

17. Кархин В. А. Тепловые процессы при сварке. 2-е изд., переработанное и доп. / СПб: Изд. Политехнического университета, 2015. 572 с.
18. Varbai B., Adonyi Y., Baumer R., Pickle T., Dobranszky J., and Majlinjer K. Weldability of Duplex Stainless Steels — Thermal Cycle and Nitrogen Effects // *Welding Journal*. MARCH 2019. Vol. 98. P. 78—87. <https://doi.org/10.29391/2019.98.006>
19. Graf M., Niederhoff K. Toughness behavior of heat-affected zone (HAZ) in submerged-arc welded large-diameter pipe // *Pipe line technology conference, Oostende (Belgium)*. 1990. № 15—18. P. 131—139.
20. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P. Modification of structure and properties of metal of permanent joint formed in mode of pulsed change of energy parameters of mode / *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 042034*, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/4/042034>.
21. Сливинский А. А., Жданов Л. А., Коротенко В. В. Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах // *Автоматическая сварка*. 2015. № 11. С. 32—39.
22. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Костин В. А. Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом // *Автоматическая сварка*. 2015. № 3-4. С. 17—25.
23. Паршин С. Г. *Металлургия сварки: монография* / СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 508 с.
24. Kapustka N., Conrardy C., Babu S., and Albright. Effect of GMAW Process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds The effects of variables on microstructure and mechanical properties were explored for advanced high-strength steels // *WELDING JOURNAL*. 2008. Vol. 87. P. 135—148.
25. Dingjian Ye, Dongsheng Wu, Xueming Hua, Chen Xu, Yixiong Wu. Using the multi-wire GMAW processes for controlling the formation of humping // *Welding in the World*. Accepted: 10 March 2017. International Institute of Welding. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0458-5>.
26. Korotaev D. N., Tarasov E. E., Poleschenko K. N., Eremin E. N., Ivanova E. V. Formation of wear resistant nanos-structural topocomposite coating on metal materials by ionic-plasma processing // *JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES*. 2018. Institute of Physics Publishing: Conference MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UPDATE 2018, MSTU 2018, Omsk, 27—28 February 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012037

УДК 812.35.19.15.21

Ю. И. СЕМЕНОВ, инж., О. Н. АЛЯКРИНСКИЙ, инж.,  
 Д. Ю. БОЛХОВИТЯНОВ, канд. техн. наук, Т. А. ДЕВЯТАЙКИНА, инж.,  
 М. Ю. КОСАЧЕВ, инж., П. В. ЛОГАЧЕВ, д-р физ.-мат. наук, Э. А. КУПЕР, д-р техн. наук,  
 В. К. ОВЧАР, инж., В. В. РЕПКОВ, канд. техн. наук,  
 А. А. СТАРОСТЕНКО, канд. физ.-мат. наук, А. С. ЦЫГАНОВ, инж.  
 Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
 E-mail: Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

## Источник пучка электронов с лазерным подогревом катода для электронно-лучевых технологий

Представлен новый источник пучка электронов с лазерным подогревом катода. Приведены общее описание, основные параметры и компоновка источника пучка электронов. Описана конструкция катодного узла и особенности его работы, заключающиеся в управлении током эмиссии с катода изменением температуры катода с помощью регулирования мощности лазерного подогрева. При таком методе из-за теплоемкости катода и близлежащих к нему деталей время достижения заданного уровня тока источника с момента подачи мощности лазерного составляет несколько секунд. Предложено способ сокращения этого времени до долей секунды форсированием мощности подогрева в начале включения подогрева и введением предварительного подогрева, и так же предложено стабилизировать ток источника введением обратной связи сигнала управления мощностью подогрева с сигналом тока высоковольтного источника электронной пушки.

Обсуждается диапазон регулирования тока источника.

A new source of an electron beam with laser heating of the cathode is presented. The general description, the main parameters and the arrangement of the electron beam source are given. The cathode assembly and its operation features are described, which consist in controlling the emission current from the cathode by changing the cathode temperature by controlling the laser heating power. With this method, due to the heat capacity of the cathode and the parts nearby, the time to reach the set current level of the source from the moment the laser power is applied is several seconds. A method is proposed to reduce this time to fractions of a second by forcing the heating power at the beginning of turning on the heating and introducing preheating, and it is also proposed to stabilize the source current by introducing feedback of the heating power control signal with the current signal of the high-voltage source of the electron gun.

The source current control range is discussed.

**Ключевые слова:** электроннолучевая пушка, лазерный подогрев катода, катодный узел, ток эмиссии катода, диапазон регулирования тока электронного пучка

**Key words:** electron beam gun, laser cathode heating, cathode assembly, cathode emission current, electron beam current control range

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Источники электронного пучка с энергией до 200 кэВ широко применяются в процессах термической обработки материалов для синтеза тугоплавких композитов и соединений, получения нанопорошков, электронно-лучевой сварки и в аддитивных технологиях, а также используются в проведении научно-технических исследований [2—4]. Поэтому актуален вопрос совершенствования источников электронного пучка.

Цель статьи — представить источник пучка электронов с лазерным подогревом катода. Обычно источники пучка электронов для электронно-лучевых технологий предполагают наличие достаточно дорогой и сложной электроники накала катода и управления током электронной пушки, находящейся под потенциалом катода, что требует соответствующую электрическую изоляцию схемы подогрева катода и управления током электронной пушки, а также требует тщательной защиты при пробоях.

Достоинства представленного источника:

- использование лазерного подогрева катода позволяет управлять током электронного пучка источника модуляцией мощности лазера подогрева катода;
- мощность излучения лазера передается к катоду через вакуум и не требуется электрическая изоляция лазера от катода, нахо-

дящегося под потенциалом ускоряющего напряжения пушки;

- для передачи ускоряющего напряжения электронной пушки может быть применен одножильный высоковольтный кабель.

## 2. ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА

### 2.1. Основные параметры и общая компоновка

Источник построен на основе ранее изготовленного в Институте ядерной физики СО РАН энергоблока для установок электронно-лучевой сварки [5]. Электронная пушка работает по диодной схеме.

Основные параметры источника представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Тип лазера, длина волны излучения, мощность	иттербиевый волоконный, непрерывный с внешней модуляцией мощности, 1070 нм, до 500 Вт
2.	Энергия электронов-пучка	60 кэВ
3.	Допустимые пульсации энергии электронов	≤0,5%
5.	Ток пучка электронов	до 200 мА
6.	Катодный узел	охлаждается деионизованной водой
7.	Материал катода	тантал или гексаборид лантана

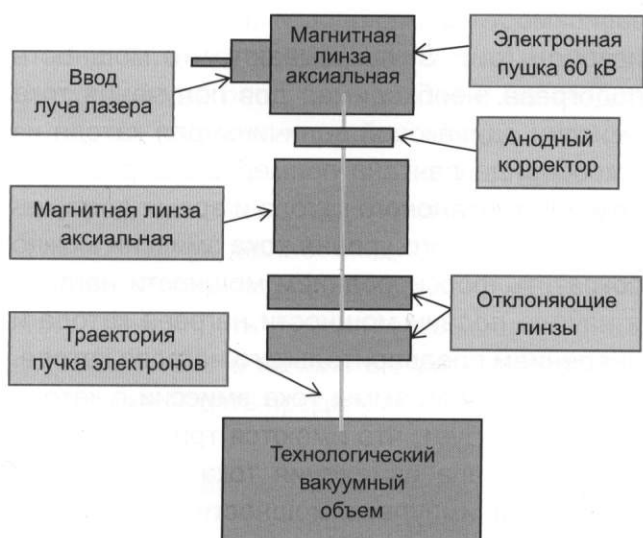


Рис. 1. Блок-схема источника

Как показано на блок-схеме (рис. 1), электронный пучок после формирования в электронной пушке проходит через следующие элементы магнитной оптики:

- анодный корректор, служащий для совмещения траектории пучка с осью магнитной оптики;

- аксиальную магнитную линзу для фокусировки пучка на обрабатываемую мишень в технологической вакуумной камере;

- две отклоняющие линзы, с помощью которых можно направить электронный пучок на заданную точку обрабатываемого материала и перемещать пучок по необходимой траектории, а также осуществить параллельный перенос пучка.

Для индикации формы импульса мощности лазерного подогрева катода электронной пуш-

ки источник может быть скомплектован простым волоконно-оптическим индикатором лазерного излучения [6].

На рис. 2 показана осциллограмма измерения диаметра пучка источника в кроссовере на полувысоте профиля пучка путем круговой развертки пучка поперек щели шириной от 0,3 до 0,5 мм в танталовой пластине толщиной 0,8 мм [6].

Измеренный диаметр профиля пучка на полувысоте — 0,43 мм при токе 2,8 мА.

## 2.2. Катодный узел

Катодный узел установлен на секционированном высоковольтном изоляторе. На рис. 3 показана схема лазерного подогрева катода. Луч лазера по волоконному кабелю подводится к коллиматору 3 и через кварцевое окно 4 и медное охлаждаемое поворотное зеркало 5 направляется на катод 1. Поворотное зеркало 5 используется для минимизации оседания паров материала катода на кварцевое окно. Рабочий вакуум катодного узла порядка  $10^{-4}$  мбар и свободный пробег частиц в нем много больше размеров катодного узла. Поэтому частицы пара катода в основном конденсируются на противоположной от катода стенке, только часть отраженных частиц пара конденсируются на стекле окна ввода луча лазера, а тонкий слой конденсированного на поворотном зеркале не нарушают плоскостности его поверхности и мало влияют на отражательную способность зеркала. К катодному узлу для охлаждения подводится деионизованная вода, так как мощность подогрева катода может быть до 200 Вт.

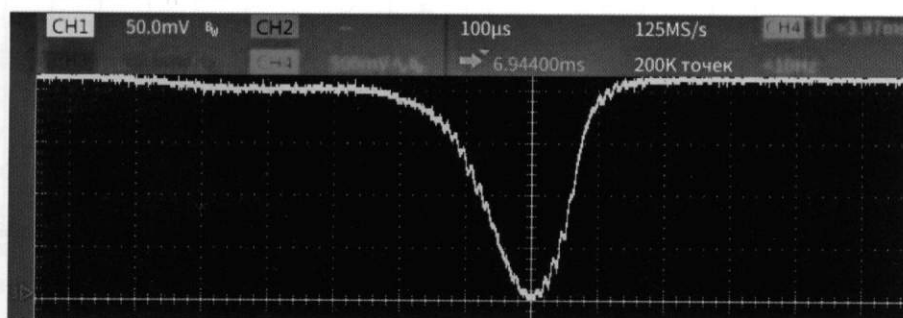
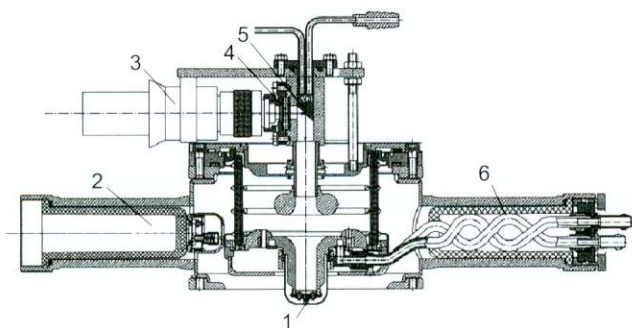
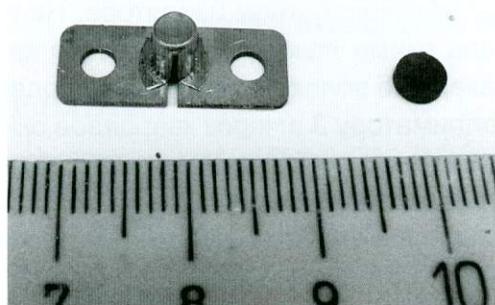


Рис. 2. Осциллограмма измерения профиля пучка





**Рис. 3. Схема лазерного подогрева катода:** 1 — катод, 2 — ввод высокого напряжения, 3 — коллиматор, 4 — окно ввода лазерного излучения, 5 — медное поворотное зеркало с охлаждением, 6 — ввод деионизированной воды охлаждения катодного узла



**Рис. 4. Фото танталового катода (слева) и катода из гексаборида лантана**

В источнике используется катод из гексаборида лантана диаметром 3 мм, толщиной 1,4 мм или танталовый катод диаметром 4 мм, толщиной 0,2 мм (рис. 4).

### 3. УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ИСТОЧНИКА И ЕГО СТАБИЛИЗАЦИЯ

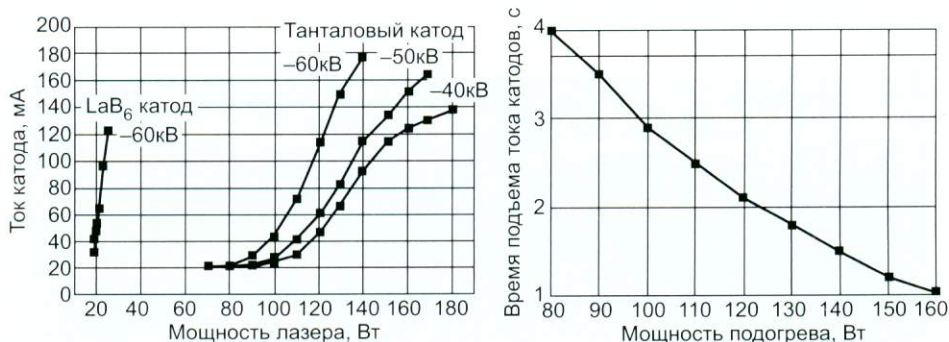
Графики тока источника (слева) и времени подъема тока источника с уровня 0,1 до 0,9 в

зависимости от мощности подогрева катода лазером (рис. 5) показывают, что мощность подогрева, необходимая для получения тока эмиссии одинаковой величины для катода из гексаборида лантана примерно в 5 раз ниже чем для танталового катода и время достижения до заданного уровня тока эмиссии можно сократить форсированием мощности нагрева в начале подачи мощности нагрева катода и введением предварительного нагрева катода.

Из осциллограммы тока эмиссии с катода (рис. 6) следует, что имеются три последовательных этапа изменения тока эмиссии при включении импульса мощности подогрева с передним фронтом 20 мкс:

- подъем тока эмиссия катода до уровня 0,1 амплитуды тока эмиссии продолжается несколько секунд после подачи импульса мощности подогрева — это время разогрева катода до температуры начала измеримой эмиссии;
- дальнейший подъем тока до уровня 0,9 амплитуды тока эмиссии в течении нескольких секунд — это время дальнейшего роста температуры катода до рабочей температуры;
- медленный подъем тока эмиссии — это время повышения температуры катода из-за медленного разогрева окружающих катод более массивных деталей.

Для управления величиной рабочего тока источника и ускорения процесса выхода тока источника на рабочий уровень, а также для стабилизации величины рабочего тока было сделано устройство стабилизации тока источ-



**Рис. 5. Графики тока катода (слева) и времени подъема тока катода с уровня 0,1 до 0,9 в зависимости от мощности подогрева лазером**



ника и управления током источника регулированием мощности подогрева катода лазером. На устройство поступает внешний сигнал управления током электронного пучка и сигнал обратной связи от датчика тока источника высокого напряжения электронной пушки. Усилитель ошибки управляет мощностью подогрева лазером. Кроме того, в устройстве предусмотрена возможность форсировать мощность подогрева катода в начале включения подогрева, и также подать предварительный подогрев на катод.

Осциллограммы, полученные с использованием этого устройства показаны на рис. 7 и 8. Из них видно, что предварительный подогрев катода и форсирование мощности подогрева в начале эмиссии с катода сокращает время подъема тока эмиссии до уровня 0,1 амплитуды тока эмиссии и время достижения уровня 0,9 амплитуды тока эмиссии с нескольких секунд до долей секунды, а введение обратной связи сигнала управления мощностью подогрева с сигналом тока высоковольтного источника электронной пушки стабилизирует величину тока эмиссии.

#### 4. ДИАПАЗОН РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ИСТОЧНИКА

Электронная пушка работает по диодной схеме. Поэтому при заданных ускоряющем напряжении, расстояниях катод—фокусирующий электрод и катод—анод ток пушки эффективно управляется регулированием мощности подогрева в области ограничения плотности тока эмиссии температурой катода, а при дальнейшем повышении температуры наступает ограничение плотности тока эмиссии пространственным зарядом в области катода и снижается эффективность управления током пушки регулированием мощности подогрева. Эту проблему можно решить применением сменных фокусирующих электродов для конкретного диапазона рабочего тока, оптимизируя расстояния катод—фокусирующий электрод и катод—анод или регулируя ускоряющее напряжение пушки, то есть оптимизируя первеанс электронной пушки для заданного диа-

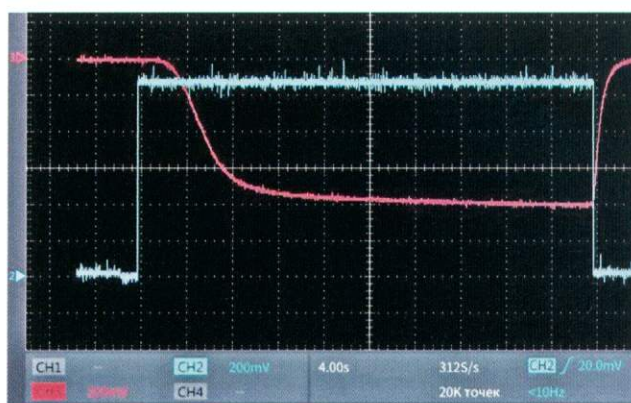


Рис. 6. Осциллограмма тока эмиссии с танталового катода при его нагреве прямоугольным импульсом мощности лазера с фронтом  $\approx 20$  мкс  
CH2 — импульс мощности лазерного подогрева 22 Вт;  
CH3 — сигнал тока эмиссии с цилиндра Фарадея

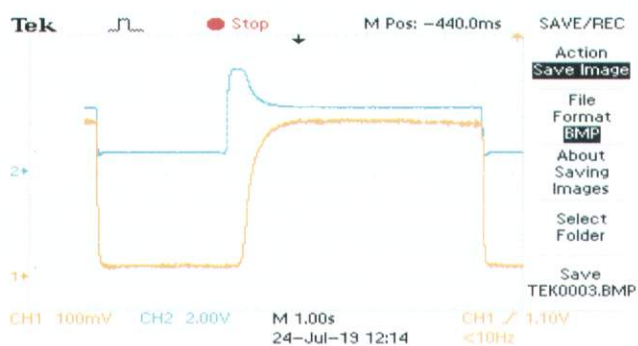


Рис. 7. Импульс тока эмиссии с предварительно подогретого танталового катода и при форсировании мощности подогрева в начале подачи подогрева. Предварительный подогрев — 20 Вт, полная амплитуда полочки подогрева — 78 Вт. Нижняя осциллограмма — сигнал от датчика тока источника высокого напряжения. Время до уровня тока 0,1—0,4 с, фронт тока катода с уровня 0,1 до 0,9—0,8 с

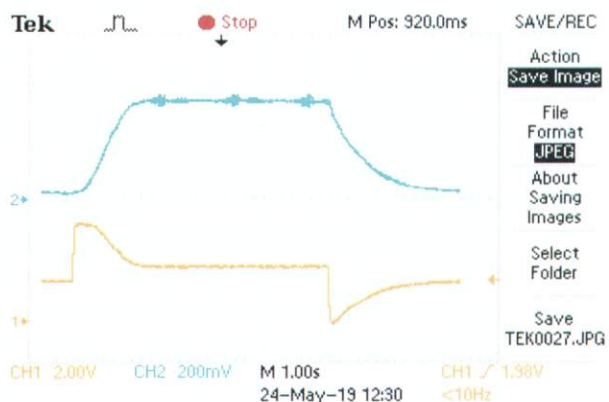


Рис. 8. Импульс тока эмиссии с предварительно подогретого катода из гексоборида лантана и при форсировании мощности подогрева в начале ее подачи. Нижняя осциллограмма — мощность подогрева катода



пазона рабочего тока источника электронного пучка.

Рабочая температура катода ограничена термостойкостью материала катода и скоростью его испарения.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из представленных результатов вытекает, что:

- быстродействие пушки ограничено тепловой инерцией катода, т.е. теплоемкостью катода и при этом часть падающей мощности уносится в основном из-за отражения от поверхности катода, отвода тепла по теплопроводности на детали катодного узла и излучения;
- если не предприняты дополнительные процедуры, то время появления заметной эмиссии и подъема тока катода до рабочего уровня после подачи мощности подогрева, составляет несколько секунд;
- рабочий уровень тока катода не стабилен из-за медленного подъема температуры катода связанного с медленным разогревом массивных деталей, окружающих катод;
- возможно неконтролируемое ослабление мощности подогрева катода из-за запыления поверхностей окна ввода луча и поворотного зеркала;
- быстродействие пушки можно повысить форсированием мощности подогрева в начале включения подогрева и введением предварительного подогрева.

## 6. ВЫВОДЫ

- Источник излучения пучка электронов с лазерным подогревом катода электронной пушки обеспечивает ток до 200 мА.
- Возможно стабилизация и управление током источника модуляцией мощности лазера подогрева.
- Возможна конструкция электронной пушки с лазерным подогревом катода из LaB6 без внешнего водяного охлаждения.
- Упрощается конструкция электронной пушки:  
возможно подвод ускоряющего напряжения электронной пушки одножильным кабелем;

нет достаточно дорогой электроники питания накала катода и управления током пучка, находящейся под полным ускоряющим напряжением электронной пушки;

мощность подогрева катода передается через вакуумную область, которая является наилучшим изолятором, как по электрической прочности, так и по обеспечению вакуумных условий работы катода.

- Стоит отметить некоторые недостатки:
  - возможна механическая усталость материала катода из-за повторяющегося нагрева катода до высоких температур, что может сократить ресурс работы катода, при этом дежурный режим подогрева катода может уменьшить величину перепадов температуры катода, сглаживая эффект механической усталости;
  - относительно высокая стоимость лазера и необходимость работать с лазерной оптикой в обеспыленной зоне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алякринский О. Н., Логачев П. В., Семенов Ю. И. Исследование процесса электронно-лучевой сварки во внешнем магнитном поле // Сварочное производство. 2016. № 7. С. 14—16.
2. Анчаров А. И., Григорьева Т. Ф., Грачев Г. Н., Косачев М. Ю. Исследование механокомпозиатов нитрида бора с вольфрамом и с молибденом в качестве материала в электронно-лучевых и лазерных аддитивных технологиях // Известия РАН. Сер. Физическая. 2019. Т. 83. № 6. С. 842—844.
3. Logachev P. V., Semenov Y. I., Sharapov V. N. Some structural and mineralogical peculiarities of quenching liquids obtained by melting of mantle ultrabasite xenoliths and mafic volcanics by an electron beam // Doklady earth sciences. 2018. № 2. P. 1095—1098.
4. Ancharov A. I., Vosmerikov S. V., Grigoreva T. F., Kosachev M. Y., Semenov Y. I. Studying the possibility of obtaining high-temperature composites via mechanochemical and electron-beam treatment // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. № 7. P. 877—879.
5. Semenov Yu. I., Akimov V. E., Batazova M. A. et al. 60 KEV 30 KW electron beam facility for electron beam technology / Proceedings of EPAC0811th European Particle Accelerator Conference, EPAC 2008, Genoa, Italy, 23—27 June 2008. TUPP161. URL: epaper.kek.jp/e08/papers/tupp161.pdf
6. Алякринский О. Н., Губин К. В., Косачев М. Ю., Купер Э. А., Логачев П. В., Медведев А. М., Овчар В. К., Репков В. В., Семенов Ю. И., Сизов М. М., Старостенко А. А., Федотов М. Г., Цыганов А. С. Прототип источника пучка электронов с лазерным подогревом катода // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 4. С. 8—14.