

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 537.533; 621.384, 621.785

№ ГР 20160829 от 08.04.16

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
к.т.н., доцент

_____ Д.О. Глухов
" 20 " декабря 2018 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАКЕТОВ
ЭЛЕКТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ ДЛЯ
КОМПЕНСАЦИИ ИОННОГО ПУЧКА ИЛИ СОВМЕСТНОГО
ИОННО-ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ»**

(заключительный)

задание 4.1.01 / ГБ 1516

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии»

Задание «Комбинированные электронно-ионные системы и плазменно-пучковые процессы модификации поверхности и нанесения легированных диэлектрических слоев для электроники»

Начальник ОСНИ

_____ Т.В. Гончарова
«20» декабря 2018 г.

Руководитель НИР,
к.т.н., доцент

_____ Д.А. Антонович
«20» декабря 2018 г.

Ответственный исполнитель
к.т.н., доцент

_____ Ю.П. Голубев
«20» декабря 2018 г.

Новополоцк 2018

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы, главный научный сотрудник, к.т.н., доцент	_____	Антонович Д.А. (общее руко- водство, введение, заключение, разделы 2, 6)
	«20» декабря 2018 г.	
главный научный сотрудник, д.т.н., профессор	_____	Груздев В.А. (введение, разде- лы 2, 6)
	«20» декабря 2018 г.	
Исполнители:		
Ответственный исполнитель, ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент	_____	Голубев Ю.П. (разделы 1, 2, 5)
	«20» декабря 2018 г.	
Младший научный сотрудник	_____	Солдатенко П.Н. (разделы 3-5)
	«20» декабря 2018 г.	
Нормоконтролер	_____	Ищенко Л.В.
	«20» декабря 2018 г.	

РЕФЕРАТ

Отчет 60 с., 26 рис., 8 табл., 43 ист.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫЕ ПУЧКИ, КОМПЕНСАЦИЯ ИОННОГО ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА, ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИТТЕРЫ, ЭЛЕКТРОННО- И ИОННОЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

Объектом исследований являются потоки заряженных частиц, эмитированные из плазмы, формируемой в газоразрядных структурах, с параметрами, достаточными для реализации технологий модификации поверхностей и других родственных технологий.

Цель работы – разработка плазменных источников электронов, формирующих низкоэнергетичные пучки для компенсации ионного объёмного заряда, создание и исследование экспериментальных макетов комбинированных электронно- и ионно-плазменных источников, предназначенных для поверхностной модификации материалов.

В результате выполнения работы определена возможность совместимости электронных и ионных источников, выявлены основные особенности такого применения. Определены основные требуемые параметры и характеристики электронно-ионных источников. Предложен ряд электродных структур электронно-ионных источников, сконструирован, изготовлен и исследован плазменный электронно-ионный источник, показана его перспективность для дальнейшей разработки технологического электронно-ионного источника.

Область применения: полученные результаты будут использованы для разработки экспериментальных макетов электронных источников с плазменным эмиттером для компенсации ионного пучка или совместного ионно-электронного воздействия.

Основные показатели: высокая эффективность разрабатываемых источников заряженных частиц, способная обеспечить возможность реализации энерго- и ресурсосберегающие технологий модификации поверхностей различных материалов.

Степень внедрения: результаты исследований планируется использовать для создания отечественных электронно-ионно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и разработки новой технологии модификации различных материалов. Полученные новые научные результаты используются при подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры. Результаты будут использованы при подготовке к защите 2 магистерских и одной кандидатской диссертаций.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Анализ электродных структур и параметров источников ионов различных конструкций.....	8
1.1 Технологии, допускающие электронно-лучевое ассистирование.....	8
1.2 Источники ионов на основе магнетронного разряда.....	12
1.3 Источники ионов на основе стационарных газовых разрядов с холодным катодом.....	16
1.4 Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя.....	19
1.5 Конструкции плазменных источников ионов.....	23
2. Анализ концепции плазменных источников для формирования совмещенных электронно-ионных пучков.....	30
3. Внешний вид разработанных конструкций.....	37
4. Моделирование магнитных полей в разработанных конструкциях.....	40
5. Экспериментальное исследование электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями.....	45
6. Анализ возможности и условий реализации электрической сепарации электронно-ионного пучка.....	52
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	57

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В. А. Груздев, В. Г. Залесский, Д. А. Антонович, Ю. П. Голубев // Тяжелое машиностроение (Россия). – 2004. – № 9. – С. 25–32.
2. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // Плазменная эмиссионная электроника : труды II Междунар. семинара, Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2006. – С. 108–112.
3. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]. – Екатеринбург : Наука, 1993. – 149 с.
4. Шипко, А.А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбан. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
5. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 208 с.
6. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Ю. Е. Крейнделъ [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
7. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
8. Попов, В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии / В.Ф. Попов, Ю.Н.Горин. – М. : «Высшая школа», 1988. – 255 с.
9. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко [и др.], под ред. А. П. Достанко // Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск: Бестпринт, 2009. – 199 с.
10. Семенов, А. П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
11. Форрестер, А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М.: Мир, 1992. – 358 с.
12. Физика и технология источников ионов / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М. : Мир, 1998. – 496 с.
13. Габович, М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М.Д. Габович. – М. : Атомиздат, 1972. – 304 с.
14. Груздев, В.А. Плазменный электронно-ионный источник // В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.

15. Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам.науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
16. Антонович, Д.А. Применение низкоэнергетичных пучков заряженных частиц для реализации комбинированного воздействия на материалы / Антонович Д.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. // Сборник материалов международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск, 2015. – С. 216-218.
17. Завьялов, В.А. Экспериментальные и теоретические аспекты формирования электронно-ионных потоков / В.А. Завьялов, В.А. Сыровой // Плазменная эмиссионная электроника: труды III Междунар. семинара, Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. / Изд-во БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2009. – С. 45–61.
18. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л.: Энергия, 1972. – 271 с.
19. Семенов, А. П. Техника распыления ионными пучками. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1996. – 120 с.
20. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж. М. Поут [и др.] под общ. ред. Дж. М. Поуга; пер. с англ. Н.К. Мышкин [и др.] под общ. ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
21. Кузьмичёв, А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
22. Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя с накальным нейтрализатором ЕНРМ-100. Руководство по эксплуатации ГЛЮИ.443224.004 РЭ; Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск: 2016. – 31 с.
23. Соловьев, А.А. Устройства со скрещенными электрическим и магнитным полями для нанесения тонкопленочных покрытий на подложки большой площади / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2007.
24. Груздев, В. А. Источник ионов металлов / В. А. Груздев, Ю. Е. Крейндель, А. П. Семенов // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 2. – С. 193–195.
25. eN 400 Ion Source Manual, Filament Cathode Version. Kaufman&Robinson, Inc. – Fort Collins, Colorado: October 2013, Version A. – 91 p.
26. A new large-scale plasma source with plasma cathode / К. Yamauchi, К. Hirokawa, Н. Suzuki and Т. Satake / Vacuum, V.47, № 6-8, 1996, p. 1009-1012.
27. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 286 с.

28. Белюк, С. И. Источник ионов твердых и газообразных веществ / С. И. Белюк, Р. Г. Каримов, Ю. Е. Крейндель и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 2. – С. 155–158.
29. Исследование влияния ионно-электронной эмиссии на характеристики электронного источника с плазменным катодом/ С.В. Григорьев [и др.] // Плазменная эмиссионная электроника: тр. II Междунар. сем., Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. / Изд-во БНЦ СО РАН – Улан-Уде, 2009. – С. 37–44.
30. Гаврилов, Н.В. Формирование пучка ионов, извлекаемых из плазмы тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 5. – С. 74–81.
31. Никулин, С.П. Влияние ионной эмиссии на характеристики тлеющего разряда с полым катодом / С.П. Никулин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 122–124.
32. Семенов, А.П. Эмиссия ионов из разряда с полым катодом в режиме проникновения плазмы в высоковольтный промежуток / А.П. Семенов // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, № 4. – С. 42–47.
33. Antonovich D.A. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D.A. Antonovich, V.A. Gruzdev, V.G. Zaleski, I.L. Pobol, P.N. Soldatenko // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes) v. – 21 iss. 2. P. 143-159.
34. Антонович, Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестник ПГУ. Сер С., Фундам.науки. – 2016. – №12. - С.37-44.
35. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 – Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – №4 – С. 45–51.
36. Силады М., Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, С36 1990. — 639 с.
37. Свешников, В.М. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С.40–44.
38. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 с.
39. ООО «Тор» Elcut, Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Версия 5.10 / Руководство пользователя -2012.
40. Zaleski, V. G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V. G. Zaleski, D.A. Antonovich // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.

41. Gruzdev, V.A. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources / V.A Gruzdev, V.G. Zalesski // *Electrotechnica and electronica (Bulgaria)*. – 2014 – V. 49, № 5-6. – P. 264–268.
42. V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev. Universal plasma electron source. – *Vacuum*. – 2005. – № 77. – P. 399–405.
43. Антонович Д.А. Разработка концепции и опытных образцов плазменных источников электронов для технологических целей / ДА Антонович, АВ Груздев - *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*, 2018, № 4. – С. 119-123.