

СТЕПАНОВ Андрей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО ДИОДА
С B_r – МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Ремнев Геннадий Ефимович**

Официальные оппоненты: **Юшков Георгий Юрьевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных источников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Ковивчак Владимир Степанович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела региональных проблем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита диссертации состоится «19» мая 2015 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>

Автореферат разослан: «10» апреля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент **А. В. Кожевников**

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Взаимодействие мощных ионных пучков заряженных частиц с твёрдым телом активно исследуется на протяжении более трех десятилетий. Активно развиваются методы короткоимпульсной имплантации ионов. Особенность данного метода состоит в том, что наряду с имплантацией определенных ионов происходит и отжиг дефектов, образование которых сопровождает ионную имплантацию. Это происходит за счет нагрева поверхностного слоя током, переносимым импульсным ионным пучком, и быстрого охлаждения. Наряду с имплантацией в полупроводниковые материалы этот подход может использоваться и для короткоимпульсной имплантации в металлические материалы, также с отжигом дефектов. Данный режим был использован для синтеза наноразмерных частиц на основе углерода: наноалмазов и карбида кремния. Это направление по модифицированию – изменению свойств материалов мощным ионным пучком (МИП) представляется важным для практического применения источников мощных ионных пучков.

Использование метода короткоимпульсной имплантации для реализации прикладных исследований предъявляет определенные требования к параметрам МИП:

- Величина потока энергии (P) переносимой МИП должна лежать в диапазоне $(10^6 \div 10^7)$ Вт/см²;
- Частота повторения импульсов МИП $(1 \div 10)$ имп/с;
- Максимальный разброс энергии и плотности тока МИП должен быть в пределах $(10 \div 15)$ %;
- Ресурс работы диодной системы не менее 10^4 последовательных импульсов тока.

Наиболее эффективными источниками МИП, применяемыми в методах короткоимпульсной имплантации, являются ионные диоды с B_r – магнитным полем. В связи с этим, представляет научный и практический интерес исследование параметров ионного диода с B_r – магнитным полем с точки зрения определения факторов, влияющих на увеличение стабильности параметров МИП

и повышение ресурса работы диодной системы и частоты следования импульсов МИП.

Цель диссертационной работы: исследование параметров ионного диода с B_r – магнитным полем, направленное на установление основных факторов, приводящих к увеличению частоты следования импульсов тока МИП, повышению эффективности работы ионного диода и повышению стабильности параметров МИП и ресурса работы анодного покрытия.

Задачи работы

1. Экспериментальное исследование влияния конфигурации изолирующего магнитного поля в ускоряющем зазоре ионного диода с B_r – магнитным полем на параметры тока МИП.
2. Экспериментальное установление факторов, ограничивающих частоту следования импульсов тока МИП в диоде с B_r – магнитным полем и пассивным анодом; определение предельной частоты следования импульсов для диапазона рабочих давлений.
3. Исследование параметров ионного диода с B_r – магнитным полем и предварительной наработкой плазмы на анодной поверхности за счет дополнительного отрицательного импульса напряжения, предшествующего основному в диоде с диэлектрическим покрытием.
4. Апробация разработанной диодной системы при короткоимпульсной имплантации ионов углерода в кремниевую мишень. Исследование возможности синтеза наноразмерных частиц на основе углерода.

Научная новизна работы

1. Впервые реализован двухимпульсный режим работы ионного диода с B_r – магнитным полем и диэлектрическим покрытием анода, обеспечивающий генерацию ионного пучка из плазмы, созданной первым плазмообразующим импульсом.
2. Установлено, что при длительности паузы 500 ± 50 нс между передними фронтами плазмообразующего и ускоряющего импульсов напряжения реализуется режим работы плазмонаполненного диода.

3. Определена предельная величина давления остаточных газов в рабочей камере $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. при которой сохраняется генерация МИП ионным диодом с B_r – магнитным полем и диэлектрическим покрытием анода.
4. Путем оптимизации параметров диодной системы и снижения удельного сопротивления покрытия анода, на основе эпоксидного компаунда достигнут ресурс работы данного покрытия 10^4 импульсов при изменении энергии ионного пучка в пределах 15%.
5. Впервые реализован синтез наноразмерных частиц карбидов кремния и наноалмазов при воздействии на кремниевую мишень последовательной серии из более 100 импульсов тока мощного пучка ионов углерода и протонов, с плотностью тока и паузой между импульсами тока, не приводящих к образованию расплава поверхности мишени.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. В двухимпульсном режиме работы ионного диода с B_r – магнитным полем, с длительностью паузы между импульсами 500 ± 50 нс, реализуется режим плазмонаполненного диода с растущим импедансом, характерным для данного типа диодов.
2. Максимальный разброс плотности тока ионного пучка и энергии для ионного диода с B_r – магнитным полем и диэлектрическим анодом в диапазоне давлений остаточных газов от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. лежит в пределах 15 %.
3. Максимальная частота следования импульсов тока МИП в диапазоне давлений остаточных газов ($2 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$) мм. рт. ст. определяется отношением скорости газовыделения с поверхности диэлектрического покрытия анода к скорости откачки объема рабочей камеры.
4. Ресурс работы диэлектрического покрытия на основе проводящего компаунда достигает 10^4 импульсов тока ионного пучка при энергии, переносимой ионным пучком ≤ 50 Дж и значении удельного сопротивления анодного покрытия $\leq 2 \cdot 10^{10}$ Ом·м.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением полученных научных результатов с данными других исследователей. Научные

положения не противоречат существующим данным о закономерностях формирования МИП в диодных системах с внешним магнитным полем.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что определена и доказана возможность работы диодной системы с B_r – магнитным полем при пониженном давлении остаточного газа, достигающем величины $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. Это является важным фактором практического использования импульсных источников МИП. В результате выполнения научно-исследовательской работы разработан ионный диод с B_r – магнитным полем, с помощью которого реализован синтез наноразмерных частиц на основе углерода в поверхностном слое кремния при короткоимпульсной имплантации ионов углерода.

Личный вклад автора

Комплексные исследования влияния магнитного поля на характеристики тока МИП и работы ионного диода с B_r – магнитным полем в режиме предварительной генерации анодной плазмы за счет отрицательного импульса напряжения выполнены автором работы. Автор работы разработал диагностику магнитного поля в области ускоряющего зазора МИД. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сформулированы выводы по работе. При непосредственном участии автора был спроектирован ионный диод с B_r – магнитным полем для проведения экспериментальных исследований. Обработка и анализ полученных данных, а также написание ряда статей были выполнены автором.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на научном семинаре Института физики высоких технологий ТПУ, а также на международных конференциях по сильноточным пучкам заряженных частиц BEAMS'08 (Xi'an, China, 2008 год), на 11-ой конференции по радиационной физике и сильноточной электронике (Томск, Россия, 2006 год), на 15-ой конференции по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2008 год), на конференции Rusnanotech (Москва, Россия, 2009 год) и конгрессе ТПУ (Томск, Россия, 2012 год).

Материалы диссертации опубликованы в 17 печатных работах, из которых – 7 статей в научных реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, 2 патента, 8 статей в сборниках трудов международных научных конференций и симпозиумов.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 90 наименований. Работа изложена на 103 страницах, включает 43 рисунка и 4 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются работы, посвященные методам формирования МИП и их параметрам. Проводится обзор типов диодных систем, их конструктивных особенностей и механизмов работы. Проводится обзор основных требований к магнитному полю для обеспечения магнитной изоляции диодных систем.

Анализ литературных данных показал, что для формирования МИП и их дальнейшего применения в прикладных задачах в основном используют магнитно-изолированные ионные диоды (МИД). Данные диодные системы наиболее изучены теоретически и экспериментально. Генерация анодной плазмы в подобных диодных системах не требует значительного энерговклада. Например, удельный вклад энергии для генерации анодной плазмы в отражательных диодах и пинч-диодах составляет (0,3-1) кДж/г. Среди МИД наиболее эффективными являются ионные диоды с B_r – магнитным полем; эффективность подобных систем независимо от типа анода достигает 60–80 %. Как правило, ионные диоды с B_r – магнитным полем работают при давлении остаточного газа в вакуумной камере ($10^{-4} \div 10^{-5}$) мм. рт. ст.

Ресурс работы ионных диодов с B_r – магнитным полем, независимо от типа анода, ограничен сотнями импульсов без замены основных деталей конструкций. Известно, что в первую очередь ресурс работы ионных диодов с B_r – магнитным полем и пассивным анодом ограничен эмиссионной способностью

диэлектрического покрытия анода. В тоже время для подобных диодов недостаточно изучены факторы (процессы), определяющие предельную частоту следования импульсов тока МИП. Для ионных диодов с газовым анодом частота повторения импульсов может достигать 10 имп/с в цуговом режиме. В ионных диодах с B_r – магнитным полем и пассивным анодом частота повторения импульсов тока МИП, как правило, не превышает 1 имп/с.

Во второй главе представлено описание экспериментального стенда, состоящего из технологического ускорителя мощных импульсных ионных пучков «ТЕМП», источника питания катушек магнитного поля ионного диода с B_r – магнитным полем и диагностического оборудования. Также в данной главе представлены методика измерения индукции магнитного поля в анод – катодном (А-К) зазоре ионного диода и методика измерения импульсного давления в вакуумной камере с помощью ионизационного преобразователя ПМИ-51.

Структурная схема ускорителя «ТЕМП» показана на рис. 1.

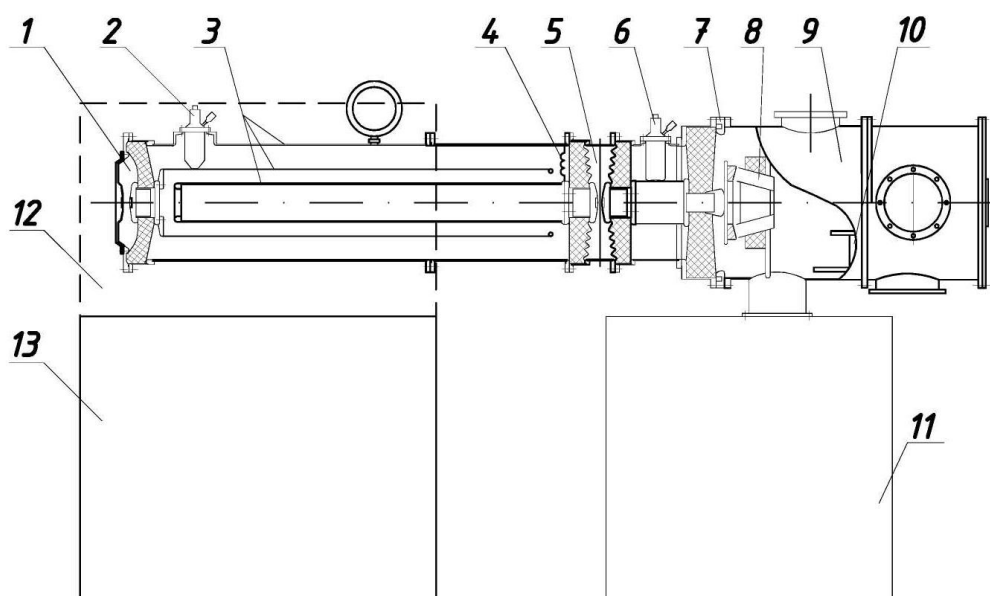


Рис. 1 Структурная схема ускорителя «ТЕМП» (одноимпульсный режим): 1 – основной газовый разрядник; 2, 6 – делители напряжения; 3 – двойная формирующая линия (ДФЛ); 4 – зарядная индуктивность; 5 – предварительный газовый разрядник; 7 – пояс Роговского; 8 – МИД с внешней магнитной изоляцией; 9 – вакуумная камера; 10 – мишенный узел; 11 – вакуумная система; 12 – ГИН Аркадьева-Маркса; 13 – системы газоподготовки и водоподготовки.

Отличительной особенностью данного ускорителя является возможность формирования на ионном диоде униполярных импульсов напряжения положительной полярности либо биполярных наносекундных импульсов напряжения. В режиме биполярных наносекундных импульсов напряжения первый отрицательный импульс напряжения служит для образования взрывоэмиссионной плазмы на поверхности потенциального электрода диода, второй импульс – положительный, является ускоряющим для ионов из образованной плазмы. В случае биполярных импульсов напряжения, пауза между ними формируется за счет задержки срабатывания основного разрядника относительно предварительного разрядника.

Основные параметры ускорителя «ТЕМП» приведены в табл.1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Волновое сопротивление ДФЛ ρ , Ом	5
Частота следования импульсов, имп/с	0,1
Удельное сопротивление деионизованной воды, МОм·см	1÷10
Запасаемая энергия в ДФЛ, Дж	≤ 750
Униполярный режим	
Ускоряющее напряжение, кВ	≤ 250
Длительность импульса ускоряющего напряжения (на полувисоте), нс	100
Длительность фронта импульса ускоряющего напряжения, нс	25
Биполярный режим	
Импульс напряжения отрицательной полярности, кВ	150
Импульс напряжения положительной полярности, кВ	200
Длительность паузы между импульсами, нс	200 ÷ 700

Источник питания катушек магнитного поля формирует импульс тока с длительностью импульса по основанию 280 мкс, амплитуда тока достигает 5,5 кА. Частота следования импульсов составляет 10 имп/с. В течение импульса ускоряющего напряжения амплитуда тока в катушках сохраняется постоянной.

Методика измерения величины индукции результирующего магнитного поля в А-К зазоре МИД основана на измерении электродвижущей силы $U_c(t)$, возникающей при изменении магнитного потока, сцепляющегося с индукционной катушкой. Датчик магнитного поля состоит из двух измерительных катушек, ориентированных взаимно перпендикулярно, что позволяет измерять нормальную $\overline{B}_n$ и тангенциальную $\overline{B}_\tau$ составляющие индукции магнитного поля. Значение индукции магнитного поля вычислялось следующим образом:

$$\overline{B} = \frac{1}{K \cos \alpha} \int_{t_1}^{t_2} U_c(t) dt,$$

где K – постоянная измерительной катушки, равная произведению площади сечения катушки S на число витков N , α – угол между направлением вектора $\overline{B}$ и осью симметрии катушки. Результирующее значение индукции магнитного поля B вычислялось как

$$B = \sqrt{\overline{B}_n^2 + \overline{B}_\tau^2},$$

где $\overline{B}_n$ – нормальная составляющая индукции магнитного поля, $\overline{B}_\tau$ – тангенциальная составляющая индукции магнитного поля. Взаимное влияние измерительных катушек друг на друга исключается их взаимно перпендикулярным расположением.

В третьей главе представлено описание ионного диода с B_τ – магнитным полем. Конструкция исследуемого диода характерна для большинства известных диодов с B_τ – магнитным полем, однако имеет некоторые особенности (рис. 2).

В отличие от большинства аналогов эмиссия электронов идет в основном с кромки внешнего катода 2. В этом случае расстояние от кромки внешнего катода 2 до поверхности анода 1 наименьшее и составляет 5 мм, расстояние от кромки внутреннего катода 3 до поверхности анода – 7,5 мм. Анод 1 диода изготовлен из алюминиевого сплава Д16; данный материал обладает низким удельным электрическим сопротивлением. Поверхность анода имеет кольцевые канавки, глубина и ширина которых составляет 1,5 мм и 5 мм, соответственно. Площадь рабочей поверхности анода составляет 120 см². Катоды диода являются

тонкостенными (0,4 мм) и выполнены из немагнитного материала – нержавеющей стали.

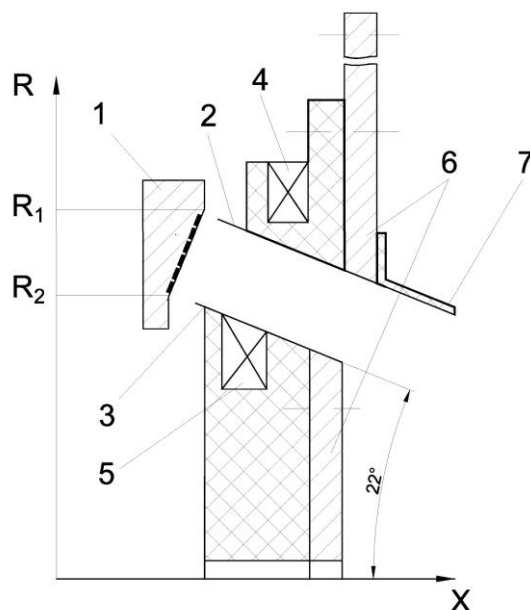


Рис. 2 Конструкция МИД: 1 – анод, 2 и 3 – внешний и внутренний катоды соответственно, 4 и 5 – катушки магнитного поля, 6 – опорный диск, 7 – диэлектрическое кольцо

Также особенностью исследуемого диода является то, что на опорном диске 6 установлено конусообразное диэлектрическое кольцо 7, которое является продолжением катода 2. Часть ионов пучка за счет "кулоновского" расталкивания и рассеяния на молекулах остаточного газа попадают на кольцо 7 (рис. 2), что вызывает вторичную электронную эмиссию и образование плазмы за счет поверхностного разряда. Медленные электроны, вытягиваемые пространственным зарядом ионного пучка из этой плазмы, и вторичные электроны обеспечивают нейтрализацию положительного заряда, тем самым вызывая улучшение транспортировки ионного пучка.

В результате нейтрализации заряда МИП увеличивается плотность тока, измеренная в фокальном пятне на оси симметрии диода (рис. 3а). Распределение плотности энергии по сечению пучка (рис. 3б), исследованное с помощью тепловизионной диагностики, свидетельствует об уменьшении расходимости ионного пучка.

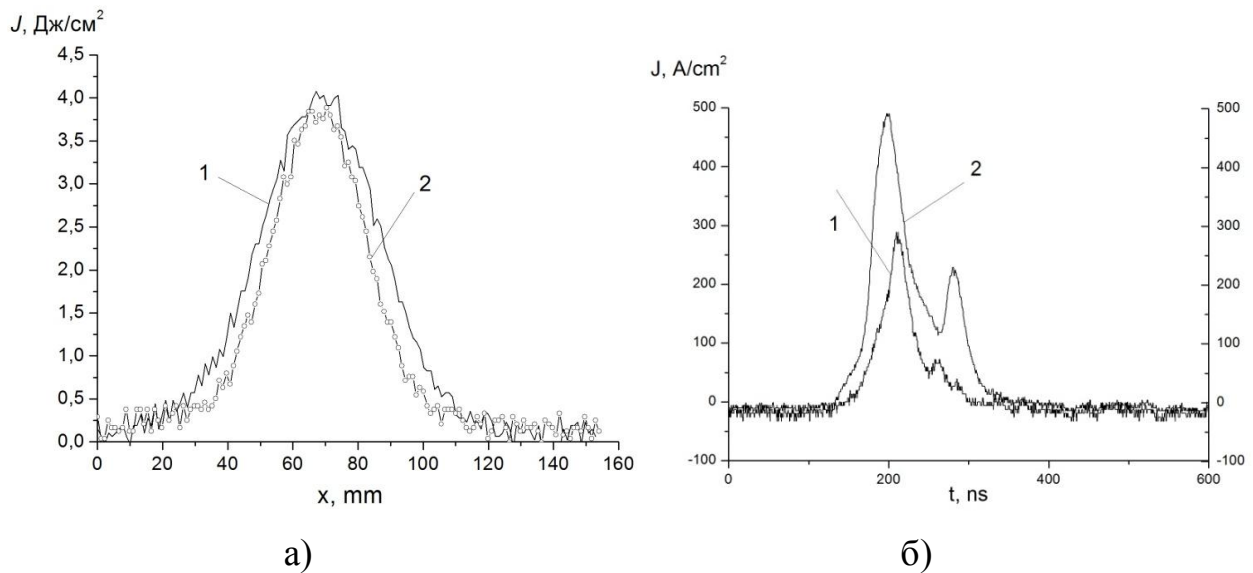


Рис. 3. Распределение плотности энергии по сечению пучка (а), и осциллограммы плотности тока МИП в фокальном пятне на оси симметрии диода (б). Осциллограммы 1 – для диода без диэлектрического кольца, 2 – для диода с диэлектрическим кольцом

Для достижения оптимальных параметров исследуемого диода в данной главе на ускорителе «ТЕМП» были выполнены исследования конфигурации магнитного поля в А – К зазоре диода. Конфигурация магнитного поля задавалась положением катушек относительно поверхности анода и соотношением их ампер-витков. Соотношение ампер-витков катушек изменялось в диапазоне

$$0,44 < IN_1/IN_2 < 0,56,$$

где N_1 – количество витков катушки 4, N_2 – количество витков катушки 5, I – ток в катушках 4 и 5. Изменение соотношения ампер – витков в указанном диапазоне в большей степени влияет на распределение индукции вдоль поверхности анода; в области катодов распределение индукции магнитного поля меняется незначительно (рис. 4).

Вследствие неравномерного распределения индукции магнитного поля вдоль поверхности анода (рис. 4, кривая 3') импеданс диода возрастает до 60 Ом. Увеличение импеданса диода приводит к рассогласованию импедансов диода и ДФЛ, в результате энергия ионного пучка в фокальной плоскости диода снижается до 25 Дж, плотность ионного тока уменьшается до 80 А/см² и эффективность работы диода снижается до 14% (рис. 5).

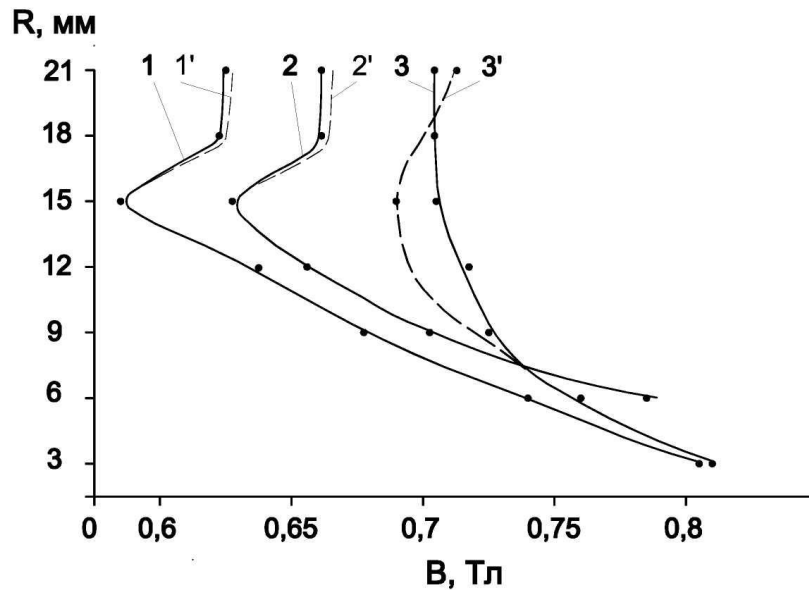


Рис. 4. Распределение индукции B магнитного поля в области А-К зазора: 1 и 1' – у эмиссионных кромок внутреннего катода, 2 и 2' – у эмиссионных кромок внешнего катода, 3 и 3' – на поверхности анода

Оптимальные параметры ионного диода получены в случае равномерного увеличения индукции магнитного поля вдоль поверхности анода с уменьшением его радиуса (кривая 4, рис. 5). В этом случае импеданс диода соответствует значению 10 Ом, и эффективность преобразования энергии диодом достигает 60 % (рис. 5, кривая 3). При этом плотность тока ионного пучка в фокальной плоскости диода максимальна и составляет 350 А/см^2 , энергия ионного пучка достигает значений 150 Дж. На единицу площади рабочей поверхности анода приходится среднее значение энергии $1,4 \text{ Дж/см}^2$.

Таким образом, рассогласование импедансов диода и ускорителя вследствие неравномерного распределения индукции магнитного поля свидетельствует о неэффективном формировании плазменного слоя на поверхности анода, т. е. в этом случае площадь эмиссионной поверхности уменьшается.

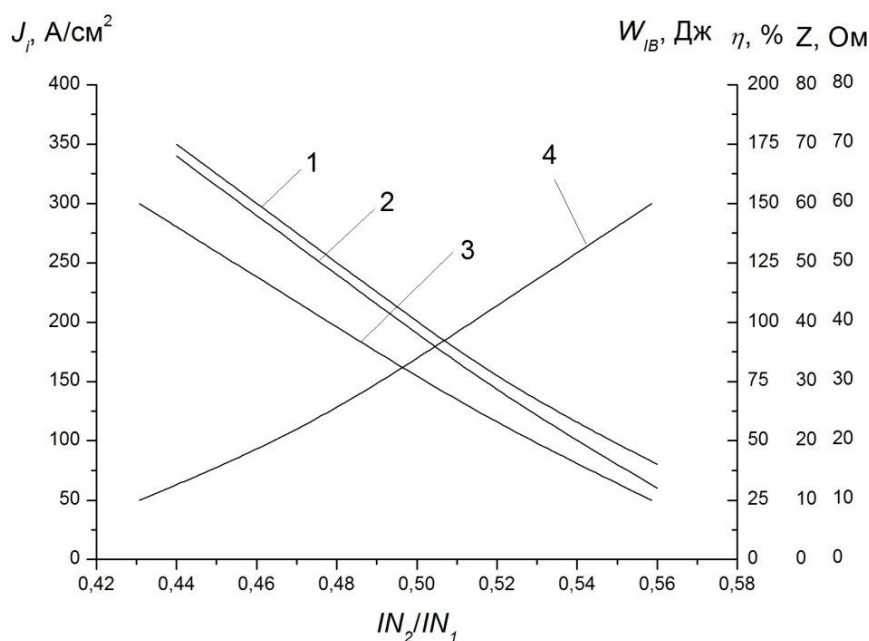


Рис. 5. Зависимость параметров ионного диода от соотношения ампер-витков: 1 – плотность ионного тока, 2 – энергия ионного пучка, 3 – эффективность преобразования энергии, 4 – импеданс диода

Кроме того следствием рассогласования импедансов является колебания энергии между ионным диодом и ДФЛ, что приводит к короткому замыканию А-К зазора диода и возникновению дуговых разрядов, под действием которых наблюдается постепенное разрушение диэлектрического покрытия анода и снижение его ресурса работы. Разрушение диэлектрического покрытия анода в основном наблюдается в области внешнего катода.

Также в данной главе представлены результаты исследований параметров ионного диода при предварительной наработке плазмы в А-К зазоре в режиме биполярных импульсов напряжения наносекундной длительности, с паузой между ними 500 ± 50 нс. Характерные осциллограммы работы МИД в данном режиме приведены на рис. 6. Под действием импульса напряжения отрицательной полярности на аноде диода формируется взрывоэмиссионная плазма, состав которой определяется, прежде всего, материалом диэлектрической вставки анода. Во время действия данного импульса напряжения импеданс диода сохраняет высокое значение, и ток через ионный диод практически отсутствует.

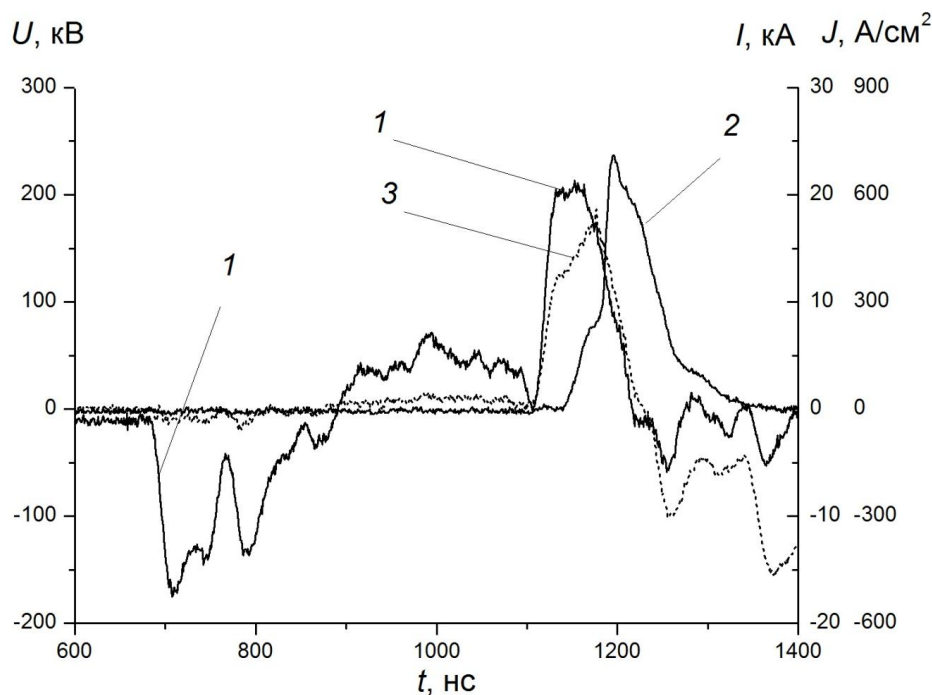


Рис. 6. Характерные осциллограммы МИД: 1 – импульсы высоковольтного напряжения, 2 – плотность ионного тока, 3 – полный ток ионного диода

Во время паузы между импульсами ДФЛ продолжает заряжаться, и под действием зарядного тока на зарядной индуктивности ДФЛ формируется положительное напряжение амплитудой до 50 кВ, рис. 6. Поскольку зарядная индуктивность ДФЛ и ионный диод включены параллельно, ток зарядки ДФЛ частично замыкается через ионный диод (рис. 6, осциллограмма 3). В этом случае импеданс диода сохраняет сравнительно высокое значение, которое превосходит в 4÷6 раз величину импеданса во время основного импульса напряжения (рис. 7). Ток ионного пучка в фокальной плоскости диода в паузе между импульсами не зарегистрирован.

Согласно поведению импеданса диода, к моменту формирования переднего фронта ускоряющего напряжения на аноде, А-К зазор заполнен плазмой, и в начальный момент времени диод работает в режиме короткого замыкания. Об этом свидетельствует увеличение импеданса диода от нулевого значения до 17 Ом со скоростью 0,6 Ом/нс (рис. 7). Подобное поведение импеданса диода, а также задержка появления плотности ионного тока на время роста импеданса (рис. 6, осциллограмма 2), характерны для работы плазмонаполненного диода.

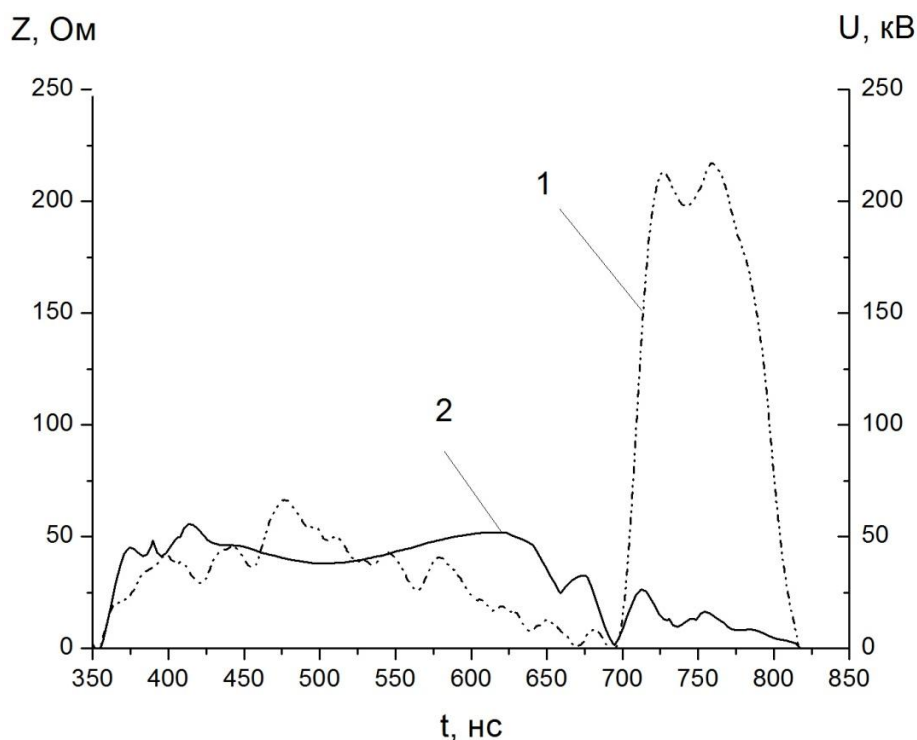


Рис. 7. Ускоряющее напряжение (1) и импеданс диода (2) в паузе между импульсами

Таким образом, предварительная наработка плазмы на аноде диода с B_r – магнитным полем за счет импульса напряжения отрицательной полярности позволяет увеличить эффективность диода до 65 % и значительно повысить плотность ионного тока.

В четвертой главе представлены результаты исследований ресурса работы диэлектрических покрытий и параметров диода с B_r – магнитным полем при частоте следования импульсов тока МИП 1÷6 имп/с. Экспериментальные исследования были выполнены на импульсном наносекундном ускорителе ТЭУ – 500.

При формировании МИП диэлектрическое покрытие анода подвергается радиационному воздействию, которое сопровождается нарушением структуры материала диэлектрика и изменением его физических и химических свойств. В связи с этим в ходе исследований ресурса работы различных диэлектрических покрытий контролировалось их удельное электрическое сопротивление. Удельное сопротивление образцов предварительно измерялось при постоянном напряжении

2,5 кВ и комнатной температуре 25°C (таблица 2). Первоначальное значение энергии МИП для каждого из покрытий составляло 90 Дж.

Таблица 2

Материал покрытия	Начальное удельное сопротивление ρ , Ом·м	Конечное удельное сопротивление ρ , Ом·м
Эпоксидный компаунд+FeSO ₄ ×7H ₂ O	$\sim 2 \cdot 10^{10}$	$> 1 \cdot 10^{13}$
Эпоксидный компаунд	$1 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{13}$
Полиэтилен	$5 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{13}$

Результаты исследований покрытия на основе эпоксидной смолы показали, что первоначальный уровень энергии МИП сохраняется, как правило, в течении пятидесяти импульсов, и в течении последующих ~ 150 импульсах энергия ионного пучка постепенно снижается до 20 Дж. При осмотре анодного покрытия разрушение диэлектрика не наблюдалось, однако было заметно изменение цвета поверхности от светло-желтого до темно-коричневого. Ресурс полиэтиленового покрытия был сравним с ресурсом анодного покрытия на основе эпоксидной смолы; после ~ 200 импульсов тока МИП поверхность полиэтиленового покрытия «вскипала».

Добавление в анодное покрытие на основе эпоксидного компаунда железного купороса (FeSO₄×7H₂O) в объемном соотношении 1:1 позволило уменьшить удельное электрическое сопротивление до уровня $\sim 2 \cdot 10^{10}$ Ом·м. Для данного покрытия, в серии из 200 импульсов энергия МИП сохранялась на уровне 90 Дж, при этом эффективность преобразования энергии диодом сохранялась на уровне 0,6.

Ограничение ресурса диэлектрических покрытий, при отсутствии короткого замыкания А-К зазора, вероятно связано с первоначально высоким удельным сопротивлением покрытий. При попадании электронов на диэлектрическое покрытие происходит накопление заряда, пробой диэлектрика и его разогрев, в результате чего структура материала разрушается. В результате радиационного воздействия электронов происходит изменение цвета поверхностного слоя

диэлектрика – радиационное окрашивание. Таким образом, для обеспечения высокого ресурса диэлектрического покрытия необходимо создание устойчивой электрической проводимости диэлектрика для стока заряда и снижения вероятности теплового разрушения.

В результате была уменьшена ширина канавок на поверхности анода с 5 мм до 2,5 мм. И при уменьшении первоначального значения энергии до ≤ 50 Дж, за счет увеличения индукции магнитного поля и увеличения А-К зазора, ресурс работы покрытия на основе эпоксидного компаунда и железного купороса составил 10^4 импульсов тока МИП. Во время работы ионного диода, цвет поверхностного слоя данного покрытия изменялся от синего до светло-коричневого.

Результаты предварительных исследований показали, что во время работы ионного диода с B_r – магнитным полем давление в вакуумной камере возрастает. При формировании одиночного импульса тока МИП давление в вакуумной камере увеличивается от $1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. до $(6 \div 8) \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. В ходе исследований установлено, что основным источником газов (пара) при генерации МИП является диэлектрическое покрытие. Вклад таких факторов, как пары материала катодов при генерации электронного пучка и высыпание электронов на поверхность конструкций диода незначителен. Испарение загрязнений с поверхности катодов и калориметра при воздействии МИП было несущественно. Выделение газа не связано с величиной плотности тока МИП внутри катодной полости и повторялось от выстрела к выстрелу в серии импульсов, что не характерно для газоотделения при испарении загрязнений с металлических поверхностей. На основании данных об амплитуде импульсного давления в рабочей камере было оценено количество выделяющихся молекул газа, которое менялось от $2 \cdot 10^{18}$ до $2 \cdot 10^{19}$ частиц за импульс в зависимости от условий эксперимента. Выделение газообразных продуктов обусловлено формированием плазмы на поверхности анода и нагревом диэлектрической поверхности анода ионного диода.

Результаты исследований изменения давления в рабочей камере в серии импульсов с частотой следования от 1 имп/с до 3 имп/с показано на рис. 8, диэлектрическое покрытие анода – полиэтилен. Амплитуда давления в серии импульсов в указанном диапазоне частот изменялась от $2 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. до $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. В ряде экспериментов импульсный выход газа сопровождался сильным увеличением давления до $\gg 1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. (на рис. 8а указано стрелкой), что объяснялось возникновением дуговых разрядов при коротком замыкании А-К зазора диода при срабатывании ускорителя в отсутствии магнитной изоляции. Необходимо отметить, что в серии импульсов среднее значение давления в камере оставалось постоянным, и к моменту очередного импульса тока МИП давление в камере восстанавливалось, его уровень соответствовал $2 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.

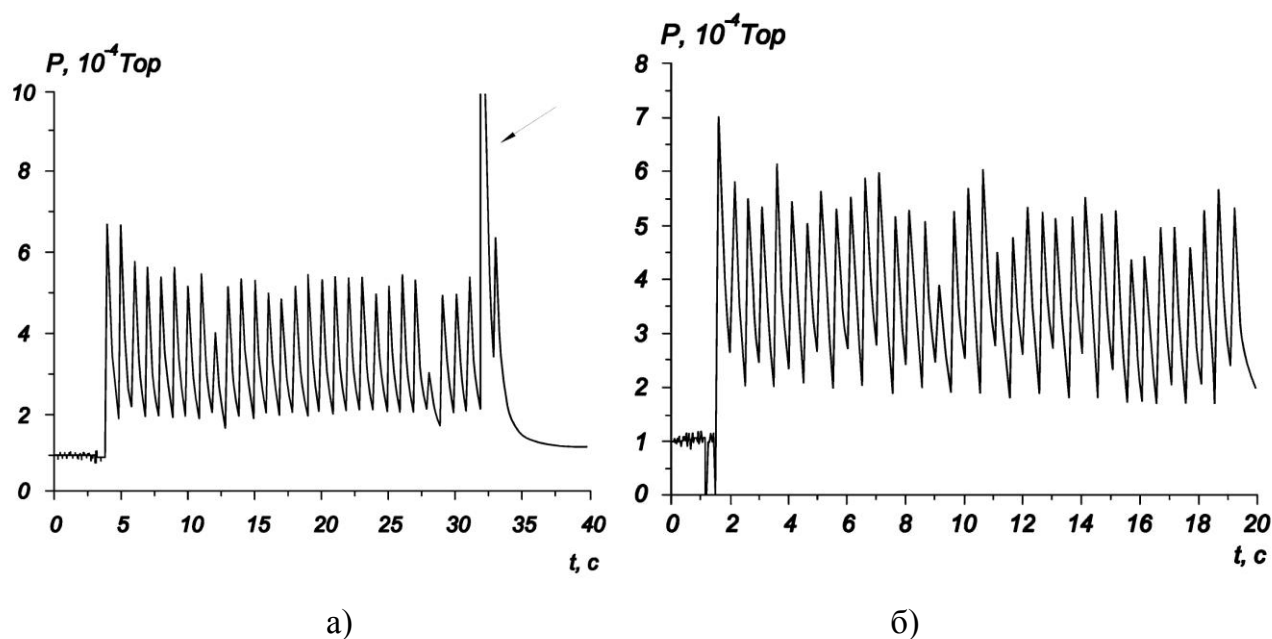


Рис. 8. Изменение импульсного давления в рабочей камере в серии импульсов а) с частотой повторения 1 имп/с, б) с частотой повторения 3 имп/с

При работе ионного диода в диапазоне частот (4÷6) имп/с давление в камере увеличивалось от $2 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. до $2 \cdot 10^{-2}$ мм. рт. ст., рис. 9. При величине давления в вакуумной камере $> 1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. наступал электрический пробой А-К зазора диода, в результате чего диэлектрическое покрытие анода разрушалось. Ресурс работы диэлектрического покрытия в данном случае был ограничен 20÷30 импульсами.

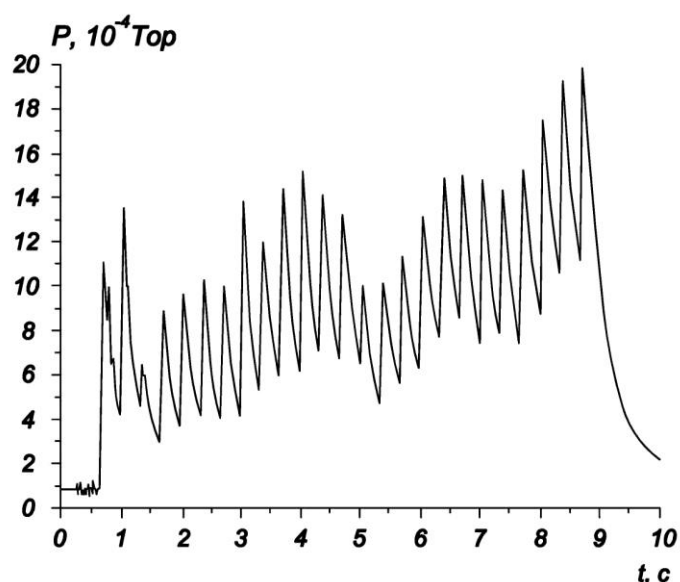


Рис. 9. Изменение импульсного давления в рабочей камере в серии импульсов с частотой ≥ 4 имп/с. Диэлектрическое покрытие анода – эпоксидная смола

Таким образом, при частоте работы ионного диода с B_r – магнитным полем до 3 имп/с диапазон изменения давления в рабочей камере сохраняется постоянным, т. е. при данной частоте скорость выделения газа в вакуумной камере не превышает скорость откачки.

Также были выполнены исследования стабильности энергии и плотности тока МИП при работе диода в длительном режиме на частоте (1÷3) имп/с, рис. 10. Давление в серии импульсов изменялось в диапазоне от $(2 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3})$ мм. рт. ст. Энергия МИП измерялась с помощью калориметра следующим образом. Измерялась полная энергия каждой серии из тридцати импульсов, затем вычислялось среднее значение энергии в каждой серии и для полученных значений определялась их стабильность. Среднее значение энергии было равно 90 Дж, среднее значение плотности ионного тока 55 A/cm^2 . При длительной работе диода стабильность энергии и плотности ионного тока сохранялась в пределах 15 %. Влияние величины давления на энергию ионного пучка в указанном диапазоне частот не наблюдалось. Полученный результат говорит о том, что энергия и плотность тока МИП не зависят от величины давления при его изменении в указанном диапазоне.

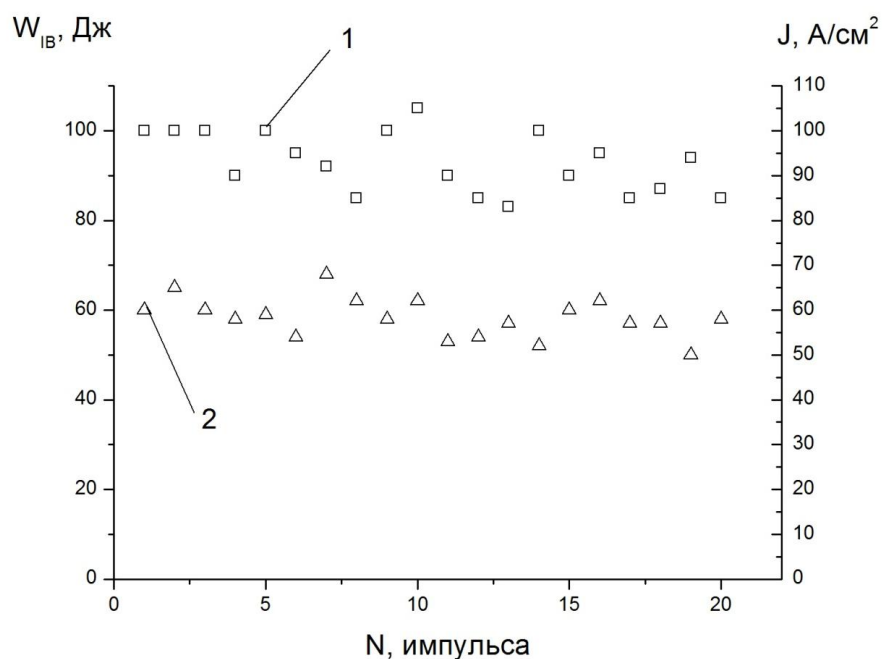


Рис. 10. Зависимость энергии, переносимой МИП (1) и плотности тока МИП (2) от числа импульсов. Диапазон давления ($2 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$) мм. рт. ст.

Максимальная частота работы ионного диода соответствовала 3 имп/с. При данной частоте работы пороговое давление, при котором характеристики МИП менялись незначительно, соответствовало значению $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Проведенные эксперименты позволили выбрать режимы работы ионного диода с B_r – магнитным полем, необходимые для короткоимпульсной имплантации ионов углерода в кремниевую мишень. Ионный диод имел следующие параметры: ускоряющее напряжение 300 кВ, плотность тока МИП была ниже порога плавления материала мишени и составляла 30 A/cm^2 . При этом доза в импульсе была $\sim 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Число импульсов варьировалось от 1 до 500. Разброс параметров МИП (плотности тока и энергии ионов) от импульса к импульсу не превышал 15 %. Состав пучка включал наряду с ионами углерода до 50 % ионов водорода. Остаточное давление в вакуумной камере $1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.

В качестве мишени использовались пластины из монокристаллического кремния с плоскостью среза (111). Для анализа мишени использовались рентгенографический метод в геометрии скользящего пучка (дифрактометр фирмы Shimadzu XDR600 на $\text{CuK}(\alpha)$ -излучении), фотолюминесценция

поверхностных слоев кремниевых мишеней и просвечивающая электронная микроскопия. Данные рентгенографического анализа, с учетом того, что глубина анализа составляет 5– 6 мкм, а глубина проникновения ионов углерода в Si мишень составляет около 1 мкм, свидетельствуют о появлении поликристаллического образований SiC и нанодиазмов в поверхностном слое мишени.

В таблице 3 приведены результаты рентгенографических исследований для образцов кремния, облученных 1, 10, 100 и 500 импульсами ионного пучка.

Таблица 3

Число импульсов	Обнаруженные фазы	Содержание фаз в поверхностном слое, %	Параметры решетки, Å	Размеры ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
1	Si(111)	100			
10	Si(111)	> 90	a = 5,429		
	SiC	следы	a = 3,0988 c = 15,017		
100	C - нанодиазм	следы	a = 3,5625		
	Si(111)	70	a = 5,429	> 500	0,1
	SiC	20	a = 3,0988 c = 15,017	12	3
500	C - нанодиазм	10	a = 3,5625	8	5
	Si(111)	50	a = 5,429	70	1
	SiC-moissanite	24	a = 3,0988 c = 15,017	16	8,9
	C - нанодиазм	26	a = 3,5625	9	6

Из таблицы видно, что в поверхностном слое мишени образуются два типа соединения SiC и синтетический нанодиазм. При возрастании числа импульсов воздействия до 100 поверхностный слой кремниевой мишени переходит из монокристаллического состояния в поликристаллическое. Дальнейшее увеличение числа импульсов приводит к повышению доли данных веществ в поверхностном слое мишени и росту размеров кристаллитов SiC и нанодиазмов.

В заключении диссертации сформулированы **основные результаты и выводы по работе.**

Основные результаты и выводы работы

1. Установлено, что нарушение равномерного распределения индукции магнитного поля вдоль поверхности анода приводит к рассогласованию импедансов диода и ДФЛ, и снижению ресурса работы диэлектрического покрытия;
2. Показано что нарушение равномерного распределения индукции магнитного поля вдоль поверхности анода приводит к снижению эффективности ионного диода с 60 % до 14 %;
3. Установлено, что основным источником газоотделения в МИД является диэлектрическое покрытие анода;
4. Максимальная частота повторения импульсов МИД определяется максимальным давлением, при котором параметры МИП сохраняются или меняются в пределах 15 % и соотношением скорости откачки и скорости газовыделения в А-К зазоре;
5. В двухимпульсном режиме работы ионного диода с B_f – магнитным полем и диэлектрическим покрытием анода, при длительности паузы 500 ± 50 нс между передними фронтами плазмообразующего и ускоряющего импульсов напряжения, реализуется режим работы плазмонаполненного диода.
6. Показано, что в сравнении с ионным диодом с «пассивным» анодом использование дополнительного импульса напряжения отрицательной полярности для наработки плазмы позволяет увеличить эффективность диода до 65 %;
7. Установлено, что предельная величина давления в вакуумной камере, при которой параметры МИП сохраняют стабильность на уровне 15 %, составляет $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.;
8. Использование разработанного диода для короткоимпульсной имплантации ионов углерода МИП в кремниевые мишени в режиме без оплавления поверхности обеспечивает образование наноразмерных частиц SiC в поверхностном слое кремния.

Основные публикации

1. Лопатин В. С., Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Степанов А. В., Макеев В.А. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – N4. - С.70–75.
2. Фурман Э.Г., Степанов А. В., Макеев В.А. Импульсная система питания катушек магнитного поля ионного диода // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – N2. – С.107-111.
3. Фурман Э.Г., Степанов А. В., Фурман Н. Ж. Ионный диод // Журнал технической физики. – 2007. – том 77. – N5. – С.86-95.
4. Степанов А. В., Ремнев Г. Е. Влияние конфигурации магнитного поля ионного диода на параметры ионного пучка // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – N4. - С.1–5).
5. Ремнев Г. Е., Иванов Ю. Ф., Штанько В. Ф., Салтымаков М. С., Степанов А. В., Найден Е. П. Формирование наноразмерных частиц карбида кремния и алмазов в поверхностном слое кремниевой мишени при короткоимпульсной имплантации ионов углерода // Журнал технической физики. – 2009. – том 79. – N4. – С.156-158.
6. Ремнев Г. Е., Степанов А. В., Лопатин В. С. Исследование ионного диода с B_r – магнитным полем и диэлектрическим анодом // Изв. вузов. Физика 6/2. – 2012. – том 55. – С.76–81.
7. Степанов А. В. Патент на изобретение № 2393989 RU, МПК C01B31/06, B82B3/00. Способ синтеза наноалмазов и наноразмерных частиц карбида кремния в поверхностном слое кремния / Ремнев Г. Е., Салтымаков М. С. Заявлено 02.03.2009. Опубликовано 10.07.2007
8. Степанов А. В. Патент на изобретение № 2288553 RU, МПК 8H05H15/00. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией / Исаков И. Ф., Лопатин В. С., Макеев В. А., Ремнев Г. Е., Фурман Э. Г., Тарбоков В. А. Заявлено 26.04.2004. Опубликовано 20.10.2005, Бюл. №33