

ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА
(ВГУ ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА)

УДК 537.533; 621.384, 621.785

Рег. № 20210708

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор педагогических наук, профессор
_____ Е.Я. Аршанский

«_____» _____ 2026 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАКЕТОВ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ СОВМЕЩЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ ПУЧКОВ

ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии»

n/n «Электромагнитные, пучково-плазменные и литейно-деформационные технологии обработки и создания материалов»

(заключительный)

Научный руководитель НИР,
к.т.н., доцент,
заведующий сектором лучевых методов
сварки отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы ФТИ НАН Беларуси,

_____ Д.А. Антонович
«_____» _____ 2026 г.

Витебск 2026

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
заведующий сектором лучевых методов сварки отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы ФТИ НАН Беларуси,
канд. техн. наук, доцент

подпись, дата

Д.А. Антонович
(общее руководство, введение, разделы 1, 2, заключение)

Ответственный исполнитель,
ведущий научный сотрудник,
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладного и системного программирования ВГУ имени П.М. Машерова

подпись, дата

А.И. Никитин
(разделы 2, 3)

Исполнители:

Младший научный сотрудник, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры физики ПГУ имени Ефросинии Полоцкой

подпись, дата

М.А. Сковородко
(разделы 3, 4)

Младший научный сотрудник, магистр технических наук, преподаватель кафедры прикладного и системного программирования ВГУ имени П.М. Машерова

подпись, дата

Д.В. Шидловская
(разделы 3, 4)

Младший научный сотрудник, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова

подпись, дата

Т.И. Сапелко
(раздел 5)

Младший научный сотрудник, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры физики ПГУ имени Ефросинии Полоцкой

подпись, дата

П.Н. Солдатенко
(раздел 5)

Младший научный сотрудник, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры энергетики и электроники ПГУ имени Ефросинии Полоцкой

подпись, дата

С.Н. Абраменко
(раздел 6)

Нормоконтроль

подпись, дата

Т.В. Харкевич

РЕФЕРАТ

Отчет 154 с., 1 кн., 45 рис., 1 табл., 138 источн., 6 прил.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИТТЕРЫ, ИОННЫЕ ПУЧКИ, ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ, КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ПУЧКИ

Объектом исследований являются плазменные источники низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков и генерируемые ими пучки заряженных частиц, системы их электропитания.

Целью настоящей работы является разработка и исследование плазменных низкоэнергетичных источников для формирования совмещенных в пространстве ионных и электронных потоков с ускорением зарядов в двойных электрических слоях в плазме, предназначенных для реализации технологий поверхностной модификации материалов.

В результате выполнения работы разработана и исследована новая конструкция плазменного источника, на которую получен патент РБ на изобретение, подготовлен комплект чертежей. Предложена физико-математическая модель и на ее основе разработана программа для расчета ряда параметров газоразрядной плазмы, формируемой в источнике. Разработан алгоритм работы автоматизированной системы электропитания плазменного источника и системы откачки рабочей вакуумной камеры.

Область применения: новые конструкции источников с плазменным эмиттером позволят разработать на их основе новые ресурсосберегающие технологии электронно-ионной лучевой обработки деталей машино- и приборостроения.

Основные показатели: новые конструкции плазменных источников низкоэнергетичных совмещенных в пространстве ионных и электронных потоков заряженных частиц обеспечат повышение эффективности и увеличение качества реализации существующих, и будут способствовать разработке новых технологий лучевого воздействия на поверхность материалов, что в целом позволит расширить область применения плазменных лучевых технологий в промышленности Республики Беларусь. Технологии ионно- и электронно-лучевого воздействия представляют интерес для следующих предприятий Беларуси – ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «МТЗ», ОАО «Амкодор», и др.

Степень внедрения: результаты исследований планируется использовать для создания отечественных электронно-ионно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и для разработки новой технологии модификации поверхностей различных материалов и сплавов. Полученные новые научные результаты используются в учебном процессе ВГУ имени П.М. Машерова и ПГУ имени Е. Полоцкой (приложение А) при

ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры и будут использованы при подготовке 2 кандидатских и 1 докторской диссертаций.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений и обозначений	7
Введение	8
1 Основные принципы формирования и особенности технологического применения низкоэнергетичных совмещенных электронных и ионных пучков	12
1.1 Технологии, перспективные к применению низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков	12
1.2 Взаимодействие заряженных частиц с веществом	17
1.2.1 Взаимодействие ускоренных электронов с веществом.....	17
1.2.2 Взаимодействие ускоренных ионов с веществом.....	20
2 Основные особенности конструирования газоразрядных структур на основе плазменных эмиттеров для формирования совмещенных в пространстве ионных и электронных по- токов с ускорением зарядов в двойных электрических слоях в плазме.....	26
2.1 Обобщенные требования к электрофизическим характеристикам газоразрядных структур плазменных источников низкоэнергетичных ионно-элек- тронных совмещенных в пространстве пучков	26
2.2 Основные принципы формирования совмещенных в пространстве ионных и электронных потоков с ускорением зарядов в двойных электрических слоях в плазме.....	27
3 Основные положения существующей модели плазменного эмиттера	29
3.1 Обобщенная модель формирования пучков заряженных частиц из плазменного объ- ема	29
3.1.1 Физико-математическая модель получения ионных пучков.....	29
3.1.2 Физико-математическая модель получения электронных пучков.....	33
3.2 Процессы, сопровождающие формирование потока заряженных частиц в плазменном эмиттере	35
3.2.1 Обобщенная электродная структура генератора плазмы источника заряженных частиц с плазменным эмиттером	35
3.2.2 Формирование плазменной эмиссионной поверхности	38
3.2.3 Формирование эмиссионного тока электронов.....	43
3.2.4 Процессы в ускоряющем промежутке.....	46
3.2.5 Формирование слоев в плазме газового разряда.....	49
4 Моделирование экспериментальных макетов плазменных источников низкоэнергетич- ных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков	55

4.1 Оптимизированная форма эмиссионного канала	55
4.2 Численное моделирование эмиссионного канала	59
4.3 Численный расчет и моделирование параметров вторичной плазмы	65
5 Экспериментальные макеты плазменных источников низкоэнергетич- ных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков	70
5.1 Конструкция экспериментальных макетов плазменных источников низкоэнергетич- ных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков	70
5.2 Исследования экспериментальных макетов плазменных источников низкоэнерге- тичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков.....	73
6 Система автоматизированного электропитания и управления системой вакуумирования	81
6.1. Структура автоматизированной системы электропитания	81
6.2 Алгоритм работы системы управления.....	83
6.3 Структура системы автоматизированной управления вакуумированием	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	126
ПРИЛОЖЕНИЕ В	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	151

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

- БПР – блок питания разряда
- ВАХ – вольт-амперная характеристика
- ВТР – высоковольтный тлеющий разряд
- ИПА – ионно-плазменное азотирование
- КНБ – кубический нитрид бора
- ПИЭЛ – плазменный источник электронов
- ПКА – поликристаллический алмаз
- ПЛК – программируемый логический контроллер
- ППП – пакет прикладных программ
- СТМ – сверхтвердые материалы
- ХТО – химико-термическая обработка
- ЭЛВ – электронно-лучевое воздействие
- ЭЛС – электронно-лучевая сварка
- ЭОС – электронно-оптическая система

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж. М. Поут [и др.] под общ. ред. Дж. М. Поута; пер. с англ. Н.К. Мышкин [и др.] под общ. ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
2. 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.
3. Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом / В.М. Шеменков, М.А. Рабыко А.И. Юманова; под общ. ред. В.М. Шеменкова – Могилев:Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.
4. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2009. – 199 с.
5. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Ю. Е. Крейнделъ [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
6. Рыкалин, М.М. Основы электронно-лучевой обработки материалов / М.М. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А Углов // – М.:Машиностроение,1978. – 239 с.
7. Электронно-лучевая сварка / Назаренко О.К. [и др.] // – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с
8. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В. Т. Барченко [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Быстрова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2001. – 332 с.
9. 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.
10. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2004. – №9 – С. 25 – 32.
11. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // Плазменная эмиссионная электроника : тр. II Междунар. сем., Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2006. – С. 108-112.

12. Антонович, Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестник ПГУ. – Сер С., Фундаментальные науки. – 2016. – №12. - С.37-44
13. Антонович, Д.А., Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестник ПГУ. – Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – №4 – С. 45-51
14. Научные основы разработки промышленных технологических процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / Босяков М.Н., Бондаренко С.А., Бондаренко А.С. [и др.] В сборнике: Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сборник научных трудов. В 2-х книгах. Редакция: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. Минск, – 2021. С. 60-80.
15. Григорьев, С.Н. Технология вакуумно-плазменной обработки инструментов и деталей машин / С.Н. Григорьев, Н.А. Воронин. – Москва: Станкин ; Янус-К. 2005. – 520 с.
16. Современные тенденции модифицирования структуры и свойств материалов / Потехаев А.И., Глезер А.М., Клопотов А.А. [и др.] под общ. ред.: Коваль Н.Н., Громов В.Е. // Томск: Изд-во НТЛ. –2015. – 380 с.
17. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels / Yu Ivanov, A Klopotov, A Potekaev, N Koval [et al] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. P. 012070-1–012070-6. DOI: 10. 1088/1757-899X/168/1/012070
18. Гаврилов, Н.В. Влияние параметров электронного пучка и ионного потока на скорость плазменного азотирования аустенитной нержавеющей стали / Н.В. Гаврилов, А.И. Меньшаков // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 3. – С. 88–93.
19. Плазменная эмиссионная электроника: труды VII международного Крейнделевского семинара / под общ. редакцией М.С. Воробьева. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2023. – 308 с.
20. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками / В.П. Ротштейн, Д.И. Проскуровский, Г.Е. Озур, Ю.Ф. Иванов // Новосибирск. – 2019. – 349 с.
21. Поболь, И.Л. Современные электронно-лучевые технологии / И.Л. Поболь, В.Г. Залесский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы. - Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021. – С. 154-187.

22. Кузьмичёв, А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 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. Домбровский, Ю.М. Физические основы и технология плазменного поверхностного упрочнения / Ю.М. Домбровский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №3. – С 16-20.
25. Табаков, В.П. Износостойкие ионно-плазменные покрытия режущего инструмента и технологии их нанесения / В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов, А.В. Чирханов // Технология машиностроения. – 2007. №1. С. 22-28.
26. Берлин, Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман // – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.
27. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Ахмадеев Ю.Х., Денисов В.В., Иванов Ю.Ф. [и др.] // Томск, Издательство НТЛ. – 2016. – 312 с.
28. Крейндель, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейндель. – М. : Атомиздат, 1977. – 144 с.
29. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю.Е. Крейндель [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
30. Габович, М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М.Д. Габович. – М. : Атомиздат, 1972. – 304 с.
31. Источники электронов с плазменным эмиттером / И. В. Сवादковский [и др.] ; под общ. ред. А.П. Достанко. –Мн.: Бестпринт, 2002. – 214 с.
32. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]. – Екатеринбург : Наука, 1993. – 149 с.
33. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: сб. науч. тр. / науч. ред. Г.А. Месяц. – Новосибирск. – Наука, 1976. – 191 с.
34. Москалев, Б.И. Разряд с полым катодом / Б.И. Москалев. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
35. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 286 с.
36. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е. М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

37. 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.
38. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовников [и др.]. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.
39. V международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» [Электронный ресурс]: материалы конференции / ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 13–16 ноября 2023 года. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – Режим доступа: <http://ebw.mpei.ru>
40. 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.
41. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
42. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. I / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 1. – С. 66 – 70.
43. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687 – 693.
44. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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 международной научно-технической

- конференции «Инновационные технологии в машиностроении». Новополоцк, 2015. – С. 14-16.
49. 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
 50. Antonovich, D.A. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D.A. Antonovich, V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski [et al.] // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), 2016.– v. 21 is. 2. P 143-159.
 51. Возможность повышения первеанса в плазменных эмиссионных системах на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях / Абраменко С.Н., Антонович Д.А., Груздев В.А., Солдатенко П.Н. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2020. – № 4. – С. 48-52.
 52. Antonovich, D., Gruzdev V., Zalesski V., Soldatenko P. Multi-bit structure for the formation of combined or alternating electron-ion beams / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zalesski, P. Soldatenko // High Temperature Material Processes. – 2020. – V 24. – № 2. – P. 147–156.
 53. Антонович, Д.А. Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. нав. – 2020. –Т.65. – № 3. – С. 285–291.
 54. Электродная структура плазменного электронно-ионного источника для совместного формирования электронных и ионных пучков / Антонович Д.А., Груздев В.А., Солдатенко П.Н., Залесский В.Г. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2020. – № 4. – С. 53-57.
 55. Особенности электронно-оптических систем с плазменным эмиттером на основе стационарных двойных электрических слоев в плазме / Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г. // Известия вузов. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 10 (754). – С. 67-73.
 56. Features of electron optical systems with the plasma emitter based on stationary double electric layers in the plasma / Antonovich D.A., Gruzdev V.A., Zalesski V.G. // Russian Physics Journal. – 2021. – Т. 63. – № 10. – P. 1713-1720.
 57. Пучковые и ионно-плазменные технологии / М.Ф. Ворогушин, В.А. Глухих, Г.Ш. Манукян [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2002. – №3. – С. 101–109.

58. Попов, В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии / В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин. – М. : «Высшая школа», 1988. – 255 с.
59. Елизаров, А.А. Физика интенсивных электронных и ионных пучков. Учебное пособие. – Моск. гос. ин-т электроники и математики. М., – 2007. – 40 с.
60. Каменецких, А. С. Плазменно-пучковые технологии: учебное пособие в 2 ч. / А. С. Каменецких, А. С. Кайгородов ; М-во науки и высшего образования. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024.
61. Гаврилов Н.В. Низкотемпературное азотирование титана в плазме низкоэнергетического электронного пучка / Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 15. – С. 57–64.
62. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.
63. Научные основы разработки промышленных технологических процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М.Н. Босяков, С.А. Бондаренко, А.С. Бондаренко [и др] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов в 2-х книгах; редколлегия: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск. – 2021. – Кн. 2 – С. 60-80.
64. Гаврилов, Н.В. Азотирование нержавеющей стали в плазме импульсного электронного пучка / Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев, А.В. Чукин // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 9. – С. 97-104.
65. Семенов, А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение / А.П. Семенов. – Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
66. Плазменная закалка стали 20Х13 / Е.Н. Сафонов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №2. – С 17-20.
67. Смоланов, Н.А. Микротвердость тонких пленок, полученных ионно-плазменным осаждением / Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин, О.В. Четвертакова // Материаловедение. – 2009. – № 11. – С. 30-35.
68. Табаков, В.П. Многослойные покрытия инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В.П. Табаков, А.А. Ермолаев // СТИН. –2005. – №7. – С. 21-25.
69. Дарковский, Ю.В. Нанесение износостойких покрытий методом КИБ / Ю.В. Дарковский, В.П. Матлахов // СТИН. –2006. – №12. – С. 17-20.
70. Generation of Boron Ions for Beam and Plasma Technologies / A.S. Bugaev [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62. – P. 1117–1122.

71. Gavrilov, N.V. Low-Temperature Nitriding of Titanium and Titanium Alloys by Electron-Beam-Generated Plasma / N.V. Gavrilov, A.S. Mamaev // *Elektrotechnica & Electronica*. – 2009. – Vol. 44, No 5–6. – P. 142–148.
72. Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / К.В. Волков, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Гришунин // Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс». – 2013. – 225 с.
73. Золотухин, Д.Б. Пучково-плазменное осаждение углеродсодержащих покрытий на внутреннюю поверхность диэлектрической полости / Д. Б. Золотухин, А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-й Международной конференции, Минск, 30 сентября – 03 октября 2019 г.* / редкол.: В. В. Углов [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2019. – С. 536–538.
74. Поболь, И.Л. Применение электронно-лучевых технологий – этап решения проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом /И.Л. Поболь // *Вестник ПГУ. Сер В., Промышленность. Приклад.науки.* – 2014. – №3. - С.35-42
75. Поболь, А.И. Влияние режимов электронно-лучевой наплавки на толщину и равномерность однослойного покрытия при восстановлении изделий из титановых сплавов / А.И. Поболь, В.Г. Залесский // *Литье и металлургия.* – 2022. – № 4. – С.101-107.
76. Akash, B. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review / Bhati Akash, Anuj Kumar Sehgal // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – P. 379.
77. *Additive manufacturing applications and innovations* / Edited by Y, Rupinder Singh, J. Paulo Davim. – CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2019. – 173 P.
78. Залесский, В.Г. Использование электронно-лучевой сварки для изготовления полуволновых сверхпроводящих резонаторов ускорителей частиц / В.Г. Залесский, А.И. Поболь // *Вестник Белорусско-Российского университета.* – 2025. – № 1 (86). – С. 14-22.
79. Поболь, А.И. Оптимизация режимов электронно-лучевой наплавки однослойного покрытия при восстановлении изделий из титановых сплавов / А.И. Поболь, В.Г. Залесский // *Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф.* / Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 183-187.
80. 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.

81. Новиков, А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
82. 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.
83. Форрестер, А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М.: Мир, 1992. – 358 с.
84. Физика и технология источников ионов / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М. : Мир, 1998. – 496 с.
85. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л.: Энергия, 1972. – 271 с.
86. 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.
87. Никулин, С.П. Влияние ионной эмиссии на характеристики тлеющего разряда с полым катодом / С.П. Никулин // ЖТФ. – 2000. – Т.70, № 10. – С. 122–124.
88. 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.
89. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов [и др.] / – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
90. Вендик О.Г., Горин Ю.Н., Попов В.Ф. Корпускулярно-фотонная технология. – М.: Высш.шк., 1984. – 240 с.
91. Силады М., Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, С36 1990. — 639 с.
92. Романов В.С., Стародубцев С.В. Прохождение заряженных частиц через вещество. – Ташкент: Изд-во ФАН, 1962.
Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. – М.: Сов. радио, 1979. – 104 с.
93. Lieberman, M.A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing / M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg // A JOHN WILEY & SONS, INC PUBLICATION. – 2005. – 794 P.
94. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М.: Мир, 1987. – 398 с.
95. Франк-Каменецкий, Д.А. Лекции по физике плазмы / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Атомиздат, 1964. – 283 с.
96. Основы физики плазмы / В.Е. Голант [и др.] – М. : Атомиздат, 1977. – 384 с.

97. Riemann K. U. The Bohm criterion and sheath formation // J. Phys. D. – 1991. – Vol. 24. – P. 493 – 518.
98. Langmuir, I. Positive Ion Currents from the Positive Column of Mercury Arcs / I. Langmuir // Science. – 1923. – Vol. 33, № 6. – P. 954–989.
99. 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.
100. Ландау, Л.Д. Курс теоретической физики / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // М., Наука – в 5 томах, т 2. Теория поля – 1988. – 736 .
101. Humphries, S. Charged Particle Beams / S. Humphries // Wiley – 1990. –512 P.
102. 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 л.
103. 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.
104. Груздев В.А., Залесский О механизме возникновения электрического поля в плазме при эмиссии электронов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2014. – № 4. – С. 103–108.
105. 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.
106. Галанский В.Л. [и др.] Параметры плазмы в эмиссионном канале плазменного эмиттера // ЖТФ. – 1990. – Т. 60, вып. 4. – С. 168 – 170
107. 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.
108. Груздев В. А. Залесский В. Г. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87 – 92.
109. 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.
110. 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.

111. Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С.114 – 123.
112. Gruzdev V.A., Zaleski V.G. Emission current formation in plasma electron emitters // Plasma Physics Reports. – 2010. – №36. – p. 1191-1198
113. 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.
114. Gruzdev, V.A. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources / V.A Gruzdev, V.G. Zaleski // Electrotechnica and electronica (Bulgaria). – 2014 – V. 49, № 5-6. – P. 264–268.
115. 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.
116. Крейндель Ю. Е. Параметры системы плазма – слой в электродной полости разряда низкого давления // ЖТФ. – 1988. – Т. 58, вып. 6. – С. 1208 – 1209.
117. Жаринов, А. В., Коваленко Ю. А. К теории электронных коллекторов в газовом разряде // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 681 – 686.
118. Лоусон, Дж. Физика пучков заряженных частиц / Дж. Лоусон.; пер. с англ. А.В. Агафонова. – М. : Мир, 1980. – 438 с.
119. Иванов, А.В. Электронная оптика. Интенсивные электронные и ионные пучки: учеб. пособие [Электронное издание] – Новосибирск, 2011. – 193 с.
120. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Сов. Радио, 1966. – 454 с.
121. Царев Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп. – М.: Энергия, 1967. – 671 с.
122. 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.
123. 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.
124. Мартенс, В.Я. Переходная область между неравновесной плазмой и отрицательным электродом / В.Я. Мартенс // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, вып. 10. – С. 45–52.

125. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твёрдом теле / В. Эбелинги, В Крефт, Д. Кремп – Москва, 1979. – 264 с.
126. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе от-ражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. ВУЗов. Физика. – 1992. – Т.35, № 5. – С. 5–23.
127. Райзер, Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю.П. Райзер. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 416 с
128. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
129. Численное моделирование формирования электронных пучков в источниках двух типов с плазменным катодом и их транспортировки в магнитном поле / В. Т. Астрелин, М.С. Воробьев, И.В. Кандауров, В.В. Куркучиков // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, № 11. – С. 1529–1533.
130. Грановский, В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский // – М.: Наука, 1971. – 525 с.
131. Расчет движения релятивистских пучков заряженных частиц в электромагнитных полях / В.Т. Астрелин, В.М. Свешников, ПМТФ. – 1979. – № 3. – С. 3-8.
132. Теория твердого тела / А.С. Давыдов, Москва – 1976. – 639
133. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твёрдом теле / В. Эбелинги, В Крефт, Д. Кремп – Москва, 1979. – 264 с.
134. Литвинов И. И. Граничные условия при диффузии неравновесной плазмы в магнитном поле // ПМТФ. – 1977. – № 1. – С. 52–55.
135. Ульянов К. Н. Физическая и математическая модели плазменного катода с сеточной стабилизацией плазменной границы // ТВТ. – 1998. – Т. 36, № 1. – С. 25–32.
136. 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.
137. Груздев, В.А. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь // Инженерно физический журнал. – 2007. – № 2. – С. 134 – 142
138. 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.