



Пушкарев А.И., Исакова Ю.И.

# ДИАГНОСТИКА МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Монография

Новосибирск  
2016

УДК 533  
ББК 22.333  
П91

Рецензенты:

*Ковивчак В.С.* кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела региональных проблем Омского научного центра СО РАН;

*Коханенко А.П.* доктор физико-математических наук, профессор радиофизического факультета Томского государственного университета.

ISBN 978-5-4379-0484-8

**Пушкарев А.И., Исакова Ю.И.**

**П91 «Диагностика мощных ионных пучков»:** – Монография. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. – 126 с.

В монографии изложены научные основы диагностики наиболее важных параметров импульсных ионных пучков – плотности ионного тока, плотности энергии, состава ионного пучка. Основное внимание уделено методам анализа мощных ионных пучков, предназначенных для технологических применений. Монография содержит подробный анализ области применения каждого диагностического метода, погрешности, чувствительности и др. Приведен анализ систематических погрешностей для каждого метода при измерении параметров импульсных ионных пучков. Все рассмотренные методики апробированы на разных ионных ускорителях, использующих ионные диоды разного типа - с внешней магнитной изоляцией, магнитной самоизоляцией электронов, с замкнутым и незамкнутым дрейфом электронов, формирующие МИП сложного состава мощностью 6-8 ГВт с концентрацией ионов до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Монография рассчитана на специалистов в области сильноточной электроники, генерации импульсных пучков заряженных частиц. Она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов физических специальностей, в курсах лекций «Физика и техника низкотемпературной плазмы, плазмохимия и плазменные технологии», «Физика и техника мощных пучков заряженных частиц. Радиационно-пучковые технологии модифицирования материалов».

ББК 22.333  
ISBN 978-5-4379-0484-8

© Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., 2016  
© АНС «СибАК», 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. КОРРЕКТНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА</b> .....	9
1.1. Влияние разброса энергии ионов и сложного состава МИП.....	9
1.2. Влияние ускоренных нейтралов .....	11
1.3. Влияние изменения ускоряющего напряжения .....	12
1.4. Локальность диагностики.....	13
1.5. Влияние электронов на нагрев мишени.....	16
1.6. Статистический анализ параметров МИП.....	17
1.7. Влияние перемещения МИП в фокусной плоскости.....	21
1.7.1. Ионный диод с магнитной самоизоляцией.....	21
1.7.2. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией...	25
1.7.3. Диод с замкнутым дрейфом электронов.....	27
1.8. Особенности фокусировки МИП, формируемого диодом с пассивным анодом.....	29
1.8.1. Ионный диод с магнитной самоизоляцией электронов.....	30
1.8.2. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией...	32
1.8.3. Обсуждение результатов.....	34

<b>ГЛАВА 2. ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДИАГНОСТИКА МИП.....</b>	<b>38</b>
2.1. Методика измерения плотности энергии МИП.....	39
2.2. Исследование охлаждения мишени.....	43
2.2.1. Охлаждение за счет теплового излучения.....	43
2.2.2. Учет отвода энергии за счет теплопроводности...	45
2.3. Нагрев мишени электронами.....	50
2.4. Нагрев мишени анодной плазмой.....	57
2.5. Расчет времени прогрева мишени.....	59
2.6. Влияние теплового излучения диода на нагрев мишени.	60
2.7. Разрешающая способность тепловизионной диагностики..	60
2.8. Диагностика МИП с высокой плотностью энергии.....	62
2.8.1. Расчет пороговой плотности энергии.....	62
2.8.2. Использование металлической сетки.....	65
2.8.3. Использование коллимирующего отверстия.....	72
2.8.4. Заключение.....	76
<b>ГЛАВА 3. АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ИОННОГО ПУЧКА.....</b>	<b>81</b>
3.1. Физические принципы акустической диагностики.....	81
3.2. Калибровка акустической диагностики.....	88
3.3. Калибровка методом падающей массы.....	93
3.4. Измерение давления в мишени.....	95

3.5. Измерение распределения плотности энергии МИП.....	98
3.6. Заключение.....	100
<b>ГЛАВА 4. ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ ДИАГНОСТИКА ИОННОГО ПУЧКА.....</b>	<b>101</b>
4.1. Цилиндр Фарадея с магнитной отсечкой электронов.....	102
4.2. Цилиндр Фарадея с электрическим смещением.....	107
4.3. Исследование состава ионного пучка.....	109
4.4. Исследование распределения ионов по энергии.....	117
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>119</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>120</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Научная область, к которой относятся материалы, изложенные в книге – измерение параметров импульсных ионных пучков гигаваттной мощности. В монографии представлен аналитический обзор и результаты тестирования различных методов исследования импульсных ионных пучков, предназначенных для технологических применений – энергия ионов менее 1 МэВ, плотность энергии 0.5–10 Дж/см<sup>2</sup>.

Совершенствование продукции машиностроения затруднено без применения новых технологических процессов, позволяющих повысить ресурс и надежность деталей и узлов в самых жестких условиях эксплуатации. Этим вызвано развитие методов поверхностного упрочнения лазерным излучением, электронным пучком, ионной имплантацией, мощными ионными пучками (МИП) и импульсными потоками плазмы.

Для модификации материалов с высокой теплопроводностью (металлы и сплавы) необходимы импульсные потоки энергии с плотностью энергии 2–3 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса не более 100–200 нс. Увеличение длительности импульса приводит к увеличению толщины прогреваемого слоя облучаемой мишени (за счет теплопроводности) при незначительном росте температуры. Использование сильноточных электронных пучков для модификации материалов требует значительно более высокой плотности энергии из-за большого пробега электронов, превышающего сотни микрон в металлах. Снижение энергии электронов для уменьшения их пробега требует увеличения длительности импульса для достижения необходимой плотности энергии. Например, эффективная очистка газотурбинных лопаток от нагара происходит при воздействии сильноточного электронного пучка с плотностью энергии 40–50 Дж/см<sup>2</sup> (125 кэВ, 30 мкс, ускоритель GESA-4), а при воздействии МИП (200 кэВ, 120 нс, ГЕМП-4М) – с плотностью энергии 3–4 Дж/см<sup>2</sup>.

Воздействие МИП длительностью 100–150 нс и плотностью энергии 1–3 Дж/см<sup>2</sup> обеспечивает нагрев и охлаждение приповерхностного слоя обрабатываемого изделия со скоростью 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> К/с (сверхскоростная закалка), давление при этом достигает (2–6)·10<sup>8</sup> Па (сверхмощная ковка). Толщина такого слоя составляет 1–2 мкм и объемная плотность мощности радиационного воздействия достигает 10<sup>11</sup> Вт/см<sup>3</sup>. Это позволяет получать в поверхностных слоях составы и наноразмерные структуры, недоступные другими методами. В результате улучшаются свойства материалов: твердость, прочность,

износостойкость; повышаются эксплуатационные характеристики изделий из них.

Для измерения параметров мощных ионных пучков с энергией ионов менее 1 МэВ используют тепловизионную диагностику (измерение полной энергии МИП и распределения плотности энергии по сечению), акустическую диагностику (измерение плотности энергии МИП и распределения плотности энергии по сечению), времяпролетную диагностику (измерение плотности ионного тока, состава и энергетического спектра МИП) и спектрометр Томсона (измерение состава МИП).

За последние 30–40 лет в России и за рубежом опубликовано много статей и докладов на конференциях, посвященных генерации и диагностике мощных пучков заряженных частиц. Наиболее полно эти материалы обобщены в монографиях *В.М. Быстрицкого и А.Н. Диденко* «Мощные ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1984» и *S. Humphries* «Charged Particle Beams. Wiley, New York, 1990». С момента выхода этих книг были продолжены исследования. Результаты опубликованы в отдельных работах, что затрудняет оценить современные достижения в области измерения параметров мощных пучков заряженных частиц.

В первой части монографии выполнен сравнительный анализ систематических погрешностей при контроле воздействия на мишень импульсных ионных пучков гигаваттной мощности по плотности ионного тока и по плотности энергии. Показано, что измерение плотности энергии обеспечивает более корректную и полную информацию. Мощный ионный пучок имеет широкий спектр энергии ионов и сложный элементный состав. Измерение плотности энергии МИП позволяет определить интегральное (за длительность импульса) тепловое воздействие всех ионов, не зависящее от их кинетической энергии и степени ионизации.

В монографии представлен аналитический обзор и результаты тестирования тепловизионной диагностики распределения плотности энергии по сечению импульсного ионного пучка гигаваттной мощности. Она также позволяет измерять полную энергию МИП, расходимость МИП при транспортировке до мишени, перемещение ионного пучка в фокусной плоскости в серии импульсов и контролировать режим облучения мишени. Пространственное разрешение составляет 1–2 мм, чувствительность типового тепловизора обеспечивает регистрацию теплового отпечатка за один импульс при плотности энергии выше 0.05 Дж/см<sup>2</sup>. Для корректного использования тепловизионной методики при контроле параметров

МИП выполнен анализ влияния высокоэнергетических электронов, анодной плазмы и др. факторов на нагрев мишени.

В монографии представлен аналитический обзор и результаты тестирования акустической диагностики параметров импульсных ионных пучков. Она позволяет измерять плотность энергии на мишени, оптимизировать работу ионного диода и контролировать режим облучения мишени при высокой частоте следования импульсов. Чувствительность типового пьезодатчика обеспечивает регистрацию МИП за один импульс при плотности энергии выше  $0.5 \text{ Дж/см}^2$ . Тестирование диагностики показало, что при плотности энергии более  $2 \text{ Дж/см}^2$  происходит стабилизация амплитуды сигнала с пьезодатчика из-за плавления поверхностного слоя мишени. Акустическая диагностика не требует дорогостоящих расходных материалов. Время измерения не превышает  $0.1 \text{ с}$ , поэтому ее можно использовать для быстрой оценки плотности энергии МИП с контролем параметров облучения на каждом импульсе при частоте следования до  $10^3 \text{ имп/с}$ .

В монографии представлен аналитический обзор и результаты тестирования времяпролетной диагностики параметров импульсных ионных пучков. Она позволяет определить основные характеристики МИП сложного состава: состав пучка и абсолютные значения суммарного флюенса ионов, флюенса ионов разной массы и кратности ионизации, энергетический спектр каждого типа ионов. При контроле параметров МИП не требуется сложное оборудование и длительная обработка результатов измерений.

Все рассмотренные методики успешно апробированы на разных ионных ускорителях, использующих ионные диоды разного типа – с внешней магнитной изоляцией, магнитной самоизоляцией электронов, с замкнутым и незамкнутым дрейфом электронов, формирующие МИП сложного состава мощностью  $6\text{--}8 \text{ ГВт}$  с концентрацией ионов до  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Предлагаемое издание является первым, в котором обобщены результаты тестирования и оценки погрешности основных методов измерения параметров мощных ионных пучков наносекундной длительности. Монография рассчитана на специалистов в области сильноточной электроники, генерации импульсных пучков заряженных частиц. Она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов физических специальностей, в курсах лекций «Физика и техника низкотемпературной плазмы, плазмохимия и плазменные технологии», «Физика и техника мощных пучков заряженных частиц. Радиационно-пучковые технологии модифицирования материалов».

*Монография*

*Пушкарев А.И., Исакова Ю.И.*

## **ДИАГНОСТИКА МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Подписано в печать 29.09.2016. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 7,875. Тираж 550 экз.

Издательство АНС «СибАК»  
630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 165, офис 4.  
E-mail: mail@sibac.info

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии Allprint  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3