

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 537.533; 621.384

№ гос. регистрации 20111981

УТВЕРЖДАЮ

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

_____ Д.О. Глухов
" ___ " _____ 2013 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Разработка принципов формирования электронных пучков с помощью плазменных образований»
по заданию «Разработать принципы формирования электронных и вторичных ионных пучков,
высокочастотного и среднечастотного разрядов в магнетронных распылительных системах
для модификации поверхности твердых тел»

(заключительный)

Шифр ГБ 1611

задание 2.4.03 ГПНИ «Конвергенция»

Начальник НИСа

Гончарова Т.В.

" ___ " _____ 2013 г.

Научный руководитель

д.т.н., проф. Груздев В.А.

" ___ " _____ 2013 г.

Ответственный исполнитель

к.ф.-м.н., доц. Залесский В.Г.

" ___ " _____ 2013 г.

Новополоцк 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
главный научный сотрудник,
д.т.н., профессор

Груздев В.А.
(общее руководство, введение,
глава 1, заключение)

Исполнители

Ответственный исполнитель,
ведущий научный сотрудник,
к.ф.-м.н., доцент

Залесский В.Г.
(главы 2, 3, 4, 5, заключение)

Старший научный сотрудник
к.т.н., доцент

Антонович Д.А.
(главы 3,5)

Научный сотрудник, к.т.н

Петрович О.Н.
(разделы 4.1-4.3)

Младший научный сотрудник

Сковородко М.А.
(эксперименты)

Младший научный сотрудник

Солдатенко П.Н.
(эксперименты)

Нормоконтролер

Кулеш В.Ф.

РЕФЕРАТ

Отчёт 92 стр., 66 рис., 0 табл., 56 ист.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ, ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИТТЕРЫ, ЭЛЕКТРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ, ПОТЕНЦИАЛ ЭМИТТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДА, ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

Объектом исследований являются газоразрядные структуры, формирующие плазму с эмиссионными свойствами, достаточными для создания высокоэффективных технологических плазменных источников электронов

Цель работы – Разработка физических принципов формирования и стабилизации тока в условиях высокоэффективной эмиссии электронов из плазмы и создание на их основе конструкций плазменных источников электронов различного технологического назначения.

В результате выполнения работы разработана модель и предложены механизмы возникновения неустойчивостей эмиссионного тока, на основе анализа генераторов плазмы высоковольтных плазменных источников электронов и численного моделирования низковольтных электронно-оптических систем формирования электронных пучков с сечением порядка нескольких квадратных сантиметров при наличии и в отсутствие сеточной стабилизации разработаны и изготовлены два типа экспериментальных конструкций источников электронов с ускоряющим напряжением до 5 кВ и плотностью мощности в пучке порядка 10^7 Вт/м².

Область применения: полученные результаты существенно дополняют теорию плазменных эмиттеров и могут быть использованы при создании пушек с плазменным эмиттером различного технологического назначения.

Основные показатели: разработанные теоретические аспекты будут способствовать разработке высокоэффективных плазменных источников электронов, а формируемые в разрабатываемых источниках пучки позволят расширить области применения электронно-лучевых технологий в промышленности, что может способствовать реализации программ импортозамещения, энерго- и ресурсосбережения.

Степень внедрения: результаты исследований планируется использовать для создания отечественных электронно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и для разработки новых технологий модификации поверхностей различных материалов и сплавов с использованием пушек с плазменным эмиттером. Результаты моделирования были апробированы при модернизации системы формирования электронного пучка плазменного источника электронов, применяемого для формирования многослойных покрытий (ЗАО «Плазмохимические технологии» г. Новосибирск). Полученные новые научные результаты используются при подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. ОБОБЩЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИЭЛ.....	7
2. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПИЭЛ.....	11
3. ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЭМИТТЕРНОГО ЭЛЕКТРОДА НА СВОЙСТВА ЭМИТИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ.....	15
3.1 Условия ограничения эмитирующей поверхности плазмы.....	15
3.2 Градиенты концентрации и потенциала в проникающей плазме.....	19
3.3 Особенности практической реализации изолированного эмиттер- ного электрода.....	28
3.3.1 Экспериментальное исследование модели ПИЭЛ с изолированным эмиттерным электродом на примере разряда с полым катодом.....	28
3.3.1.1 Методика эксперимента.....	28
3.3.2.1 Основные результаты экспериментов.....	28
3.3.2 Модель изолированного эмиттерного электрода в ПИЭЛ	32
3.3.3 Нестабильность эмиссии, обусловленная процессами в канале.....	37
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПИЭЛ	42
4.1 Ионизационные накопительные процессы в ускоряющем промежутке	42
4.2 Системы с отсутствием сеточной стабилизации эмитирующей по- верхности.....	55
4.3 Влияние геометрии и потенциалов электродов ЭОС.....	61
4.4 Влияние давления газа на характеристики электронного пучка.....	65
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ	73
5.1 Экспериментальное исследование эмиссии электронов в структу- рах ОРПК при различных потенциалах эмиттерного электрода.....	73
5.2 Экспериментальное исследование эмиссии электронов в структу- рах ОРМ.....	80
Заключение.....	87
Список использованных источников.....	88

Список использованной литературы

1. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейнделъ, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
2. Белюк, С.И. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77 – 84.
3. Медовник, А.В. Электронно-лучевая обработка керамики/ А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс//Физика и химия обработки материалов.– 2010. – № 3. – С. 39–44.
4. Крейнделъ, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейнделъ. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
5. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.] под общ. ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.
6. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю.Е. Крейнделъ [и др.] под общ. ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 120 с.
7. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: сб. науч. тр. / науч. ред. Г.А. Месяц. – Новосибирск. – Наука, 1976. – 191 с.
8. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейнделъ, П.М. Щанин – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
9. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. I / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 1. – С. 66 – 70.
10. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687 – 693.
11. Груздев, В. А. Плазменный источник электронов с изолированным эмиттерным электродом/ В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 61–67.
12. Груздев, В.А. О возможном механизме автомодуляции электронного тока плазменного эмиттера / В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Плазменная эмиссионная электроника: тр. III Междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 25–30 июня 2012 г. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН, 2012. – С. 21–28.
13. Москалев, Б.И. Разряд с полым катодом / Б.И. Москалев. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
14. Райзер, Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю.П. Райзер. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 416 с.

15. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М.: Мир, 1987. – 398 с.
16. Груздев, В.А. Физические процессы формирования электронных пучков в плазменных источниках. / В.А. Груздев, В.Г. Залесский// Вестник Полоцкого госуниверситета. Сер. С: Фундаментальные науки.-2007.-№9.-с.2-14.
17. Груздев, В.А. О роли плазменных электронов в формировании газоразрядной плазмы / В.А. Груздев, В. Г. Залесский, И.С. Русецкий // Прикладная физика. - 2012. - № 1. С. 64 – 72.\
18. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
19. Груздев В.А., Залесский В.Г., Петрович О.Н. О деформации функции распределения потенциала в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов // Журнал технической физики, 1995, т. 65, вып. 10, с. 38-45
20. Zalesski, V. G / Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures // V. G Zalesski, D.A. Antonovich //J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 7771-7777.
21. Universal plasma electron source. Grusdev V.A., Zalesski V.G., Antonovich D.A., Golubev Yu.P. // Vacuum (UK) 77 2005. P. 399–405.
22. Galansky, V L. Physical processes in plasma electron emitters based on a hollow-cathode reflected discharge / V L Galansky [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27. – P. 953 – 961
23. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц./ Дж Лоусон/– М.: Изд Мир, 1980. – 437 с.
24. Петрович, О.Н. Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С. 79 – 85.
25. Петрович, О.Н. Нестационарная задача нелинейной электронной оптики в плазменных источниках электронов/ О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов IX Всероссийского семинара. – Москва, 2009. – С. 15.
26. Груздев, В.А. Влияние давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера. / В.А. Груздев, [и др.] // Вестник Полоцкого госуниверситета. Сер. С: Фундаментальные науки.-2007.-№4.-с. 122-127.
27. 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», 2011. – 220 с.

28. Никулин, С.П. Влияние эмиссии заряженных частиц на характеристики тлеющих разрядов с осциллирующими электронами / С.П. Никулин // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 63 – 68.
29. Царев, Б.М. Расчёт и конструирование электронных ламп / Б.М. Царев. – М.: Энергия, 1967. – 671 с.
30. Груздев, В.А., Эволюция вторичной плазмы в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов/ В.Г. Залесский // ЖТФ, 1996, т. 66, вып.7, с.46-55.
31. Цендин, Л.Д. О величине и знаке прианодного падения потенциала в газовом разряде// ЖТФ, 2011, т. 81, вып. 11 с. 154-158.
32. Данилишин, Д.Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / Д.Г. Данилишин, В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 5. – С. 29 – 32.
33. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский [и др.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 5. – С. 5 – 23.
34. Литвинов, И. И. Граничные условия при диффузии неравновесной плазмы в магнитном поле / И. И. Литвинов // ПМТФ. – 1977. – № 1. – С. 52–55.
35. Груздев, В.А. О деформации распределения потенциала в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов при повышенном давлении / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // ЖТФ. – 1995. – Т.65, № 10. – С.38 – 45.
36. Gruzdev, V.A. Models of the acceleration gaps and nonlinear phenomena by the ionization of the gas in theirs / V.A. Gruzdev, V.G. Zalessky, O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings IV Annual seminar. – Polotsk, 1995. – P. 253 – 260.
37. Петрович, О.Н. Компьютерное моделирование влияния ионизации остаточного газа на формирование интенсивных электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц / О.Н. Петрович // Прикладная физика. – 2002. – №. 3. – С.87 – 94.
38. Petrovich, O.N. Computer simulation of influence of residual gas on formation of intensive electronic beams in plasma sources of the charged particles / O.N. Petrovich // Proceedings of SPIE. – Vol. 5025: Fifth Seminar on Problems of Theoretical and Applied Electron and Ion Optics; edited by A.M. Filachev. – SPIE: Bellingham, WA, 2001. – P. 52 – 58.
39. Gruzdev, V.A. Nonlinear effects in electron-optical systems with the plasma emitter / V.A. Gruzdev, O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings of the VIII Annual seminar; edited by L.Babichev&V.Kuvshinov. – Minsk, 1999. – P. 157 – 161.
40. Груздев, В.А. Влияние ионизационных процессов на свойства электронно-оптических систем с плазменным эмиттером / В.А. Груздев, О.Н. Петрович // Наука и

технологии на рубеже XXI века: материалы Международной научно-технической конференции; под ред. И.П. Филонова, Е.П. Сапелкина, Г.Я. Беляева. – Минск, 2000. – С. 227 – 237.

41. Бурдовицин В. А., Об электрической прочности ускоряющего промежутка плазменного источника электронов в форвакуумном диапазоне давлений/ В. А. Бурдовицин., М. Н. Куземченко, Е. М. Окс // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, вып. 7. – С. 134–136.

42. Ремпе, Н.Г. Управление параметрами электронного эмиттера с плазмой, ограниченной пристеночным ионным слоем. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Томск, 1985.

43. Петрович О.Н. Моделирование влияния процессов ионизации и вторичных ионно-электронной эмиссии на формирование интенсивных электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц/ Петрович О.Н. // Вестник ХГТУ: Мат. V МНК по математическому моделированию, – Херсон, 2002.– вып. 2 (15)– с. 369 –372.

44. Метель, А.С.. Расширение рабочего диапазона давлений тлеющего разряда с полым катодом. ЖТФ, 1984, т.54, №2, с. 241 – 247.

45. Петрович, О.Н. Моделирование электронно-оптических систем с плазменным эмиттером. Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. Новополоцк, 2012.

46. Gruzdev, V.A. The electron gun with a plasma emitter and isolated emitter electrode \ V.G. Zaleski, I.S. Rusetski \\ Electrotechnica and electronica. 2012 – V.47 № 5-6. – P. 89 – 92.

47. Барченко, В.Т. Моделирование характеристики разряда в скрещенных электрических и магнитных полях: основные физические процессы и простейшие аналитические модели// Е.А. Петрова, В. Г. Залесский/ Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 52–59.

48. Груздев, В.А. О возможном механизме автомодуляции электронного тока плазменного эмиттера / В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Плазменная эмиссионная электроника: тр. III Междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 25–30 июня 2012 г. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН, 2012. – С. 21–28.

49. Груздев, В.А. Плазменный ионно-электронный источник// В. Г. Залесский, П.Н. Солдатенко/ Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.

50. 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.

51. Свешников, В.М. Алгоритм оптимизации ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области /В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Вестник ХНТУ №2 (45), 2012, С. 320 – 324.
52. Петрович, О.Н. Механизмы снижения электрической прочности в ПИЭЛ с эмиттером большого сечения / О.Н. Петрович, В.Г. Залесский // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов X Всероссийского семинара. – Москва, 2011. – С. 68 – 69.
53. Свешников, В.М. Расчет ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов X Всероссийского семинара. – Москва, 2011. – С. 13 – 14.
54. Залесский В. Г. Энергетическая эффективность плазменных источников электронов // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 63–71. 2 Zalesski, V.G. Energy efficiency of electron plasma emitters / V.G. Zalesski // Plasma Physics -2011.-vol. 37.-vol. 13.-P. 1196-1201.
55. Груздев В. А., Залесский В. Г. О роли плазменных электронов в формировании газоразрядной плазмы // Прикладная физика. – 2012. – № 1. – С. 64–72.
56. Плазменный источник электронов: пат. 15662 Респ. Беларусь, Н 01 J 3/00/ В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20100180 от 08.02.2010; опубл. 26.12.2011// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5 (82), С 39.