

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский государственный технологический университет"

*И.Ш. АБДУЛЛИН, В.С. ЖЕЛТУХИН,  
И.Р. САГБИЕВ, М.Ф. ШАЕХОВ*

# **МОДИФИКАЦИЯ НАНОСЛОЕВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

**Монография**

**Казань, 2007**

УДК 533.9:620.5  
ББК 22.333  
А13

**Модификация нанослоев в высоко-частотной плазме пониженного давления: Монография** /И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.Р. Сагбиев, М.Ф. Шаехов; Казан. гос. технол. ун-т. Казань, 2007. 36/ с.

Работа посвящена модификации поверхностного нанослоя металлов, их сплавов, полупроводников, диэлектриков, тонкопленочных покрытий с помощью высокочастотных разрядов индукционного и емкостного типов при пониженном давлении. Описывается физическая и математическая модели модификации поверхности материалов в высокочастотной плазме пониженного давления, а также результаты теоретического исследования закономерностей формирования основных параметров процесса модификации.

Предназначена для широкого круга специа-листов и научных работников, занимающихся вопро-сами физики низкотемпературной плазмы, а также преподавателей, аспирантов и студентов технических вузов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского государственного технологического университета.

Рецензенты: доктор техн. наук *В.В. Кудинов*  
доктор физ.-мат. наук *Ф.М. Гайсин*

ISBN 867,4,6771,/ 442,2

© Казанский государственный технологический университет  
© Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С.,  
Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных обозначений и сокращений.....	3
<b>Введение</b> .....	7
<b>ГЛАВА 1. МОДИФИКАЦИЯ НАНОСЛОЕВ КАК ОДИН ИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ</b> .....	12
1.1. Поверхность твердого тела и ее свойства.....	12
1.2. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии .....	16
1.3. Традиционные методы модификации.....	26
1.4. Электрофизические методы обработки материалов.....	32
1.5. ВЧ-плазма пониженного давления как метод модификации материалов.....	48
1.6. Основные физические процессы взаимодействия плазмы с поверхностями твердых тел.....	53
Литература к 1 главе.....	63
<b>ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧ-РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	81
2.1. ВЧ-плазма и ее свойства.....	81
2.2. Методика и аппаратура для экспериментальных исследований потока плазмы ВЧ-разряда пониженного давления.....	88
2.2.1. Особенности экспериментальных исследований характеристик ВЧ-разрядов пониженного давления с продувом газа.....	96
2.2.2. Аппаратура и методы диагностики ВЧ-разряда пониженного давления .....	0/ /
2.3. Характеристики ВЧ-разряда пониженного давления в процессах обработки материалов.....	129
2.3.1. Энергетические характеристики ВЧ-разряда пониженного давления.....	129
2.3.2. Газодинамические характеристики плазмы ВЧ-разряда с продувом газа.....	135
2.3.3. Тепловое воздействие высокочастотного разряда пониженного давления .....	139
2.3.4. Напряженность магнитного поля.....	142

2.3.5. Плотность тока.....	151
2.3.6. Концентрация электронов.....	156
2.3.7. Характеристики слоя пространственного заряда.....	167
2.4. Проникновение плазмообразующего газа в поверхность обрабатываемого материала .....	176
2.5. Выводы.....	180
Литература ко 2 главе.....	182
<b>ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>184</b>
3.1. Основные этапы численного моделирования ВЧ-разрядов..	185
3.2. Физическая модель обработки твердых тел в высокочастотной плазме пониженного давления.....	199
3.3. Математическая модель высокочастотной плазменной обработки твердых тел при пониженном давлении.....	204
3.3.1. Основные предположения.....	204
3.3.2. Математическая модель квазинейтральной ВЧ-плазмы пониженного давления.....	210
3.3.2.1. Система краевых задач.....	210
3.3.2.2. Необходимые условия разрешимости системы краевых задач.....	218
3.4. Математическая модель слоя положительного заряда возле обрабатываемого тела .....	226
3.4.1. Структура СПЗ у поверхности обрабатываемого тела...	226
3.4.2. Система задач "предслоя" .....	229
3.4.3. Система задач двойного слоя и СПЗ.....	233
3.5. Обсуждение модели.....	235
3.6. Результаты теоретических исследований.....	237
3.6.1. Постановка задачи численного экспериментирования ..	237
3.6.2. Концентрация электронов.....	240
3.6.3. Напряженность магнитного поля.....	241
3.6.4. Напряженность электрического поля.....	243
3.6.5. Температура плазменной струи.....	244
3.6.6. Характеристики процесса обработки твердых тел в высокочастотной плазме пониженного давления.....	245
Литература к 3 главе.....	249

<b>ГЛАВА 4. МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНО- И МИКРОСЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>256</b>
4.1. Материалы и методики исследования взаимодействия плазмы с конструкционными материалами.....	256
4.1.1. Материалы.....	256
4.1.2. Методики исследования взаимодействия ВЧ—плазмы с различными материалами .....	259
4.2. Взаимодействие плазмы с материалами.....	269
4.2.1. Металлы и их сплавы.....	269
4.2.2. Диэлектрики.....	325
4.2.3. Тонкопленочные покрытия.....	333
4.3. Применение ВЧ—плазмы для обработки изделий.....	347
4.3.1. Изделия машиностроения.....	347
Литература к 4 главе.....	362
<b>Заключение.....</b>	<b>364</b>