПС пьезодиэлектриков и полимеров, причем состав экстрагируемого потока зависит от времени, типа диэлектрика и от

определенного набора контролируемых факторов: плотности потока мощности на поверхность, флуэнса, способа подготовки поверхности.

4. В рабочем объеме ЭВП преобразование в парогазовую фазу атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц из поверхностных слоев электродов, обусловленное активирующим действием ВЧ ИРЭПТ, влияет на протекание физических процессов и предельно достижимые значения параметров и характеристик, в том числе на стабильность высоковольтных зазоров, формирование прочной поверхностной фазы в режимах тренировки, внутриимпульсную динамику ионной компоненты. Генерация ионов при отборе тока термоэмиссии позволяет осуществлять диагностику ЭТ. Приповерхностный рециклинг является основой построения ИИ с интенсивным самораспылением, а также метода диагностики качества ЭВП.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации прошли апробацию в виде лекций и докладов на более чем 40 научных конференциях, семинарах, симпозиумах, школах и других мероприятиях в России и за рубежом, в том числе:

4й Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике, Томск, 1982г.; Десятая научная конференция «Электроника СВЧ», Минск, 1983г.; 11-я Межвузовская конференция по электронике СВЧ, Орджоникидзе, 1986г.; Семинар «Диагностика поверхности ионными пучками», Донецк, 1988г.; "Методы и средства диагностирования изделий электронной техники", - Всесоюзная конференция, М., 1989г.; 6й Всесоюзный семинар "Высокочастотная релятивистская электроника", Свердловск, 1989 г.; 7-я Всесоюзная Конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. - Харьков, 26-28 сентября 1989 г.; 5, 6, 7, 8, 9 и 10 -я Зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике, Саратов, СГУ, 1981 - 1995 г.г.; 8 Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Свердловск, УрО АН, 1990г.; Десятый семинар по методам расчета электронно-оптических систем, Львов, 1990г.; «Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа», Всесоюзный Семинар: Л., 1990г.; «Диагностика поверхности ионными пучками», Всесоюзный Семинар-совещание, М., 1990г.; Всесоюзный семинар по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии, Харьков, 1991г.; 20я Международная конференция по явлениям в ионизованных газах, Пиза, Италия, 1991г.; 21я Всесоюзная конференция по эмиссионной электронике. Л., 29-31 января 1991 г.; Десятая, четырнадцатая и пятнадцатая конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. Москва, МИФИ, 1991г., 1999г., 2001г.; Российская научно-техническая конференция «Инновационные наукоемкие технологии для России» 25-27 апреля 1995г., СПб, 1995г.; 2я

Международная научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», Гурзуф, 1995г.; Международная научно-практическая конференция «Измерительно-информационные технологии в охране здоровья - Метромед 95», СПб, СПбГТУ, 1995г.; Метромед -99, СПб, СПбГТУ, 1999г.; 11я Международная конференция по мощным пучкам частиц, Прага, 1996г.; Вторая Международная конференция по проблемам физической метрологии ФИЗМЕТ-96, СПб, 1996г.; 2я, 3я, 4я и 5я Научно-технические конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», СПб, СПбГТУ, 1998г., 1999г., 2000г., 2002г.; 2я Республиканская конференция по Физической Электронике, Ташкент, 1999г.; «Российские технологии для индустрии»- Международное совещание, СПб., 2000г.; Международная конференция «Десорбция –2000», Сан-Мало, Франция, 2000г.; Международная конференция «Десорбция – 2002», Колорадо, США, 2002г.; Всероссийская научно-методическая конференция, СПб, СПбГТУ, 2000г. Работа была доложена и обсуждалась на совместных семинарах-совещаниях СПбГТУ - ФТИ РАН, на семинарах в НТО АП, НПО Исток, ИПФАН (1988 -1999г.), а также в Университетах Уппсала, Швеция (1999 г.), Йёнсуу, Финляндия (2001 г.), Вилмингтон, Северная Каролина, США (2001 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликованы 62 работы, в том числе 18 статей в журналах и сборниках (Известия АН, ЖТФ, ПЖТФ, и др.), 35 публикаций в трудах конференций, 8 авторских свидетельств на изобретения. Основные публикации по теме диссертации приведены в списке литературы.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены в ЛПИ-СПбГТУ-СПбГПУ в период приблизительно с 1980 года по настоящее время. Кроме того, циклы измерений проведены в ФТИ РАН (СПб), ОИЯИ (Дубна), Ангстрем Лаборатория (Университет Уппсала, Швеция). Все основополагающие идеи диссертации инициированы и сформулированы автором самостоятельно. Экспериментальные результаты получены в основном с помощью студентов и аспирантов, научным руководителем работы которых являлся автор. По этим материалам успешно защищены две диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, более 20 дипломных работ и магистерских диссертаций. Значительная часть результатов, полученных в диссертационной работе, была использована при выполнении НИР на кафедре Физическая электроника в совместных программах с НТО АП РАН (СПб), ИПФ АН (Нижний Новгород), НПО ИСТОК (Фрязино), ОИЯИ (Дубна), Исследовательским Центром INR (Карлсруэ, Германия), Университетом Уппсала (Швеция). Автор являлся ответственным исполнителем и научным руководителем этих

НИР. Работа была поддержана грантом научной программы “Университеты России” в 1992-94 гг., в 2000 – 2002 гг. являлась частью работ, выполняемых по программе “Приоритетные направления научных исследований в высшей школе”. Начиная с 2002 года, исследования поддержаны грантом Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования».

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списков основных публикаций (62 наименования) и цитируемой литературы (286 наименований). Общий объем диссертации - 333 страницы, включая 78 рисунков и таблиц.

**Во введении** определяется объект исследования: МПС в быстром переходном состоянии как источник частиц в газовой фазе, обосновывается актуальность проблемы, формулируются цели и задачи работы. В состав МПС входит пространственно-неоднородный комплекс частиц верхних слоев конденсированной фазы, адсорбата или нанесенного вещества, с большим количеством внутренних степеней свободы, типов связей частиц и видов запасенной энергии. К объектам со сложной МПС в вакуумной электронике принадлежит широкий класс элементов, например, изготовленных механическими, электрохимическими, электротермическими и т.п. методами, в том числе сплавных, композиционных образцов и т.д. Явления ПГИ, т.е. преобразование атомных частиц из связанного состояния в ионизованную газовую среду в вакууме, происходят при диссипации поступающей энергии в МПС как в открытой системе "подложка-адсорбат" которая при таком воздействии оказывается в переходном состоянии. Протекающие фазовые переходы сложны и многообразны, существенно зависят от параметров воздействия. Современный комплекс известных методов ПГИ включает следующие направления. Полевые методы с действием сильного электрического импульсного или ВЧ поля, локализованного на острейшем эмиттере. В ИИ МС они характеризуются фрагментацией частиц и нестабильностями, реализуются для анализа ограниченного набора веществ. Бомбардировка ускоренными частицами - электронами, ионами, нейтралами, плазмой, а также продуктами распада радионуклидов, - характеризуется разрушающим взаимодействием с адсорбатом, выходом вещества подложки, значительной фрагментацией. Методы термодесорбции также характеризуются значительными ограничениями по типам производимых ионов, разрушением лабильных молекул. Лазерные методы ПГИ получили значительное развитие, но и перед ними имеется ряд проблем: отражение потока мощности от поверхности, малая глубина проникновения фотонов, значительные начальные энергетические, позиционные, временные разбросы, избыточная энергия возбуждения частиц, плазменные

явления. Нематричные методы селективны по типам ионов, возникает необходимость подбора частоты облучения для каждой десорбируемой фракции. Матричные методы широко применяются, однако теория процессов и технология матриц недостаточно развиты. В качестве нового способа реализации ПГИ в диссертации выбрано электродинамическое воздействие ВЧ ИРЭПТ на МПС. Используются импульсные потоки СВЧ мощности в длинноволновой части ГГц диапазона, а также короткие импульсы напряжения, часть спектра частот которых находятся в коротковолновой части МГц диапазона. В этом диапазоне частот воздействие электромагнитного поля на образец приводит к возбуждению распределенных поверхностных высокочастотных токов, или скин-токов (ПВТ), эти явления принципиально соответствуют рамкам классической электродинамики. Поэтому разрабатываемые способы реализации ПГИ можно отнести к электродинамическим. При постановке и интерпретации различных экспериментов действие электромагнитного поля и ПВТ выступает как совокупность факторов, связанных между собой вблизи границы образцов. Воздействия такого рода реализуются в физике и технике ЭВП, например, в СВЧ трактах и резонаторах, замедляющих системах и согласующих элементах и т.д. Возбуждение электромагнитными полями и скин-токами в диапазоне частот МГц-ГГц широко применяется, как известно, для целей нагрева поверхностей и модификации их свойств, передачи потоков мощности, получения излучений и т.п., однако не было развито для реализации ПГИ. В диссертации установлено, что действие ПВТ может иметь характер интенсивного активирования поверхности, в результате которого возникает комплекс фундаментальных физических явлений, включая ЭПГИ.

**Первая глава** носит методический характер и посвящена электродинамическому активированию МПС, экстракции потоков частиц и их исследованию. Выбраны характеристики реализации ЭПГИ: тип облучения, диапазон частот и длительность импульсов, распределение потока мощности по развитой поверхности образцов и др. Критерии выбора параметров воздействия:  $\Delta T_{el} \geq \Delta T_{el}^*$ ,  $\Delta T_l^t \geq \Delta T_l \geq \Delta T_l^*$ , где  $\Delta T$  - скачок температуры за время воздействия, нижние индексы обозначают электронную ( $el$ ) и решеточную ( $l$ ) подсистемы, верхние – пороговые значения параметров состояния системы. Выполнение условия  $\Delta T_{el} \geq \Delta T_{el}^*$  обеспечивает достижение достаточной энергии «горячих» электронов в зоне проводимости за время электрон-решеточной релаксации для их возможного участия в процессе десорбции. Это условие позволяет определить пороговое значение плотности потока мощности воздействия. Условие  $\Delta T_l^t \geq \Delta T_l$  устанавливает ограничение на возбуждение тепловой

десорбции, а  $\Delta T_i \geq \Delta T_i^*$  - достаточность энергии воздействия для возбуждения акустической поверхностной волны. Исходя из двух последних условий, были определены значения длительностей импульсов и частотный диапазон ВЧ ИРЭПТ. Комплекс приведенных условий позволил выбрать также форму и размеры образцов, параметры МПС, особенности формирования потоков мощности воздействия. Общим для апробированных вариантов способа является быстрое электродинамическое возбуждение поверхности за время  $10^{-6}$  -  $10^{-9}$  секунды, распределение потока мощности плотностью до  $10^4$  -  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> по поверхности от  $10^{-2}$  до 2.0 см<sup>2</sup>. Отличительные достоинства способа ЭПГИ: возможность реализации мощного импульсного воздействия, однородно распределенного по гладкой развитой поверхностной структуре, позволяющего эффективно передавать энергию, контролировать плазменные и тепловые эффекты, и получать при этом десорбцию и ионизацию частиц.

Экспериментальную часть работы составил единый комплекс МПС и электродинамических систем в сочетании с М-Сп анализаторами: ЭТ в режиме импульсной термоэмиссии электронов [5-10]; рециклинг - перенос потоков частиц по замкнутому циклу "распыление-ионизация" у поверхности при наличии ионизатора и электрического поля [11-19]; облучение электромагнитными волнами СВЧ в диапазоне ГГц [20-24]; контактное пропускание импульсов тока через тонкие образцы [20, 25]; индуцированные поверхностные электрическое поле и ток [26-36]; инжекция электронного потока [37-39]; поверхностный импульсный разряд на диэлектриках [40-43]; генерация ионов на поверхностях электродов в рабочем объеме ЭВП [44-53]. Электродинамические системы представлены широким и представительным набором устройств и элементов диапазона МГц-ГГц в вакуумных ускорительных зазорах, в диодах и электронных пушках с термоэмиттером, в СВЧ волноводе и в резонаторах, в системах с пропусканием импульса тока по тонким проволочкам, полоскам, дискам, с индуцированным током, с инжектированным электронным потоком, с поверхностным разрядом. Часть исследований выполнена в экспериментальных ЭВП, которыми служили макеты магнетронно-инжекторных электронных пушек, СВЧ приборов О- и М-типов, электронно-оптических систем гиротронного типа. В качестве МПС использовались образцы типа "подложка-адсорбат" с диэлектриками, металлами, полупроводниками, композиционными материалами, на которые осаждали остаточные газы, паровоздушные смеси, наносили матрицы и растворы проб, в том числе содержащие макромолекулы. Электропроводящие образцы в виде проволок, лент, дисков толщиной от 0.1 мкм до 2 мм площадью до 2 см<sup>2</sup> изготавливали из различных металлов (Ag, Al, Au, Cu, Ni, Mo, Pt, W), преимущественно в виде холоднокатаных фольг, а также из графита,

нержавеющей стали, полупроводниковых пластин (Si, GaAs). Композиционные материалы представлены эффективными термоэмиттерами. Диэлектрические подложки изготавливали из полиэтилена, парафина, кварца.

Методика исследования характеристик формируемых потоков частиц основана на последовательном применении М-Сп анализа экстрагируемого пакета частиц в газовой фазе при давлении  $10^{-5}$  -  $10^{-8}$  Тор. Основным методом исследования явился времяпролетный анализ, прямопролетный и рефлекторный, а также с ортогональной или малоугловой экстракцией (например, [54]). На входе в пространство дрейфа формировался импульсный пакет ионов длительностью от наносекунд до микросекунд. Компьютерные системы сбора данных состояли из устройств регистрации ионов, предусилителей, запоминающих аналого-цифровых преобразователей с временем дискретизации 2 наносекунды и более. Часть измерений выполнена с помощью магнитного секторного масс-спектрометра с изотопным разрешением типа МИ-1330 (диапазон масс 1-400 Дальтон). Пространственные и угловые характеристики ионных и электронных потоков определяли с помощью гониометров, ионного микроскопа, люминесцентных экранов, а также оригинального метода создания распределенной объемной мишени, состоящей из движущихся в вакууме малых частиц вещества, например, люминофоров [55-58]. Кроме исследований в ЭВП, последний метод был применен на ускорителе тяжелых ионов У-400 в ОИЯИ [55]. Развитые методы анализа нашли применения в области экологических и медицинских исследований [59-62].

**Вторая глава** посвящена исследованию эффектов перехода атомных частиц из связанного состояния в газовую фазу в условиях импульсной термоэмиссии электронов с поверхности ЭТ. Генерацию ионов на поверхности термоэмиттера и керна катода в рабочем режиме ЭВП можно отнести к явлениям, ранее почти не изученным. Известно, что состав частиц в газовой фазе и давление в ЭВП изменяются при включении и работе ЭТ, однако не было прямых М-Сп измерений ионов в потоке с катода одновременно с отбором электронного тока. Косвенные методы не раскрывают в достаточной полноте структурный состав потоков, пространственно-временные характеристики, и, соответственно, физическую природу явлений. В данной работе впервые были выполнены измерения в потоках частиц, экстрагируемых с поверхности одновременно с отбором электронного тока эмиссии [5-10]. Определяли М-Сп состав с необходимым пространственным и временным разрешением. Ионы и нейтралы поступали на вход времяпролетного анализатора или ионно-оптического преобразователя изображения прямо с поверхности ЭТ или керна катода в диодных электронных пушках. Семейство экспериментальных приборов состояло из разных конструкций, включая электронные пушки с

магнитным полем. Магнитное поле изменяли в пределах 0-0.2 Тл, напряжение- 0-15 кВ, длительность импульса- 0-150 мкс и секунд, рабочую температуру катода - 800-1500 градусов Цельсия, давление остаточных газов при непрерывной безмасляной откачке  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  Тор. Плотность электронного тока эмиссии  $J_e$  составляла порядка единиц А/см<sup>2</sup>. Использовали эмиттеры из гексаборида лантана LaB<sub>6</sub>, металлосплавные PtBa, PdBa, металлопористые, в том числе с осмиевым покрытием (Os).

В составе потоков, которые получали с поверхности эффективных термоэмиттеров и с участков молибденового керна, содержались нейтралы и отрицательные ионы, а также положительные - в паузе между импульсами отбора тока. Были представлены ионы газов и веществ эмиттеров, в том числе H, OH, CO, CO<sub>2</sub>, CnHm, La, B, Os, Mo, Pt, соединения с их содержанием, и другие. Плотность тока отрицательных ионов  $J_-$  достигала  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>.

Были обнаружены явления спада амплитуды плотности потока  $J_-$  во время токоотбора, а также гистерезиса значений  $J_-$  в зависимостях от напряжения на катоде или от тока электронов  $J_e$  при разных скорости и направлении их изменения. В режиме отбора тока эмиссии амплитуда плотности потока  $J_-$  и интенсивность десорбции сначала достигают максимума, затем спадают. Скорость спада плотности потока  $J_-$  пропорциональна величине отбираемого тока. По-видимому, это отображает нарастание потока десорбированных частиц в объем на первом этапе рабочего импульса, а на втором - показывает существенное снижение поверхностной концентрации из-за потерь частиц, десорбируемых при протекании тока эмиссии. На распределениях плотности токов по поверхности наблюдались неоднородности, различные для разных эмиттеров. Экстремумы распределений плотности потоков нейтральных частиц  $J_0$ , электронов  $J_e$ , отрицательных ионов  $J_-$  по поверхности эмиттера статистически коррелировали, в ряде случаев почти до 100%, что свидетельствует о наличии механизмов, связывающих локально протекание потока эмиттируемых электронов и десорбцию. Локальные значения плотностей десорбируемых токов  $J_0$ ,  $J_-$  пропорциональны, как правило, значениям плотности  $J_e$ . Максимумам функций распределения нейтралов, электронов и отрицательных ионов, обычно совпадающим по положению на эмиттере, соответствовали, как правило, минимумы тока положительных ионов, измеряемых в паузе между импульсами электронного тока, и наоборот. Разработанная методика позволила определить параметры неоднородностей поверхностных структур и динамику процессов переноса частиц в них. Соответствующие физические модели генерации ионов основаны на ионном распылении эмиттера, поверхностной ионизации, термодесорбции. Существенным механизмом ЭПИ на ЭТ, соответствующим

полученным экспериментальным результатам, является десорбция, стимулированная захватом эмиттируемых электронов частицами в адсорбированном слое. Действительно, электроны, получившие при нагреве ТЭ избыточную энергию и достигшие энергетических уровней выше уровня Ферми, взаимодействуют с адсорбатом в верхних слоях подложки. Наиболее вероятной здесь, имеющей сечение до  $10^{-13}$ - $10^{-14}$  см<sup>2</sup>, является реакция «прилипания» медленных электронов к адсорбированным частицам, которые приобретают отрицательный заряд и затем десорбируются в нейтральном или заряженном состоянии.

В рассмотренных выше режимах измерений интенсивность потоков частиц с ЭТ превышала возможный выход распыленных приблизительно на два порядка. В других условиях, однако, ионное распыление катода проявляется аномально сильно, вплоть до появления кратеров макроскопического размера. Природа этого явления в данной работе изучалась также с помощью метода прямой экстракции и МСА ионов [11-19]. Полученные результаты изложены в третьей главе. В широком интервале изменения режима работы экспериментального прибора в приосевой области было обнаружено наличие аномального потока электронов и отрицательных ионов, поступающего с молибденового керна катода, и достигающего интенсивности  $10^{-3}$ ... $10^{-4}$  от электронного тока с ЭТ. В потоке были представлены отрицательные ионы С, СО<sub>2</sub>, набор кластеров Мо в диапазоне масс приблизительно до 10<sup>3</sup> Дальтон, а при покрытии керна платиновой фольгой вместо них - ионы Pt. После серии измерений была выявлена типичная для ионного распыления деструкция поверхности в приосевой области керна катода. Подобные исследования были выполнены также в высоковольтном импульсном диоде с холодным катодом, представлявшем собой торец пучка графитовых нитей. Распыленные частицы поступали через диафрагму в аноде в камеру ионизации магнитного секторного МС МИ-1330. Наблюдались составляющие в диапазоне масс 1-400 Дальтон, дополнительные к спектру остаточных газов. Эти сигналы допускали интерпретацию как углеводороды С<sub>n</sub>H<sub>m</sub> и кластеры углерода С<sub>n</sub> с различными значениями n=1,2,3,4, 6, 8, 9 и др. По-видимому, в этой системе с достаточно сильным электрическим полем вблизи поверхности эмиттера взаимодействие обратного потока ионов с поверхностью также приводило к интенсивному ионному самораспылению. Замкнутый цикл объединяет ионное самораспыление, ионизацию распыленных нейтральных частиц в приэлектродной области, ускорение образовавшихся ионов к поверхности и увеличение бомбардировки, возрастание выхода вторичных частиц. Пороговое условие развития неустойчивости в общем виде включает в себя интегральные коэффициенты распыления Y, ионизации S, баланса сохранения и потерь частиц k: kSY > 1. Получаемые при этом многокомпонентные ионные потоки и плазма могут

характеризоваться ростом концентрации кластерной компоненты, поскольку значения вероятности ионизации в электронном потоке и выхода при распылении тяжелыми частицами оказываются выше именно для такой составляющей. Рециклинг - интенсивный кругооборот вещества, происходящий с ионизацией распыленного материала в структуре “ионизатор – поверхность”, - при определенных условиях имеет характер неустойчивости. Развитие неустойчивости в целом следует по сценарию образования многоатомных агрегаций. Нестационарные характеристики прикатодного рециклинга были вычислены методом компьютерного моделирования для плоскопараллельного диодного промежутка. Выбирались параметры катода, соответствующие одному из материалов: углерод, ниобий, вольфрам, молибден. Нестационарные компоненты токов возникали при включении в счет процессов ионного распыления и ионизации вторичных частиц. Характерное время нарастания ионного тока определялось, по порядку величины, длительностью времени пролета нейтрального атома со скоростью  $v_a$  от поверхности катода до точки ионизации,  $T \sim \lambda/v_a$ , где  $\lambda$  – длина свободного пробега в ионизирующей среде. В целом полученные результаты представили непротиворечивую физическую картину процесса рециклинг-неустойчивости как источника ионного потока, и позволили интерпретировать на этой основе такие известные явления, как быстрые эволюции импеданса и яркости источников интенсивных электронных потоков, самопроизвольное возрастание тока (СВТ) в вакуумных диодах и автоэлектронной эмиссии в предвзрывной стадии, ионное распыление катодов в электронных пушках. Для СВТ автоэлектронной эмиссии, например, получим  $T \sim 1-10$  нс, а для мощных электронных пушек  $\sim 1$  мс и более.

**Четвертая глава** посвящена исследованию десорбции частиц при воздействии импульсных электрических сигналов большой мощности на МПС образцов, приготовленных из металлов и полупроводников. Десорбция нетепловой, безинерционной природы, стимулированная поверхностными токами, или скин-токами, на электропроводящих образцах, не была известным явлением к началу данной работы. В первой публикации на эту тему [20] автором диссертации были теоретически определены возможные конструкции электродинамических ИИ, физические механизмы эффекта ЭПГИ и эмиссии горячих электронов. Затем в течение ряда лет был осуществлен комплекс разносторонних экспериментальных исследований с тем, чтобы обосновать способ ЭПГИ, получить убедительные доказательства его эффективности, выявить основные характеристики. Впервые скин-токовая ЭПГИ наблюдалась с поверхности металлического образца, установленного в СВЧ волноводе [21-24]. Частота волны составляла 3 ГГц, мощность до 500 кВт, длительность импульса 0.4 – 2 мкс. Источником частиц служил эмиттер, выполненный в виде отрезка медной

проволоки диаметром 150 мкм, или никелевой ленты толщиной 20 мкм, расположенный поперек оси волновода в отверстии в широкой стенке. Плотность потока мощности на поверхность эмиттера достигала 20 кВт/см<sup>2</sup>. Настройкой СВЧ тракта устанавливали в области эмиттера максимум напряженности электрического поля или амплитуды скин-тока. В отсутствие СВЧ мощности во времяпролетном масс-спектре, получаемом при постиионизации нейтралов электронным ударом, наблюдался типичный набор остаточных газов: Н<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>O, СО, СО<sub>2</sub> и других, с массой не более 60 Дальтон. При наличии СВЧ скин-тока на образце, превышающего пороговые значения, спектр изменялся, в нем появлялись новые сигналы в диапазоне масс до 350 Дальтон. Для выяснения механизма скин-токовой ЭПГИ исследования были продолжены в системах с короткими импульсами тока. Их длительность регулировалась в пределах от 5 наносекунд и более, толщина скин-слоя - порядка единиц-десятков микрометров, максимальный ток - до 10 кА. В первых же измерениях с пропусканием тока по тонкой медной проволочке и времяпролетным анализатором была обнаружена десорбция ионов. Затем с помощью масс-спектрометра-рефлектрона в лаборатории Мамырина Б.А. впервые обнаружили десорбцию с поверхности вольфрама не только ионов, но также и нейтралов, имевших скорости, близкие к тепловым [25].

Эксперименты с образцами в виде тонких проволочек, лент и других образцов с малой площадью поверхности имели ряд ограничений и недостатков в методике, технике и интерпретации. В дальнейших исследованиях использовались образцы, имевшие гладкую развитую фронтальную поверхность со слоем адсорбата в виде МПС, из которой осуществлялась десорбция [26-39]. Были реализованы несколько различных схем активирования. Импульс скин-тока индуцировался на фронтальной поверхности или, при использовании тонких образцов, на обратной их поверхности. На обратную поверхность импульс подавался методом индуцирования, или по цепи с электрическим контактом, или методом инъекции электронного пучка.

Для инициирования процесса десорбции/ионизации параметры воздействия на поверхность (плотность потока мощности, поглощенная доза и др.) должны были превысить пороговые значения, зависящие от сложного набора факторов, в том числе свойства и подготовка МПС, геометрии образцов, особенностей режима измерений и др. Десорбируемые потоки в МПС с электропроводящими подложками состояли преимущественно из нейтральных частиц, в большинстве случаев значения коэффициента положительной и отрицательной ионизации в потоке не превышали 10<sup>-3</sup> - 10<sup>-6</sup>. Эти оценочные значения были подтверждены измерениями с постиионизацией электронным ударом.

Единичная реализация сигнала ионов представляла собой набор задержанных пиков длительностью около 10-200 нс, общая длительность спектров для разных проб и режимов порядка 10-1000 мкс. Прослеживалось смещение выделенных пиков по шкале времени при изменении ускоряющего напряжения. Процессы генерации ионов на поверхности можно было разделить на две фазы. Первая, так называемая безинерционная фаза - наиболее интенсивная, совпадающая по времени с активирующим импульсом. Вторая фаза – термодесорбция, задержанная на  $10^2 - 10^4$  мкс. Наступление второй фазы контролировалось по виду масс-спектра, переходящего от линейчатого к квазинепрерывному, и происходило при большой частоте повторения импульсов или максимальной мощности импульса на предельно тонких образцах. Вторая фаза использовалась для очистки образцов перед измерениями. Типичный спектр без внесения пробы содержал компоненты преимущественно с массами 1- 44 Дальтон, обычные для остаточных газов в подобных вакуумных устройствах. Комплекс полученных характеристик включал пороговые по мощности, зависимости от напряженности электрического поля, времени накопления и восстановления поверхностных слоев, а также сравнительные характеристики для разных веществ и др. Выявлен эффект спада интенсивности потоков десорбированных частиц после серии активирующих импульсов. Сигналы восстанавливались без задержки при значительном увеличении мощности воздействующего импульса, либо без увеличения мощности импульса через достаточно большое, порядка единиц – десятков минут, время, либо при значительном (до  $10^{-4}$  Тор) увеличении давления газа в приборе.

В пятой главе приведены результаты измерений ионных сигналов и масс-спектров макромолекул, десорбированных с поверхности металлов и полупроводников. При подготовке образца на его поверхности осаждали слой органических молекул, например, полиэтиленгликолей, аминокислот. Пробы в растворителе осаждались на поверхность методом вакуумного спрея через натекатель и капилляр. Обнаружена принципиальная возможность вакуумного осаждения и десорбции крупных ионизованных молекул. Эффективность десорбции ионов сильно зависела от режима измерений и подготовки пробы, и, как правило, была невелика. Основная часть пробы десорбировалась в виде нейтралов. Ионные сигналы наблюдались в области молекулярных пиков и более тяжелых частиц, возможно, кластеров, а также большое количество фрагментов или многозарядных ионов. Например, при нанесении проб полиэтиленгликолей ПЭГ 200-400 в спектре появлялся набор тяжелых составляющих, преимущественно в диапазоне масс до приблизительно 800 Да. Внесение пробы убикутина приводило к уширению наблюдаемого спектра приблизительно до 10 кДа, алкогольдегидрогеназы или альбумина – до 40-80 кДа и выше. Указанные цифры близки к

соответствующим значениям молекулярной массы компонентов проб. По-видимому, такие данные свидетельствуют о корреляция характеристик масс-спектра ионов и вводимой пробы органических молекул. Предварительная инъекция полиэтиленгликоля ПЭГ-400 в виде матрицы с последующим внесением более крупных молекул вызывала возрастание количества ионных пиков и протяженности спектров. Характеристики спектров макромолекул сложны и не могут на данном этапе получить убедительную интерпретацию, что объясняется, по-видимому, сложными сценариями стимулированных фазовых превращений на поверхности в открытой системе "подложка-адсорбат" с большим количеством частиц и внутренних степеней свободы. Моно- и полимолекулярные сигналы присутствовали в единичных реализациях с вероятностью 10-50 и более процентов при регистрации как положительных, так и отрицательных ионов, однозарядных и многозарядных. Характеристики воспроизводимости спектральных сигналов, необходимые для создания физической модели и оценки аналитических возможностей метода, оказались сложными, зависящими от комплекса факторов подготовки поверхностей, выбора режима их активации. Наблюдались изменения спектров сигналов по мере роста числа импульсов, воздействующих на поверхность. В процессе реализации нескольких (примерно 1-10) импульсов происходило, как правило, заметное снижение амплитуды или количества пиков регистрируемых сигналов. Это явление подобно тому "запиранию" и последующему восстановлению сигналов, которое было обнаружено в МПС с остаточными газами и парами.

В шестой главе приведены результаты сравнительных исследований ЭПГИ на МПС диэлектриков. Ионный источник со скользящим разрядом по диэлектрику для масс-спектрометра был впервые предложен в 1983 году (Л.Н.Галль, П.Н.Дашук, Н.В.Краснов и др.). Однако, недостаточность имевшихся данных о физике процессов на разрядной поверхности диэлектрика, параметрах масс-спектра экстрагируемых потоков частиц и особенностях использования различных диэлектриков сдерживала развитие этого направления. Разработанный (Главы 1-5) способ ЭПГИ был впервые применен для изучения процессов на подложках из диэлектриков-полимеров (полиэтилен, парафин) и пьезодиэлектрика (кварц), и их сравнительного анализа. Использовались два типа разряда: поверхностный (с тангенциальным электрическим полем) и скользящий (с нормальной к поверхности компонентой электрического поля). Различные материалы диэлектриков и способы реализации ЭПГИ выбраны с целью получения более широкого комплекса данных, необходимых для интерпретации явления генерации ионов. Методом экстракции ионов с применением гониометра и времяпролетного МС анализа получен комплекс внутриимпульсных динамических и угловых характеристик масс-спектра десорбированных ионов. С помощью методов МСА на различных образцах

(неиспаряемых пьезодиэлектриках и испаряемых полимерах) выявлены общие закономерности, в том числе подобие характеристик двух стадий разряда. Десорбционный механизм играл существенную роль, по-видимому, на начальной стадии, - инициировании разряда, или в режиме коротких импульсов и малого тока. Переход в плазменный режим на второй стадии проявлялся в изменении состава потока, возрастали фрагментация молекул и разбросы по энергии в ансамбле частиц. Коэффициент ионизации в этом режиме существенно возрастал, достигая значений порядка  $10^{-3}$ . Плотность ионного тока была пропорциональна току разряда при умеренной мощности импульса, и значительно возрастала на испаряемых диэлектриках. Угловая расходимость ионных потоков пропорциональна их интенсивности и обусловлена, по-видимому, действием собственного электрического поля частиц. Генерация ионов в скользящем разряде отличалась большей эффективностью. Длительность первой стадии не превышала 200-300 нс на кварце, достигала 10 мкс на полиэтилене, и снижалась на 30-50 % при нанесении парафина. В начальной, высоковольтной стадии преобладали легкие ионы на фоне электронной лавины, а вторая отличалась генерацией плазмы, повышенным динамическим сопротивлением, протеканием менее подвижных тяжелых ионов. Вероятно, возможное возбуждение ультразвуковой волны на первой стадии оказывает интенсифицирующее действие на десорбцию частиц из МПС. Эти данные представляют, по-видимому, интерес для развития физических представлений о фазовых переходах в МПС на диэлектриках, а также их использования в ИИМС и ЭВП.

**Седьмая глава** посвящена обобщению экспериментальных результатов и разработке полуэмпирической физической модели, с помощью которой эти результаты получили единую теоретическую интерпретацию. Рассмотрены следующие основные стадии сценария генерации ионов: формулировка исходного состояния системы, передача потока энергии в образец и ее трансформация в нем, осуществление акта десорбции, перестройка поверхностного состояния, формирование зарядового состояния в ансамбле частиц.

В исходном состоянии МПС адсорбат, образованный при осаждении остаточных газов и паров, а также при осаждении проб, имеет обычно многослойную неупорядоченную структуру с широким спектром атомных и многоатомных агрегаций, энергий и типов их связей между собой и с поверхностью.

В основе механизма десорбции рассматривается взаимодействие адсорбированных частиц с выходящими на поверхностные уровни "горячими" электронами проводимости, а также с акустическими фононами. При поступлении электрической энергии в образец тангенциальное электрическое поле в приповерхностном слое металлов и полупроводников

достигает  $10^2$  В/см, а диэлектриков –  $10^3 - 10^5$  В/см. При плотности потока мощности порядка  $10^6 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> температура электронов в зоне проводимости электропроводящих образцов растёт на начальной стадии со скоростью  $10^{10} - 10^{12}$  К/с, процессы десорбции - нетепловые. При длительности процесса  $10^{-8} - 10^{-7}$  секунды скачок локальной температуры электронного газа в области протекания тока составит до  $10^3$  К. Остаточный после импульса скачок температуры образца в целом не более 1–10 К. Плотный электронный поток, взаимодействующий с твердотельным образцом, инициирует возбуждение потока акустических фононов в виде поверхностной акустической волны (ПАВ), или ультразвуковой волны (УЗВ), выходящей на поверхность. Возможные факторы нарастания таких волн- пондеромоторные силы, термомеханические напряжения, акустоэлектронный эффект.

Основными процессами, лежащими в основе стимулированной десорбции на ЭТ представляются захват эмиттируемых медленных термоэлектронов адсорбатом на поверхностных уровнях и сценарий МГР (Менцель-Гомер-Редхед): ускорение образованных отрицательных ионов к поверхности за счет взаимодействия с зарядом изображения, их частичная нейтрализация и десорбция. Подобный сценарий возможен также как одна из составляющих процесса десорбции на металлах и полупроводниках. На диэлектриках электроны, вышедшие на поверхность из границ электродов, быстро набирают энергию в тангенциальном электрическом поле, достаточную для ударной ионизации. Поэтому на поверхности диэлектриков процессы десорбции, развитые в начальной фазе импульса, быстро сменялись явлениями генерации плазмы. В отличие от металлов и полупроводников, где малы перепады значений потенциала вдоль поверхности и тепловая волна быстро уходит вглубь, на диэлектриках сильны эффекты зарядового потенциала и низкой теплопроводности.

Интерпретируя установившееся состояние МПС, “запирание” и восстановление десорбции можно связать с изменениями состояния приповерхностных слоев адатомов, примесей и дефектов. В установившемся после серии импульсов десорбции состоянии адсорбат имеет более упорядоченную структуру преимущественно с высокими значениями энергии связи, т.е. переходит в так называемую «прочную поверхностную фазу».

Формирование зарядового состояния частиц определяется обменом электронами в электрическом поле между уходящей частицей и поверхностью, зависящим от параметров их энергетической структуры, а также возбужденного состояния «горячих» электронов. Действие интенсивной УЗВ является катализатором химической ионизации (например, протонирования) и других реакций, в том числе полимеризации пробы, на поверхности.

В **восьмой главе** сформированный комплекс сведений о процессах поверхностной генерации ионов, а также разработанный метод прямой экстракции частиц во времяпролетный анализатор, были применены для изучения процессов генерации ионов в ЭВП. В высоковольтных вакуумных диодах выявлены внутриимпульсная динамика интегрального ионного тока и характеристики накопления и распада компонентов М-Сп, обусловленные десорбцией, а также возможность формирования прочной поверхностной фазы в процессах тренировки и "жестчения". Экспериментально установлено, что стабильность хорошо подготовленных высоковольтных зазоров нарушается относительно редкими (порядка единиц событий в период времени от секунд до часов) пролетами частиц. Спонтанная редкая десорбция переходит в ряде случаев в короткоимпульсный лавинный межэлектродный обмен с высокой частотой освобождения частиц. Введение импульса СВЧ мощности нарушает, как правило, стабильность зазора. Обнаружено явление катодной СВЧ неустойчивости: вероятность развития лавины значительно возрастает, когда высокочастотный импульс действует на отрицательный электрод в зазоре. Рециклинг и высокая распылительная способность ионов влияли на качество ЭП, формируемого в электронных пушках. Предложены рекомендации по повышению качества МАС в ЭВП на основе выбора режимов работы и использования пространственно-неоднородного электрического поля, создаваемого с помощью секционированных, разрезных или резистивных электродов.

В **итоговом заключении** сформулированы важнейшие результаты диссертационной работы. Сделан вывод, что в целом они составляют новое научное направление "Электродинамическая поверхностная генерация ионов", имеющее значительные перспективы научно-технического развития:

1. Создан комплекс электродинамических способов активирующего воздействия ВЧ ИРЭПТ на твердотельные МПС, в результате которого достигается эффективная ЭПГИ, т.е. преобразование атомных и многоатомных частиц из адсорбированного состояния в открытой системе «подложка – адсорбат» в газовую фазу с различными зарядовыми и структурными состояниями. Разработаны и испытаны электродинамические ионные источники с активирующими ПВТ: волноводные, контактные, индукционные, инжекционные, эмиссионные, распылительные, разрядные. Использованы МПС на подложках из металлов, полупроводников, композиционных материалов, диэлектриков.
2. Разработан метод прямой экстракции в МС атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц из вакуумного объема с высокой концентрацией энергии электрических полей и токов, позволяющий определять состав частиц в МПС и активных средах ЭВП.

Сочетание способа ЭПГИ и разработанных методов анализа потока ионов явилось эффективным способом исследований физических процессов в ансамбле адсорбированных и десорбируемых частиц.

3. Обнаружены и изучены физические эффекты генерации атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц, обусловленной активирующим воздействием ВЧ ИРЭПТ на металлические, полупроводниковые, диэлектрические и композиционные подложки многокомпонентных поверхностных структур в вакууме, в том числе выявлены:

- Десорбция отрицательных ионов и нейтральных частиц с поверхности ЭТ в режиме импульсной эмиссии электронов, стимулированная отбираемым током.

- Процесс рециклинга, т.е. приповерхностного переноса атомных и многоатомных частиц по замкнутому циклу, включающему распыление, ионизацию распыленных частиц и их ускорение в электрическом поле, характеризуется при определенных условиях спонтанным нарастанием по типу неустойчивости с интенсивным самораспылением и выходом кластеров. Может служить основой ИИ, а также метода диагностики качества ЭВП.

- Десорбция с электропроводящих поверхностей металлов и полупроводников адсорбированных газов и осажденных молекул, характеризуемая быстрым (безинерционным) отрывом частиц, наличием нейтральной, положительной и отрицательной ионизованных составляющих в эжектированной парогазовой фазе, явлениями формирования прочной поверхностной фазы, матричного усиления выхода макромолекул, наличием корреляции между экспериментальными и известными параметрами масс-спектров частиц.

- Две последовательные стадии импульсной ЭПГИ на МПС пьезодиэлектриков и полимеров, причем состав экстрагируемого потока зависит от времени, типа диэлектрика и от определенного набора контролируемых факторов: плотности потока мощности на поверхность, флуэнса, способа подготовки поверхности.

4. В рабочем объеме ЭВП преобразование в парогазовую фазу атомных и многоатомных ионизованных и нейтральных частиц из поверхностных слоев электродов и изоляторов, обусловленное активирующим воздействием ВЧ ИРЭПТ, является фактором, воздействующим на протекание физических процессов и предельно-достижимые значения параметров и характеристик, в том числе на стабильность высоковольтных зазоров, формирование прочной поверхностной фазы в режимах тренировки, внутриимпульсную динамику ионной компоненты, качество активной среды и электронных пучков.

Генерация ионов при отборе тока термоэмиссии позволяет осуществлять диагностику ЭТ. Приповерхностный рециклинг является основой построения ИИ с интенсивным

самораспылением, а также метода диагностики качества ЭВП. Представляется, что метод ЭПГИ имеет перспективы аналитического применения в диагностике поверхности и масс-спектрометрии. Полученные знания могут оказать положительное воздействие на расширение имеющейся научной базы, развитие физических представлений в смежных областях науки, например, в области экологии и медицины [59-62], а также таких технологий, как микроэлектроника, техника ЭВП, ИИ и МС.

**Список основных публикаций по теме диссертации:**

1. Цыбин О.Ю. Свободные кластеры и малые частицы в электронных вакуумных устройствах. /Проблемы физической электроники. Л., ФТИ АН, 1989г., с.94-118.
2. Цыбин О.Ю. Многоатомные агрегации в электронных вакуумных приборах. Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов, СГУ, 1989, с.98-105.
3. Цыбин О.Ю. Фундаментальные исследования в области ионной физики и их прикладные применения. Материалы 3й Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”, 10-11 июня 1999 года, СПбГТУ, СПб, 1999, с.86-87.
4. Цыбин О.Ю. Многокомпонентные ионизованные среды в электронных высоковакуумных устройствах. Материалы 5й Всероссийской научно-технической конференции "Фундаментальные исследования в технических университетах", 8-9 июня 2001 года. СПбГТУ, СПб, 2001, стр. 120.
5. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование характеристик активной среды в электронно-оптической системе гиротронного типа. В сб.: Физика и диагностика компонентов и активных сред электроники., Труды СПбГТУ, № 436, 1991г., с.39-42.
6. Лукша О.И., Цыбин О.Ю.. Исследование образования вторичных атомных частиц на катоде электронной пушки. Десятая конференция по взаимодействию ионов с поверхностью. М., МИФИ, 1991г., том 2, с.31-32.
7. Лукша О.И., Цыбин О.Ю.. Исследование эмиссии атомных частиц с поверхности термокатода электронной пушки. ЖТФ, №10, 1992, с.154-159.
8. Лукша О.И., Цыбин О.Ю.. Ионная диагностика поверхностей эффективных термоэммитеров в мощных ЭВП. Научн.приборостр. РАН, СПб., т.2. №4, 1992, с. 35-42.
9. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Диагностика поверхности эффективных термоэммитеров в электронных вакуумных приборах. Вакуумная техника и технология. Т.1., 1993. С.75 - 87.
10. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Пространственно-временная структура электронного потока в электронно-оптической системе гиротронного типа. Лекции по СВЧ электронике и радиофизике, 9 -я зимняя школа-семинар, Саратов, СГУ. 1993г., с.20-29.

11. Цыбин О.Ю. Влияние кластеров на процессы в структуре электронный поток-поверхность. ЖТФ, 1989, т.59, №3, с.208-210.
12. Малышкин В.Г., Цыбин О.Ю. Расчет прикатодного массопереноса в сильноточном диоде с учетом ионного распыления. Тезисы докладов 8 Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Свердловск, УрО АН, 1990г., ч.1, с.178.
13. Tsybin O. Yu. Polyatomic Aggregation Dynamic Effects in Ionized Active Medium of Vacuum Tubes. Intern. Conference on Phenomena in Ionized Gases. Pisa, Italy, 1991, p. 899.
14. Петров Д.Р., Цыбин О.Ю. Вторичные процессы в МИП. “ Диагностика поверхности ионными пучками”. Тез. Докл. семинара- Донецк, 1988г., с.174.
15. Петров Д.Р., Цыбин О.Ю. Вторичные процессы при формировании электронного потока в магнетронно-инжекторной пушке. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. Вып. 10 (434), 1990 г., с.34-36.
16. Лукша О.И., Цыбин О.Ю., Шешко О.Л. Применение магнетронно-инжекторной пушки для исследования процессов ионного распыления поверхности твердого тела. Диагностика поверхности ионными пучками. Всесоюзн. семинар: Тезисы докладов.- М., 1990.- С.210.
17. Лукша О.И., Цыбин О.Ю., Шешко О.Л. Анализ вторичных частиц при бомбардировке поверхности молибдена комплексом ионов остаточного газа. Всесоюзн. Конф. по эмисс. электронике: Тез.докл.- Л., 1990.- Т.2.-С.180.
18. Цыбин О.Ю. Анализ прикатодного циклического процесса с ионным распылением поверхности. Десятая конференция по взаимодействию ионов с поверхностью. Москва, МИФИ, 1991г., том 2, с.120-121.
19. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование образования вторичных частиц при взаимодействии ионов с поверхностью электродов в мощных электронных вакуумных приборах. Всесоюзный семинар по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии: Тез.докл.- Харьков, 1991.- С.67-68.
20. Цыбин О.Ю. Способ получения мелкодисперсных частиц вещества в электронном вакуумном приборе. А.с.№1547596, приоритет от 1 июля 1987 года, рег. 1.11.89г.
21. Ганичев Д.А., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Наблюдение эмиссии ионов в сильных СВЧ полях.- 21я Всесоюзн. Конф. по эмиссионной электронике. Тез.докл. Л., 29-31 января 1991 г., Т.1, с.261.
22. Тиранов Б.Л., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Пороговые условия эмиссии частиц с поверхности металла при воздействии СВЧ скин-тока. 7-я Всес. Конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. - Харьков, 26-28 сентября 1989 г., с.273.

23. Ганичев Д.А., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Масс-спектрометрическая регистрация ионов, образующихся в сильном электрическом поле. Тр. СПбГТУ, № 436, 1991г., с.37-39.
24. Лукша О.И., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Вторичные частицы и ограничивающие явления в высокочастотных вакуумных релятивистских устройствах. Лекции по СВЧ электронике и радиофизике, 9 -я зимняя школа-семинар, Саратов, СГУ. 1993г., с.45-56.
25. Козлов Б.Н., Пилюгин И.И., Щебелин В.Г., Яковлев А.В., Тиранов Б.Л., Цыбин О.Ю. Десорбция нейтральных частиц с поверхности металла, инициированная импульсом тока в скин-слое. 21я Всесоюзн. Конф. по эмиссионной электронике. Тез.докл. Л., 1991 г. с.38.
26. Цыбин О. Ю., Мишин М.В. Эффект индуцированной скин-током эмиссии частиц и новые технологии на его основе. Российская научно-техническая конференция “Инновационные наукоемкие технологии для России”, 25-27 апреля 1995г. Тезисы докладов, ч.9, с.46-47, СПб, 1995г.
27. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Исследование процессов эмиссии ионов при индуцировании импульса скин-тока на проводящей поверхности. 2я Международная научно-техническая конференция “Вакуумная наука и техника”, Гурзуф, 1995г. с.23.
28. Мишин М.В., Цыбин О.Ю. Десорбция ионов с поверхности металла при индуцировании импульса скин-тока. Письма в ЖТФ, том 22, вып.4, 26 февраля 1996г., С. 21-24.
29. Цыбин О.Ю., Мишин М.В.. Анализ состава потока частиц на основе эффекта короткоимпульсной десорбции. Вторая Международная конференция по проблемам физической метрологии ФИЗМЕТ 96, СПб, 1996г., с.174-175.
30. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Исследование быстрой динамики десорбции атомов с поверхности металла в вакууме. Фундаментальные исследования в технических университетах . Материалы научно-технической конференции, 16-17 июня 1997г. СПб, СПбГТУ, С.261-262.
31. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Пространственно-временные и масс-спектральные характеристики ионных потоков, десорбируемых с поверхности металла при создании импульса скин-тока. Тезисы докладов 2й Республиканской конференции по Физической Электронике. Ташкент, 3-5 ноября 1999 года, с. 123.
32. Цыбин О.Ю. Источник с поверхностным током для получения потока частиц и тонкопленочная технология. Российские технологии для индустрии.-Сб. тезисов докладов Международного совещания, С-Пб., 29-31 мая 2000 года.СПбГТУ, 2000. С.134-135.

33. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Импульсные ионные источники с поверхностным током. Материалы Всероссийской научно-методической конференции 8-9 июня 2000 года. Санкт Петербургский Государственный технический университет. С.89 - 90.
34. Цыбин О.Ю., Цыбин Ю.О. Физические процессы транспортировки электронов и ионов при электромагнитном возбуждении поверхности металлов и полупроводников. Тезисы докладов 2й Республиканской конференции по Физ. Электронике. Ташкент, 3-5 ноября 1999 года, с. 125.
35. Youri Tsybin, Oleg Tsybin, Per Håkansson. Theoretical Study of Surface Current Induced Ion Desorption. Abstracts of "Desorption 2000" International Conference, Sant - Malo, France, 3-7 September 2000. P. O-26.
36. Oleg Tsybin. Short current-pulse induced ion desorption. Abstracts of "Desorption 2000" International Conference, Sant - Malo, France, 3-7 September 2000. P. P-18.
37. Цыбин О.Ю. Десорбция ионов при воздействии импульсов поверхностного тока на металлические и полупроводниковые образцы в вакууме. Материалы пятнадцатой международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью" - ВИП- 2001, Москва, 2001, Т.1, С.516-519.
38. Цыбин О.Ю., Кравец Н.М., Цыбин Ю.О. Исследование десорбции ионов при воздействии импульсов тока сквозь металлические и полупроводниковые фольги в вакууме. Материалы пятнадцатой международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью" - ВИП- 2001, Москва, 2001, Т.1, С.520-522.
39. Цыбин О.Ю., Цыбин Ю.О., Кравец Н.М. Десорбция ионов при воздействии импульсов поверхностного тока на металлические и полупроводниковые образцы в вакууме. Известия АН, Серия физическая, т. 66, №8, 2002г., с.1296-1305.
40. Engelko V., Giese H., Mishin M., Schalk S., Tsybin O. Investigation of the Composition of an Ion Beam Produced Using a Multy Arc Source. 11<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams, Beams 96, Prague, June 10-14, 1996, p.1107-1110.
41. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Исследование продуктов взаимодействия плазмы с поверхностью полиэтилена методом масс-спектрометрии. Сб.тр. 14-й Международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью". Москва, 1999. Стр 242-244.
42. Цыбин О.Ю., Мишин М.В. Масс-спектр потока ионов при воздействии импульсного скользящего разряда на поверхность полиэтилена. Тезисы докладов 2й Республиканской конференции по Физической Электронике. Ташкент, 3-5 ноября 1999 года, с. 124.
43. О.Ю.Цыбин, М.В.Мишин. Состав ионного потока в источнике с импульсным разрядом по

- поверхности диэлектрика. Известия АН. Серия физическая, т.64, №4, 2000 г., с.758-760.
44. Соминский Г.Г., Цыбин О.Ю. Анализ процессов десорбции и распыления в высоковольтной магнетронной системе. Труды ЛПИ.- 1989.- №429, с.49-52.
45. O.Tsybin, M.Mishin. Skin-current effects on particle production in ultra high frequency vacuum devices. Proceedings of International Conference " Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". May 24-28, 1999, St Petersburg, State Technical University, Russia, p.300-303.
46. Розанов Л.Н., Дубинин Б.А., Цыбин О.Ю. Метрологические характеристики масс-спектрометрического течеискателя ТИ -14. Вакуумная техника и технология. Т.11, №1, 2001г., с. 17 - 22.
47. Цыбин О.Ю. Магнетронно-инжекционная пушка. А.с. №1586447, 15.04.1990г.
48. Цыбин О.Ю., Лукша О.И. Способ настройки электронно-оптической системы прибора магнетронного типа. А.с. № 1586448, 15.04.1990г.
49. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Электронно-оптическая система для СВЧ приборов. А.с. № 1697554, 08.08.1991г.
50. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Электронно-оптическая система гиротронного типа. А.с. № 1686967, 22.06.1991г.
51. Цыбин О.Ю. - Способ создания сильноточного электронного пучка. А.с. №1438591, 15.07.1988г.
52. Нечаев В.Е., Цыбин О.Ю.. Аналитические решения для некоторых нестатических режимов прикатодного потока электронов в скрещенных полях. Десятый семинар по методам расчета электронно-оптических систем, Львов, 1990г., Тезисы докладов, с.109.
53. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование колебаний электронного потока в фокусирующем магнитном поле. Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа. Всесоюзн. Семинар: Тез.докл.- Л., 1990.-С.91.
54. Петров Н.Н., Цыбин О.Ю. Методы и аппаратура научных исследований в физической электронике. СПбГТУ, 1991г., 66 с.
55. Гульбемян Г.Г., Мельников В.Н., Цыбин О.Ю. Диагностика пучка многозарядных тяжелых ионов с помощью распределенной мишени из малых частиц. Сообщения ОИЯИ, Дубна, P9-91-558, 1991г., с. 1-6.
56. Архипов А.В., Лукша О.И., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю.- Способ формирования мишени для диагностики пучков заряженных частиц.-А.с. № 1475470, 22.12.1988г.

57. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Многоатомные агрегации в диагностике ЭВП.- Методы и средства диагностирования изделий электронной техники. Всесоюзн. Конф.: Тез. Докл.- М., 1989.-с.72.
58. Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Применение распределенной мелкодисперсной мишени для анализа структуры электронного потока. Письма в ЖТФ.- 1989.- Т.15., №23.- с.75-78.
59. Цыбин О.Ю., Цыбина М.Л., Маркелов И.М. Способ исследования биологической пробы с поверхности кожи. А.с. № 1772745, рег.01.07.1992г.
60. Цыбин О.Ю. Ионная физика и ее приложения для экологии и медицины. Тезисы докладов 2й Республиканской конференции по Физической Электронике. Ташкент, 3-5 ноября 1999 года, с. 35
61. Мишин М.В., Цыбин О.Ю. Разработка и испытание масс-спектрометра медицинского назначения. В сб. докладов Международной научно-практической конференции “Измерительно-информационные технологии в охране здоровья - Метромед 95” , СПб, СПбГТУ, 1995г., С.69.
62. Цыбин О.Ю., М.В.Мишин. Экспериментальное определение характеристик масс-спектрометра для эколого-медицинских применений. Труды международной научно-практической конференции "Измерительные информационные технологии и приборы в охране здоровья" - МЕТРОМЕД -99, 29 июня - 1 июля 1999 года, СПбГТУ, Санкт-Петербург, 1999, стр. 96-97.