

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Полоцкий государственный университет)

УДК 537.533.2; 535.11; 621.791.72.037

№ госрегистрации 20192874

Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Полоцкого государственного
университета, к.т.н., доцент

_____ Ю.П. Голубев

« ____ » _____ 2020 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СТРУКТУР
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ
С УСКОРЕНИЕМ ЗАРЯДОВ В ДВОЙНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ В ПЛАЗМЕ
(заключительный)

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии»,
подпрограмма «Плазменные и пучковые технологии»

Начальник отдела сопровождения
научных исследований

_____ Т.В. Гончарова

Руководитель НИР,
проректор по научной работе
канд. техн. наук, доцент

_____ Ю.П. Голубев

Новополоцк 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
проректор по научной работе,
канд. техн. наук, доцент

подпись, дата

Ю.П. Голубев
(общее руководство,
введение, разделы 1, 3
заключение)

Ответственный исполнитель,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент

подпись, дата

Д.А. Антонович
(общее руководство,
введение, разделы 1–4,
заключение)

Исполнители:

главный научный сотрудник,
д-р техн. наук, профессор

подпись, дата

В.А. Груздев
(введение, разделы 1,
2, 3 заключение)

Младший научный сотрудник

подпись, дата

П.Н. Солдатенко
(разделы 3, 4)

Младший научный сотрудник

подпись, дата

С.Н. Абраменко
(разделы 2, 4)

Нормоконтроль

подпись, дата

Л.В. Ищенко

РЕФЕРАТ

Отчет 115 с., 1 кн., 67 рис., 112 источн., 3 прил.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ДВОЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ В ПЛАЗМЕ, НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫЕ ПУЧКИ, ПЕРВЕАНС, КОМПЕНСАЦИЯ ИОННОГО ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА, ЭЛЕКТРОННО- И ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

Объектом исследований являются потоки заряженных частиц, эмитированные из плазмы газового разряда.

Цель работы – разработка, создание и исследование газоразрядных структур для формирования ионных и электронных потоков с ускорением в двойных электрических слоях в плазме.

В результате выполнения работы разработан экспериментальный образец плазменного источника для формирования совмещённых электронно-ионных пучков на основе двойной плазменной эмиссионной системы. Показано, что такая эмиссионная система обеспечивает повышение первеанса ускоряющей системы за счёт обратного потока зарядов из вторичной плазмы в эмитирующую плазму и частичной компенсации объёмного заряда пучка. Подана заявка на патент на изобретение.

Область применения: совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, формируемые в разработанной конструкции, могут быть использованы при реализации технологий нанесения тонкопленочных слоев, для поддержания процессов ионизации и обеспечения устойчивого горения разряда, компенсации как объёмного заряда в пучке, так и поверхностного на формируемой пленке.

Основные показатели: разработанные новые конструкции плазменных источников заряженных частиц обеспечат повышение эффективности и качества реализации существующих, а также разработку новых технологий модификации поверхностей различных материалов.

Степень внедрения: результаты исследований могут быть использованы для создания отечественных электронно-ионно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и разработки новой технологии модификации различных материалов. Полученные новые научные результаты используются в учебном процессе (приложение А), а также при подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры. Результаты будут использованы при подготовке к защите одной кандидатской и одной докторской диссертаций.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Основные положения существующей модели плазменного эмиттера	7
1.1 Формирование плазменной эмиссионной поверхности	7
1.2 Формирование эмиссионного тока электронов	13
1.3 Процессы в ускоряющем промежутке	18
2 Задачи формирования и применения потоков заряженных частиц с ускорением в двойных электрических слоях в плазме	20
3 Физические процессы в двойных электрических слоях в плазме	26
3.1 Образование слоёв в плазме газового разряда	26
3.2 Двойные слои в плазме	28
4 Физическая концепция и электродная структура экспериментальных источников заряженных частиц	31
4.1 Электродная структура источника заряженных частиц	32
4.2 Генерация электронного пучка	41
4.3 Генерация ионного и совмещённого электронно-ионного пучка	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49
ПРИЛОЖЕНИЕ А	59
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	62
ПРИЛОЖЕНИЕ В	88

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Завьялов М. А. [и др.] Плазменные процессы в технологических электронных пушках – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
2. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
3. Пирс, Дж. Р. Теория и расчет электронных пучков – М. : Советское радио, 1956. – 214 с.
4. Introduction to plasma physics and controlled fusion Second edition Volume 1 Plasma Physics Francis F. Chen. Plenum Press. – New York and London, 1984. – 398 p.
5. Источники электронов с плазменным эмиттером / под ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 180 с.
6. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
7. Grushev V. A. [et al.] Universal plasma electron source // Vacuum 77. – 2005. – P. 399 – 405.
8. Окс Е. М., Чагин А.А. Эмиссионные свойства плазмы сверхплотного тлеющего разряда, возбуждаемого в скрещенных $E \times H$ полях // ЖТФ. – 1991. – Т. 61, вып. 6. – С. 204 – 206.
9. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
10. Гордиенко А. И., Поболь И.Л., Залесский В.Г. Переработка отходов штамповки сплава Со-Сг-Мо с использованием электронно-лучевого переплава // Плазменная эмиссионная электроника: тр. III междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. – С. 22 – 29.
11. Груздев В. А., Залесский В. Г., Русецкий И. С. Плазменный источник электронов с изолированным эмиттерным электродом // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2010. – № 9 – С. 61 – 67.
12. Галанский В. Л. [и др.] Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом // Изв. вузов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 5. – С. 5 – 23.

13. Груздев В. А. [и др.] Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении // Тяжелое машиностроение (Россия). – № 9. – 2004. – С. 25 – 32.
14. Антонович Д. А., Груздев В. А., Залесский В. Г., Русецкий И. С. Способы повышения эффективности извлечения электронов в источниках с плазменным эмиттером // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2010. – № 3 – С. 103 – 108.
15. Бугаев С. П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
16. Жаринов А. В. [и др.] Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. I // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 1. – С. 66 – 70
17. Жаринов А. В. [и др.] Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. II // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687 – 693.
18. Груздев В. А. [и др.] Влияние давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2007. – № 3. – С. 90 – 98.
19. Груздев В. А. [и др.] Плазменный источник электронов с пучком большого сечения // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166 – 170.
20. Antonovich D. A., Gruzdev V. A., Zalesski V. G. The gas-discharge structure for the formation of radial electron beams // Electrotechnica and electronica. 2009 – 5-6. – P. 186 – 188.
21. Райзер Ю. П. Физика газового разряда/ Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
22. Riemann K. U. The Bohm criterion and sheath formation // J. Phys. D. – 1991. – Vol. 24. – P. 493 – 518.
23. Царев Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп. – М.: Энергия, 1967. – 671 с.
24. Груздев В. А., Залесский В.Г. Эволюция вторичной плазмы в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов при повышенном давлении // ЖТФ. – 1996. – Т. 66, Вып. 7. – С. 46 – 55.
25. Назаренко О.К. [и др.] Электронно-лучевая сварка– Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с

26. Галанский В.Л. [и др.] Параметры плазмы в эмиссионном канале плазменного эмиттера // ЖТФ. – 1990. – Т. 60, вып. 4. – С. 168 – 170
27. Никулин С. П. Влияние размеров анода на характеристики тлеющего разряда с полым катодом // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, вып. 5. – С. 43 – 47.
28. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток – М.: Наука, 1971. – 525 с.
29. Жаринов А. В., Коваленко Ю. А. Роль быстрых электронов в разряде с полым катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2001. № 9. С. 44 – 47.
30. Груздев В. А., Залесский В. Г. О роли плазменных электронов в формировании газоразрядной плазмы // Прикладная физика. – 2012. – № 1. – С. 64 – 72.
31. Браун Я. Физика и технология источников ионов – М.: Мир, 1998. 495 с.
32. Груздев В.А., Ремпе Н.Г. Определение параметров эмитирующей плазмы по эмиссионным характеристикам // I Всесоюз. семинар по плазменной электронике. – Улан-Удэ., 1991. – С. 45–55.
33. Крейндель Ю. Е. Параметры системы плазма – слой в электродной полости разряда низкого давления // ЖТФ. – 1988. – Т. 58, вып. 6. – С. 1208 – 1209.
34. Жаринов, А. В., Коваленко Ю. А. К теории электронных коллекторов в газовом разряде // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 681 – 686.
35. Груздев В. А. Залесский В. Г. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87 – 92.
36. Залесский В. Г. Энергетическая эффективность плазменных источников электронов // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 63 – 71.
37. Литвинов И. И. Граничные условия при диффузии неравновесной плазмы в магнитном поле // ПМТФ. – 1977. – № 1. – С. 52–55.
38. Ульянов К. Н., Филиппов А. А. Двухмерная модель плазменного катода с открытой границей плазмы // Теплофизика высоких температур. – 2001. – том 39, № 4. С. 539 – 546.
39. Zaleski V. G., Antonovich D. A. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – 40. 7771-7777.

40. Ульянов К. Н. Физическая и математическая модели плазменного катода с сеточной стабилизацией плазменной границы // ТВТ. – 1998. – Т. 36, № 1. – С. 25–32.
41. Galansky V. L. [et al.] Physical processes in plasma electron emitters based on a hollow-cathode reflected discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27. – P. 953 – 961.
42. Бурдовицин В. А., Куземченко М. Н., Окс Е. М. Об электрической прочности ускоряющего промежутка плазменного источника электронов в форвакуумном диапазоне давлений // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, вып. 7. – С. 134–136.
43. Петрович О. Н., Груздев В. А. Нестационарная задача нелинейной электронной оптики в плазменных источниках электронов // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тез. докл. IX Всерос. семинара. – М., 2009. – С. 15 – 16.
44. Груздев В. А., Залесский В. Г., Петрович О. Н. О деформации распределения потенциала в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов при повышенном давлении // ЖТФ. – 1995. – Т. 65, вып. 10. – С. 38 – 45.
45. Белюк С. И., Осипов И. В., Ремпе Н. Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Изв. ВУЗов. Физика.–2001.– Т. 44, № 9. – С. 77–84.
46. Залесский В. Г. Особенности применения плазменных источников электронов для сварки и родственных технологий // Материалы Международной научно-технической конференции Технологии и оборудование ЭЛС-2008. Санкт-Петербург 19-22 мая 2008 г.
47. Залесский В.Г., Голубев Ю.П., Мазаник Ю.В. Электронно-лучевая обработка быстроизнашивающихся деталей Источник питания плазменного эмиттера // Вестник ПГУ. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2005. № 10. – С. 63–66.
48. Stanley Humphries, Jr. Charged Particle Beams. – John Wiley and Sons, New York, 2002. – 819 p.
49. Груздев В. А. [и др.] Программно-аппаратный комплекс для диагностики электронно-оптических систем и пучков заряженных частиц // Приборы и техника эксперимента (Россия). – 2009. – №2 – с 177 – 178

50. Груздев В. А. [и др.] Способ и устройство для диагностики электронно-оптических систем плазменных источников электронов // Минск: Доклады БГУИР. – 2009. – №1 (39). – С. 71-77.
51. Петрович О.Н., Груздев В.А. Программный комплекс ELIS для моделирования плазменных процессов в ЭОС. Тезисы X Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики», М.: ФГУП «НПО «Орион»». – 2011. С. 15–17.
52. Груздев В. А., Залесский В. Г., Руголь Д. Г. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии // Инженерно физический журнал. – 2007 № 2, с 134 – 142.
53. Пантелеенко Ф. И., Груздев В. А. и др. Закономерности электронно-лучевого воздействия на боросодержащие материалы и принципов оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологии упрочнения и восстановления. М Технопринт: 2005. – 120 с.
54. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Исследование влияния электронно-лучевой обработки на эксплуатационные свойства боросодержащего материала лезвийного металлорежущего инструмента // Вісник ЖІТІ. – 2001/ Технічні науки. – С. 242–243.
55. Барченко В. Т., Вересов Л. П., Вересов О. Л. Плазменно-пучковый комплекс для модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы. // Труды III Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная технология», Улан-Уде, 23 – 30 июня 2009, С. 122 – 125.
56. Barchenko V. T., Veresov L. P., Veresov O. L. and Grigorenko S.V. Plasma Ion Source for Modification of Materials. // 5th Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk. 2000. P. 220 – 223.
57. 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.
58. Барченко В. Т. [и др.] Ионно-плазменные технологии в электронном производстве – СПб. : Энергоатомиздат, 2001. – 332 с.

59. В.Т. Барченко [и др.] Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
60. Ремпе Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом // Плазменная эмиссионная электроника : тр. II Междунар. сем., Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. – С. 108–112.
61. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
62. Достанко А. П. [и др.] Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые – Минск : Бестпринт, 2009. – 199 с.
63. Свадковский И. В. [и др.] Источники электронов с плазменным эмиттером – Мн.: Бестпринт, 2002. – 214 с.
64. Крейндель Ю. Е. [и др.] Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
65. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. – Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
66. Дж. М. Поут [и др.] Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
67. Белюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77 – 84.
68. Поболь И.Л. Применение электронно-лучевых технологий – этап решения проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом // Вестник ПГУ. Сер В., Промышленность. Приклад.науки. – 2014. – №3. - С.35-42
69. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 286 с.
70. Петрович О.Н., Груздев В.А Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С. 79 – 85.
71. Свешников В.М., Залесский В.Г., Петрович О.Н. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С.40 – 44.

72. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам.науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
73. Антонович Д.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Применение низкоэнергетических пучков заряженных частиц для реализации комбинированного воздействия на материалы // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». Новополоцк, 2015. – С. 14-16.
74. Антонович Д.А. [и др.] Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 // Вестник ПГУ. Сер С., Фундам.науки. – 2016. – №12. - С.37-44
75. 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
76. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С.114 – 123.
77. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Электронно-оптические системы приборов СВЧ. Л., «Энергия», 1965.
78. Чен Ф. Введение в физику плазмы – М.: Мир, 1987. – 398 с.
79. Силадьи М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, С36 1990. — 639 с.
80. Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменный ионно-электронный источник// Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.
81. ООО «Тор» Elcut, Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Версия 5.10 / Руководство пользователя -2012.
82. Антонович Д.А., Груздев В.А. Разработка концепции и опытных образцов плазменных источников электронов для технологических целей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, 2018, № 4. – С. 119-123

83. Antonovich D.A. Gruzdev V.A., Zalesski V.G., Pobol I.L., Soldatenko P.N. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes) v. – 21 is. 2. P 143-159.
84. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 416 с
85. Справочник по транзисторам [Электронный ресурс] / Электронный портал. Datasheets – Режим доступа <http://kazus.ru/guide/transistors/> - Дата доступа 09.09.2017
86. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Книга 3. Преобразователи напряжения. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2007. – 192 с.
87. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Советское радио, 1974. – 213 с.
88. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004.- 704с.
89. Абраменко С.Н., Антонович Д.А., Груздев В.А. Формирование наносекундных импульсов тока пучка в плазменных эмиссионных системах на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях // Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – № – С. 17-22.
90. Абраменко С.Н., Антонович Д.А., Груздев В.А., Солдатенко П.Н. Возможность повышения первеанса в плазменных эмиссионных системах на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, №4, 2020, с. 48-52
91. Antonovich D.A. Gruzdev V.A., Zalesski V.G., Soldatenko P.N. Multibit structure for the formation of combined or alternating electron-ion beams // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes) v. – 24 is. 2. P 147-156. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2020033966
92. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков // Известия Национальной Академии Наук Беларуси. Серия физико-технических наук, т. 65, №3, с. 285-291

93. Langmuir, I. The Interaction of Electron and Positive Ion Space Charges in Cathode Sheaths / I. Langmuir // *Phys. Rev.* – 1929. – Vol. 58, issue 1502. – P. 290–291.
94. Langmuir, I. Positive Ion Currents from the Positive Column of Mercury Arcs / I. Langmuir // *Science.* – 1923. – Vol. 33, № 6. – P. 954–989.
95. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М.: Мир, 1987. – 398 с.
96. Альтеркоп, Б.А. Двойной заряженный слой на границе между стенкой и симметричной плазмой / Б.А. Альтеркоп, И.Д. Дубинова, А.Е. Дубинов // *ЖТФ.* – 2007. – Т. 77, вып. 7. – С. 63–69.
97. Lisovskiy, V.A Positive ion motion in cathode sheath of glow discharge in N_2O / V.A Lisovskiy, E.P. Artushenko, V.D. Egorenkov // *Problems of atomic science and technology.* – 2013. – № 4 (86). – P. 140–143.
98. Sheiner, B.S. Theory and simulation of electron sheaths and anode spots in low pressure laboratory plasmas / B.S. Sheiner // *Doctor of Philosophy thesis.* – University of Iowa, 2017. – 130 p.
99. Иванов, А.В. Электронная оптика. Интенсивные электронные и ионные пучки: учеб. пособие [Электронное издание] – Новосибирск, 2011. – 193 с.
100. Мартенс, В.Я. Переходная область между неравновесной плазмой и отрицательным электродом / В.Я. Мартенс // *ЖТФ.* – 2002. – Т. 72, вып. 10. – С. 45–52.
101. Baalrud, S.D. Equilibrium states of anodic double layers / S. D. Baalrud, B. Longmier, and N. Hershkowitz // *Plasma Sources Science Technology.* – 2009. – № 18(3):035002.
102. Григорьев, В.П. Моделирование двойного электрического слоя в диоде, заполненном плазмой инертных газов / В.П. Григорьев, Е.С. Вагин, В.В. Офицеров // *Изв. Томского политехнического университета.* – 2008. – Т. 313, № 2. – С. 67–69.
103. Никитинский, В.А. Технологические источники ионов на основе контр-агированных разрядов / В.А. Никитинский, Б.И. Журавлев // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2006. – № 4. – С. 55–58.
104. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
105. Penning FM. Coating by Cathode Disintegration. US Patent 2,146,025; N.V. Philips, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, The Netherlands; 1939

106. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Сов. Радио, 1966. – 454 с.
107. Груздев В.А., Залесский О. О механизме возникновения электрического поля в плазме при эмиссии электронов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2014. – № 4. – С. 103–108.
108. Gruzdev V.A., Zaleski V.G. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources // Electrotechnica and electronica (Bulgaria). – 2014 – V. 49, № 5-6. – P. 264–268.
109. Gruzdev V.A., Zaleski V.G. Emission current formation in plasma electron emitters // Plasma Physics Reports. – 2010. – №36. – p. 1191-1198
110. Gruzdev V.A. and Zaleski V.G. About the mechanism of occurrence of electric field in plasma at electron emission, Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences, № 4, p. 103–108.
111. Бурдовицин В.А. [и др.] Форвакуумные плазменные источники электронов / – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2014. – 288 с.
112. Bogomolov B. K. Plasma Chemical Etching of Silicon in Chlorine to Containing Plasma, Used in Nanoelectronics // 10th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. APEIE–2010 – Novosibirsk : – V. 1. – P. 23-30.