



Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Прима А.И.,
Корусенко П.М., Несов С.Н.

ГЕНЕРАЦИЯ, ДИАГНОСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ

Монография

Новосибирск
2019

УДК 537.5
ББК 22.338
Г340

Рецензенты:

Соковнин С.Ю., ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, профессор;
Ковивчак В.С., старший научный сотрудник сектора наноструктурированных композиционных углеродных материалов Омского научного центра СО РАН, кандидат физико-математических наук.

Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Прима А.И., Корусенко П.М., Несов С.Н.
Г340 «Генерация, диагностика и применение мощных ионных пучков с высокой плотностью энергии»: – Монография;. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. – 106 с.

ISBN 978-5-4379-0617-0

В монографии приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов в ионном диоде, который обеспечивает генерацию импульсных ионных пучков с плотностью энергии 5-10 Дж/см². При этом более половины энергии пучка расходуется на абляцию материала мишени, что позволяет реализовать новый режим модификации образцов – ударно-волновую модификацию. Рассмотрены методы измерения параметров МИП с высокой плотностью энергии и представлены результаты ударно-волновой модификации различных образцов. Монография рассчитана на специалистов в области сильноточной электроники, генерации импульсных пучков заряженных частиц, материаловедения.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 17-79-10140.

ББК 22.338

ISBN 978-5-4379-0617-0

© Авторский коллектив, 2019 г.
© АНС «СибАК», 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ:

Предисловие.....	6
Глава 1. Генерация МИП с высокой плотностью энергии ...	8
Введение	8
1.1. Экспериментальный стенд	10
1.2. Измерение объемного заряда МИП	11
1.3. Фокусировка МИП собственным зарядом	12
1.4. Фокусировка МИП с помощью металлической сетки ..	13
1.5. Использование сетки с отверстием	14
Заключение	14
Глава 2. Повышение эффективности перезарядки ионов в диоде с пассивным анодом	16
Введение	16
2.1. Экспериментальный стенд	17
2.2. Ионный диод без сетки	18
2.3. Ионный диод со сплошной сеткой на катоде	20
2.4. Использование металлической сетки с отверстием	20
2.5. Обсуждение	20
Заключение	23

Глава 3. Расширение диапазона измерения плотности энергии тепловизионной диагностикой	25
3.1. Экспериментальный стенд	25
3.2. Расчет пороговой плотности энергии	26
3.3. Исследование нагрева металлической мишени	27
3.4. Обсуждение	29
Заключение	31
Глава 4. Влияние радиационных дефектов на погрешность тепловизионной диагностики мощных ионных пучков	32
4.1. Измерение плотности энергии МИП	33
4.2. Исследование охлаждения мишени	34
4.3. Обсуждение результатов	36
Заключение	38
Глава 5. Ударно-волновая модификация образцов из сплава ВК8	39
5.1. Исследование морфологии поверхности после облучения МИП	39
5.2. Исследование поперечного шлифа образца ВК8	41
5.3. Исследование элементного состава поверхности	41
5.4. Исследование фазового состава поверхности	41
5.5. Исследования твёрдости поверхности после облучения МИП	43
5.6. Выводы	44

Глава 6. Ударно-волновая модификация функциональных нанокompозитов	45
Введение	45
6.1. Материал и методы исследования	47
6.2. Исследование структуры композитов SnO ₂ -x/N-МУНТ ..	48
6.3. Обсуждение механизмов образования наночастиц Sn/SnO _x	50
6.4. Электрохимические характеристики композитов	51
Заключение	53
Список литературы	55
Приложение.....	63

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научная область, к которой относятся материалы, изложенные в книге – генерация и измерение параметров импульсных ионных пучков гигаваттной мощности. В монографии представлен аналитический обзор генерации, диагностики и применения импульсных ионных пучков, предназначенных для технологических применений – энергия ионов менее 1 МэВ, плотность энергии 0.5 – 10 Дж/см².

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 приповерхностного слоя материалов с высокой теплопроводностью (металлы и сплавы) необходимы импульсные потоки энергии с плотностью энергии более 2-3 Дж/см² при длительности импульса не более 100-200 нс. Увеличение длительности импульса приводит к увеличению толщины прогреваемого слоя облучаемой мишени при незначительном росте температуры. Воздействие импульсного ионного пучка длительностью 100-150 нс и плотностью энергии 2-3 Дж/см² обеспечивает нагрев и охлаждение приповерхностного слоя обрабатываемого изделия со скоростью 10⁸ К/с (сверхскоростная закалка). Толщина такого слоя составляет 1-2 мкм и объемная плотность мощности радиационного воздействия достигает 10¹¹ Вт/см³. 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.

При плотности энергии МИП более 5 Дж/см² происходит интенсивная абляция материала мишени и в обрабатываемом изделии формируются ударные волны отдачи, давление при этом превышает 10⁸ Па [1]. Ударные волны обеспечивают изменение свойств изделия на большую глубину, превышающую 100 мкм для стали. Модификация (сверхмощнаяковка) металлических изделий ударными волнами, формируемыми МИП с плотностью энергии более 5 Дж/см², может обеспечить значительное улучшение их свойств, но малоизучена.

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 сильно-точного электронного пучка с плотностью энергии 40-50 Дж/см² (125 кэВ, 30 мкс, ускоритель GESA-4), а при воздействии МИП (200 кэВ, 120 нс, ТЕМП-4М) – с плотностью энергии 3-4 Дж/см².

В первой части монографии приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов в ионном диоде, который обеспечивает генерацию МИП с плотностью энергии 5-10 Дж/см². При такой плотности энергии ионного пучка более половины его энергии расходуется на абляцию материала мишени, что позволяет реализовать новый режим модификации образцов – ударно-волновую модификацию. Приведены результаты экспериментальных исследований и представлены феноменологические модели фокусировки ионного пучка собственным зарядом, перезарядки ионов и формирования пучка ускоренных нейтралов.

Во второй части отчета рассмотрены методы измерения параметров МИП с высокой плотностью энергии. Рассмотрен новый эффект перегрева мишени при облучении ионным пучком, который обусловлен образованием, миграцией и последующим отжигом быстрых радиационно-индуцированных дефектов в мишени. Этот эффект обеспечивает расширение диапазона измерения плотности энергии МИП с 2-3 Дж/см² до 10-12 Дж/см².

В заключительной части монографии представлены результаты ударно-волновой модификации различных образцов. Выполнены исследования изменения свойств образцов из сплава WC-Co, включающие изучение морфологии поверхности, элементного и фазового состава, анализ поперечного шлифа образца и измерения микротвёрдости поверхности. Также проведены исследования влияния МИП на свойства функциональных нанокompозитов на основе массивов многостенных углеродных нанотрубок.

Предлагаемое издание является первым, в котором представлены результаты генерации, диагностики и применения импульсных ионных пучков с высокой плотностью энергии. 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».

*Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Прима А.И.,
Корусенко П.М., Несов С.Н.*

Монография

ГЕНЕРАЦИЯ, ДИАГНОСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ

Подписано в печать 02.05.19. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 6,625. Тираж 550 экз.

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

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

16+