

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

УДК 537.533; 621.384, 621.785

№ госрегистрации 20191467

Инв. № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

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

\_\_\_\_\_ Ю.П. Голубев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЧКОВ ПУШЕК  
С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

в составе комплексного задания «Исследование методов электронно-лучевой сварки  
конструкционных сталей с повышенным серным эквивалентом и разработка  
технологических основ получения соединений с требуемым уровнем качества»  
(заключительный)

задание 4.1.26

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, раздел 1, 2  
заключение)

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

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.А. Антонович  
(общее руководство,  
введение, разделы 1–3,  
заключение)

Исполнители:

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

\_\_\_\_\_

подпись, дата

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

Младший научный сотрудник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

П.Н. Солдатенко  
(разделы 2, 3)

Младший научный сотрудник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.Н. Абраменко  
(раздел 3)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Л.В. Ищенко

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Параметры и характеристики электронных пучков, применяемых для технологических целей .....	7
1.1 Параметры электронных пучков, определяющие их технологическое применение .....	7
1.2 Характеристики и особенности электронных пучков, генерируемых пушками с плазменным эмиттером.....	10
2 Разработка аппаратуры диагностики электронных пучков .....	15
2.1 Принципы построения системы измерения и обработки параметров электронных пучков.....	15
2.2 Система измерения параметров электронного пучка.....	18
2.3 Схемотехническая реализация системы управления позиционированием диагностической аппаратуры .....	21
3 Экспериментальный макет плазменного источника электронов с управляющим электродом .....	25
3.1 Условия формирования эмитирующей плазмы в плазменном источнике электронов .....	25
3.2 Макет плазменного источника электронов для формирования сфокусированных или импульсных пучков малой длительности .....	30
3.3 Макет плазменного источника электронов с управляющим электродом и расширителем .....	34
3.4 Результаты измерений параметров электронных пучков .....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	78
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	90

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута и др.; Пер. с англ. Н.К. Мышкина и др.; под ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев П.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка – К.: Наукова думка, 1987. – 256 с.
4. Шипко, А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
5. Браверман В.Я., Скурихин Д.А., Шабанов В.Ф. и др. Использование электроннолучевого сварочного оборудования для поверхностной обработки // Свароч. производство. – 1996. – №12. – С. 31–33.
6. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 120 с.
7. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
8. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом // Плазменная эмиссионная электроника : Труды II Междунар. сем., / Улан-Удэ, 17-24 июня 2006 г. – С. 108–112.
9. Барченко В.Т. [и др.] Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий. под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
10. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
11. Груздев В.А. [и др.] Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении // Тяжелое машиностроение. – 2004. – №9 – С. 25 – 32.

12. Достанко А. П. [и др.] Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2009. – 199 с.
13. Свадковский И. В. [и др.] Источники электронов с плазменным эмиттером. под общ. ред. А.П. Достанко. – Мн.: Бестпринт, 2002. – 214 с.
14. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 286 с.
15. 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.
16. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 // Вестник ПГУ. Сер. С: Фундам. науки. – 2017. – № 4 – С. 45–51.
17. Humphries, Stanley. Charged Particle Beams - Dover Publications Inc, Mineola, New York, 2013. – 847 p.
18. V. G. Zalesski, D.A. Antonovich. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.
19. Груздев, В.А. [и др.] Влияние давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера // Вестник ПГУ. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2007. – № 3. – С. 90–98.
20. Груздев, В.А., Залесский В.Г. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87–92.
21. 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.
22. Иванов, А.В. Электронная оптика. Интенсивные электронные и ионные пучки: учеб. пособие [Электронное издание] – Новосибирск, 2011. – 193 с.
23. Chekh. Yu., Goncharov A., Protsenko I. Effect of the electrostatic plasma lens on the emittance of a high-current heavy ion beam // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 86 (4). – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1855428>
24. Козлов, О.В. Электрический зонд в плазме – М.: Атомиздат, 1969. – 267 с.

25. Алексеев, Б.В., Котельников В.А. Зондовый метод диагностики плазмы – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.
26. Методы исследования плазмы: Пер. с англ. / Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. – М.: Мир, 1971. – 552 с.
27. Казаков, А.В. Формирование импульсных электронных пучков в форвакуумной области давлений в системе с плазменным катодом на основе дугового разряда // Плазменная эмиссионная электроника: Труды V Междунар. Крейнделевского семинара, Улан-Удэ, 3–8 августа 2018 г. – С. 37–44.
28. Андреев, М. [и др.] Устройство для диагностики электронного пучка // Плазменная эмиссионная электроника: Труды VI Междунар. Крейнделевского семинара, Улан-Удэ, 3–7 августа 2015 г. – С. 39–44.
29. Togawa, K., Tanaka T., Onoe K. etc. Emittance Measurement on the CeB<sub>6</sub> Electron Gun for the Spring-8 Compact SASE Source FEL Project // Proc. 3rd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC2004). – Gyeongju, Korea, 2004. – p. 158–160.
30. Togawa, K., Shintake T., Baba H. etc. Emittance Measurement on the CeB<sub>6</sub> Electron Gun for the Spring-8 Compact SASE Source // Proc. 26th International Free Electron Laser Conf. (FEL2004). – Trieste, Italy, 2004. – 351–354.
31. 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.
32. Груздев В.А., Залесский В. Г., Руголь Д. Г., Русецкий И.С. Программно-аппаратный комплекс для диагностики электронно-оптических систем и пучков заряженных частиц // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 2. – С. 177–178.
33. Груздев, В.А., Залесский В.Г., Петрович О.Н. Численное моделирование фазовой характеристики электронного пучка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 102–110.
34. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. – Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
35. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки – М.: Советское радио, 1966. – 456 с.
36. Пирс, Дж. Р. Теория и расчет электронных пучков – М. : Советское радио, 1956. – 214 с.

37. 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.
38. 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
39. Чен, Ф. Введение в физику плазмы – М.: Мир, 1987. – 398 с.
40. Силады М., Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 639 с.
41. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
42. Месяц Г.А. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: сб. науч. тр. – Новосибирск. – Наука, 1976. – 191 с.
43. 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
44. Форрестер, А.Т. Интенсивные ионные пучки – М.: Мир, 1992. – 358 с.
45. Физика и технология источников ионов / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М. : Мир, 1998. – 496 с.
46. Габович, М.Д. Физика и техника плазменных источников – М. : Атомиздат, 1972. – 304 с.
47. Завьялов В.А., Сыровой В.А. Экспериментальные и теоретические аспекты формирования электронно-ионных потоков // Плазменная эмиссионная электроника: труды III Междунар. семинара, Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. – С. 45–61.
48. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки – Л.: Энергия, 1972. – 271 с.
49. Семенов А. П. Техника распыления ионными пучками. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1996. – 120 с.
50. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.

51. Семенов А.П. Эмиссия ионов из разряда с полым катодом в режиме проникновения плазмы в высоковольтный промежуток // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, № 4. – С. 42–47.

52. Gruzdev V.A., Zalesski 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.

53. Grusdev V.A., Zalesski V.G., Antonovich D.A., Golubev Yu.P. Universal plasma electron source. // Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399–405.

54. Yang B. X., Lumpkin A. H. Simultaneous measurement of electron beam size and divergence with an undulator // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. – p. 2161-2163

55. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Скрипаль Л.П. Прибор для измерения параметров ионного пучка круглого сечения, позволяющий оценивать эмиттанс пучка за импульс // ЖТФ. – 1997. - №9. – с. 135-136

56. Горбунов Н.А., Копытов А.Н., Латышев Ф.Е. Нахождение энергетического распределения электронов в плазме по измерениям первой и второй производных зондового тока // ЖТФ. – 2002. - №8. – с. 7-12

57. Бакеев, И. Ю. Генерация форвакуумным плазменным источником электронов сфокусированных непрерывных пучков для обработки диэлектрических материалов: дис. канд. техн. наук: 01.04.04 / И. Ю. Бакеев. – Томск, 2019. – 130 с.

58. Пермяков, Г. Л. Взаимосвязь геометрических параметров швов с параметрами тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке с осцилляцией луча: дис. канд. техн. наук: 05.02.10 / Г. Л. Пермяков. – Пермь, 2018. – 151 с.

59. <https://www.chipdip.ru/product0/15404>

60. <https://www.chipdip.ru/product0/31521>

61. <https://www.chipdip.ru/product0/8001591605>

62. <https://www.chipdip.by/product/grm31cr72e104k>

63. <https://www.chipdip.by/product0/9000565738>

64. <https://www.chipdip.by/product0/9000565723>

65. <https://www.chipdip.by/product0/9000565732>



66. <https://ru.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/L7812CV?qS=5Uvc6lfWVJzVGZQZmBnyng>
67. <https://www.chipdip.by/product/pbs10b-2-black>
68. <https://www.tme.eu/by/ru/details/s8vk-g24024/bloki-pitaniia-na-din-reiku/omron/>
69. <https://www.tme.eu/by/ru/details/s8vk-g12024/bloki-pitaniia-na-din-reiku/omron/>
70. <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>
71. <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>
72. [https://darxton.ru/catalog\\_item/dm556e-leadshine-napryazhenie-20-50-v-tok-do-5-6-a/](https://darxton.ru/catalog_item/dm556e-leadshine-napryazhenie-20-50-v-tok-do-5-6-a/)
73. <https://www.se.com/ru/ru/product/11213>
74. <https://www.saa.su/product/siemens-logo-tde-6ed1-055-4mh00-0ba1/>
75. [https://darxton.ru/catalog\\_item/shagovyy-dvigatel-st57-56-flanets-57mm-nema23/](https://darxton.ru/catalog_item/shagovyy-dvigatel-st57-56-flanets-57mm-nema23/)
76. <https://ru.mouser.com/ProductDetail/ONSemiconductor/1SMB5929BT3G>
77. <https://ru.mouser.com/ProductDetail/?qS=UeXq8qLVREE4mVP09LVybw%3D%3D>
78. <https://www.chipdip.ru/product/lm358an-nopb>
79. <https://www.chipdip.by/product/300-021-12>
80. [https://www.chipdip.by/product/rt3mp-2?from=suggest\\_product](https://www.chipdip.by/product/rt3mp-2?from=suggest_product)