

МИНОБРНАУКИ РОССИИ



Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

---

Д. К. КОСТРИН А. А. ЛИСЕНКОВ А. И. КУЗЬМИЧЕВ

**ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ  
ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2019

УДК 533.9:621.387

ББК В333я7

К72

**Кострин Д. К., Лисенков А. А., Кузьмичев А. И.**

К72 Ионно-плазменные источники для плазмохимического синтеза функциональных покрытий. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 166 с.

ISBN 978-5-7629-2523-5

Рассмотрены физико-химические особенности технологических процессов распыления графитового катода стационарным вакуумно-дуговым разрядом. Приведены этапы разработки модуля высокоэффективной системы ионно-плазменной очистки диэлектрических нетермостойких подложек потоками быстрых нейтральных частиц. Особое внимание уделено технологиям нанесения функциональных углеродных покрытий на диэлектрические поверхности большой площади.

Издание предназначено для подготовки дипломированных специалистов и магистров физико-технических факультетов вузов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области низкотемпературной плазмы и ионно-плазменной технологии.

УДК 533.9:621.387

ББК В333я7

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. Г. Гудков (МГТУ им. Н. Э. Баумана); д-р техн. наук, проф. Р. М. Степанов (ЦНИИ «Электрон»); АО «Светлана-Рентген» (директор, канд. техн. наук Н. А. Куликов).

ISBN 978-5-7629-2523-5

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ .....	4
1.1. Свойства углеродосодержащих покрытий .....	4
1.2. Технологии формирования пленок $\alpha$ -C, $\alpha$ -C-Me, $\alpha$ -C:H-Me .....	7
1.3. Технологические методы осаждения покрытий .....	8
1.4. Антиэмиссионные и радиопоглощающие покрытия на основе углерода .....	10
2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ С ВАКУУМНО-ДУГОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПЛАЗМЫ .....	12
2.1. Динамика развития катодных пятен .....	15
2.2. Разряд на неочищенной поверхности катода .....	18
2.3. Вакуумно-дуговой разряд с материала катода .....	20
2.4. Эмиссия из катодных пятен .....	22
2.5. Влияние теплового режима работы катода на скорость перемещения катодных пятен .....	28
2.6. Особенности взаимодействия заряженных частиц с поверхностью твердого тела .....	29
3. ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА .....	38
3.1. Особенности распыления графитового катода .....	41
3.2. Перенос распыляемого материала в зоне распыления .....	45
3.3. Осаждение заряженных частиц и формирование покрытия .....	49
3.4. Диффузионные процессы при создании покрытий на основе углерода .....	52
3.5. Основные механизмы диффузионных процессов .....	54
3.6. Технологическая установка для нанесения покрытий с помощью дугового разряда в вакууме .....	57
3.7. Формирование покрытий на основе углерода из плазмы вакуумно-дугового разряда .....	59
4. ПРИМЕНЕНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИОННО-ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ .....	67
4.1. Особенности тлеющих разрядов при низких давлениях .....	67

4.2. Обобщенная модель несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления .....	70
4.3. Энергетические спектры потоков ионов и атомов .....	72
4.4. Характеристики плазменных катодов .....	75
5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕТЕРМОСТОЙКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....	86
5.1. Система предварительного нагрева диэлектрических поверхностей с различными коэффициентами термостабильности .....	87
5.2. Плазменная система для ионной очистки и травления диэлектриков .....	90
5.3. Конструкции источников быстрых нейтральных частиц .....	94
5.4. Физические основы работы источников быстрых нейтралов .....	99
5.5. Управляемый газоразрядный источник быстрых нейтральных частиц .....	106
6. МЕТОДЫ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ .....	114
6.1. Вакуумно-дуговые ионно-плазменные источники .....	114
6.2. Формирование концентрационных профилей при воздействии ионными пучками вакуумно-дуговых источников .....	122
6.3. Формирование концентрационных профилей при высокодозовой ионной имплантации .....	123
7. ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....	129
7.1. Магнетронный разряд с плоским катодом .....	131
7.2. Влияние магнитного поля на протекание технологических процессов .....	134
7.3. Применение МРС с магнитными системами из редкоземельных металлов для распыления ферромагнитных материалов .....	139
7.4. Нанесение углеродосодержащих покрытий магнетронной распылительной системой .....	143
8. СВОЙСТВА ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ .....	147
8.1. Морфология поверхности полученных пленок .....	147
8.2. Электромагнитные свойства пленок углерода состава $\alpha$ -C:H .....	148
Список литературы .....	150

*Научное издание*

Дмитрий Константинович Кострин  
Александр Аркадьевич Лисенков  
Анатолий Иванович Кузьмичев

**Ионно-плазменные источники  
для плазмохимического синтеза  
функциональных покрытий**

Редактор И. Г. Скачек

---

Подписано в печать 17.10.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Гарнитура «Times New Roman». Печ. л. 10,5.  
Тираж 500 экз. (1-й завод 1–50 экз.) Заказ 115.

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5