

УДК 621.78.012.8

© О. Н. Алякринский, М. А. Батазова, Д. Ю. Болховитянов, М. Ю. Косачев,  
П. В. Логачев, А. М. Медведев, Ю. И. Семенов, М. М. Сизов, А. А. Старостенко,  
А. С. Цыганов, 2019

## ПРОТОТИП ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ С МАГНИТНЫМ ПОВОРОТОМ ПУЧКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлен прототип источника электронов с магнитным поворотом пучка для электронно-лучевых технологий. Использование принципа его работы позволит расширить возможности применения электронного пучка в процессах термической обработки материалов для синтеза тугоплавких композитов и соединений, получения нанопорошков и реактивного нанесения защитных покрытий, где имеются повышенные парообразование и загрязнение в технологическом объеме, а также производить электронно-лучевую сварку в труднодоступных местах. Приведены критерии и способ выставки магнитного зеркала. Проведенные измерения профиля пучка показывают, что смещение относительно плоскости антисимметрии магнитного зеркала приводит к незначительному увеличению поперечного сечения пучка в месте кроссовера пучка, размеры пучка до и после поворота совпадают и пучок прототипа применим для электронно-лучевой сварки.

*Кл. сл.:* термическая обработка материалов, синтез жаростойких материалов, электронно-лучевая сварка, магнитный поворот электронного пучка, фокусировка электронного пучка, профиль электронного пучка, прямонакальный танталовый катод, дифференциальная вакуумная откачка, электронно-лучевая сварка в труднодоступных местах

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс преобразования энергии фокусированного электронного пучка в несколько десятков килоэлектрон-вольт в тепловую энергию при взаимодействии с веществом широко используется в процессах термической обработки материалов для синтеза тугоплавких композитов и соединений, получения нанопорошков, реактивного нанесения защитных покрытий и электронно-лучевой сварки. Эти процессы сопровождаются интенсивным выделением паров и образованием микрокапель. Их попадание в объем электронной пушки может ухудшить термоэмиссию с катода и сократить ресурс работы и катода, и высоковольтной изоляции пушки. Для решения этой проблемы используются различные методы: плазменные ловушки [1], конструкции пушек с изгибом траектории пучка (прожектор Э. Баса), параллельный перенос пучка и т.д.

Цель статьи — представить прототип источника электронов с магнитным поворотом пучка на 270°. Использование принципа его работы позволит расширить возможности применения электронного пучка в электронно-лучевых технологиях в случаях, когда работы ведутся в условиях повышенного парообразования и загрязнения в тех-

нологическом объеме или сварки в труднодоступных местах.

### ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА

На рис. 1 показан общий вид прототипа, в табл. 1 приведены его основные параметры.



Рис. 1. Общий вид прототипа

Табл. 1. Основные параметры прототипа

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Энергия пучка электронов, кэВ	До 60
2	Ток пучка электронов, мА	До 150
3	Катод электронной пушки	Прямонакальный, танталовый, диаметр 4 мм
4	Поворот электронного пучка	На 270° в постоянном дипольном магните
5	Вакуумная откачка	Дифференциальная откачка пространства катод—анод, камеры поворотного магнита и технологической камеры
6	Давление в технологической камере, мбар	До 0.1

Прототип построен на основе ранее изготовленного в Институте ядерной физики СО РАН энергоблока для установок электронно-лучевой сварки [2]. Пучок, сформированный электронной пушкой, фокусируется аксиальной магнитной линзой, проходит через магнитный поворот и фокусируется второй магнитной линзой для формирования пучка нужного размера. Магнитный поворот электронного пучка, представленный в [3], состоит из магнитного зеркала (рис. 2), описанного в [4], в котором электроны проходят петлеобразную траекторию, и двух магнитных квадруполей (рис. 3). В качестве магнитного зеркала используется плоский дипольный магнит из постоянных магнитов с шириной полюсов 110 мм, толщиной 18 мм и зазором 15 мм. Такое магнитное зеркало обладает астигматизмом и для его компенсации используются квадруполи.

При правильном подборе силы краевых полей можно добиться квазиахроматичности магнитного зеркала. В этом случае смещение пучка при изменении магнитного поля или энергии электронов очень мало (рис. 4). Эффект квазиахроматичности наиболее просто объяснить, используя описание действия краевых полей на траекторию электронов. Как показано в [5], диполь с краевыми полями описывается как диполь без краевых полей со смещенной границей, что вызывает соответственное смещение траектории. При увеличении энергии действие краевых полей ослабевает и траектория на выходе смещается ближе к границе диполя, что обеспечивает смещение выхода траектории в обратную сторону.

Для выставки дипольного магнита петлевая траектория электрона рассчитывается численно,



Рис. 2. Фото магнитного зеркала

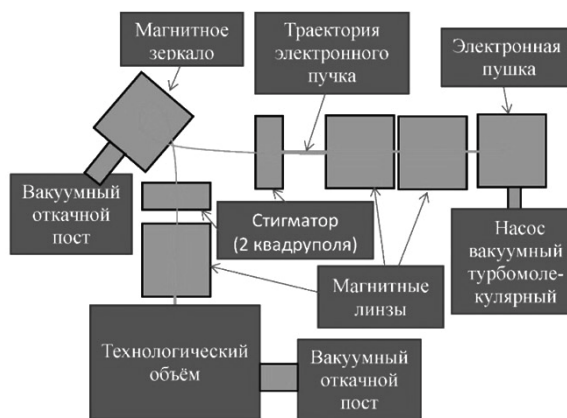
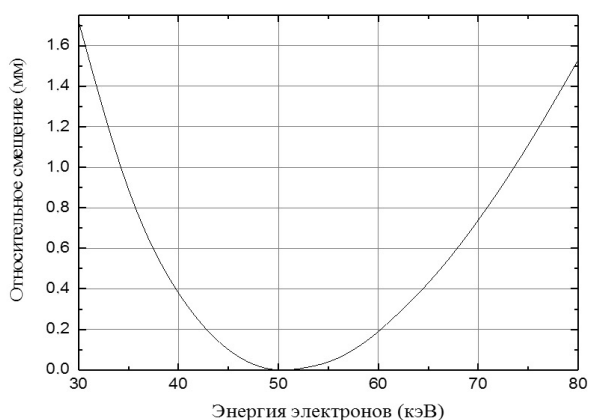


Рис. 3. Блок-схема прототипа



**Рис. 4.** Рассчитанное смещение траектории в зависимости от энергии электронов

и на магните делаются метки в местах проекции точек пересечения торцевой плоскости магнита с осями магнитных линз до и после поворота, как показано на рис. 5, в соответствии с которыми осуществляется визуальная выставка диполя.

Расчет расстояния между метками  $L$  может проводиться и с помощью 2-мерного распределения поля. Например, для используемого диполя

поле хорошо аппроксимируется аналитическим выражением [6]:

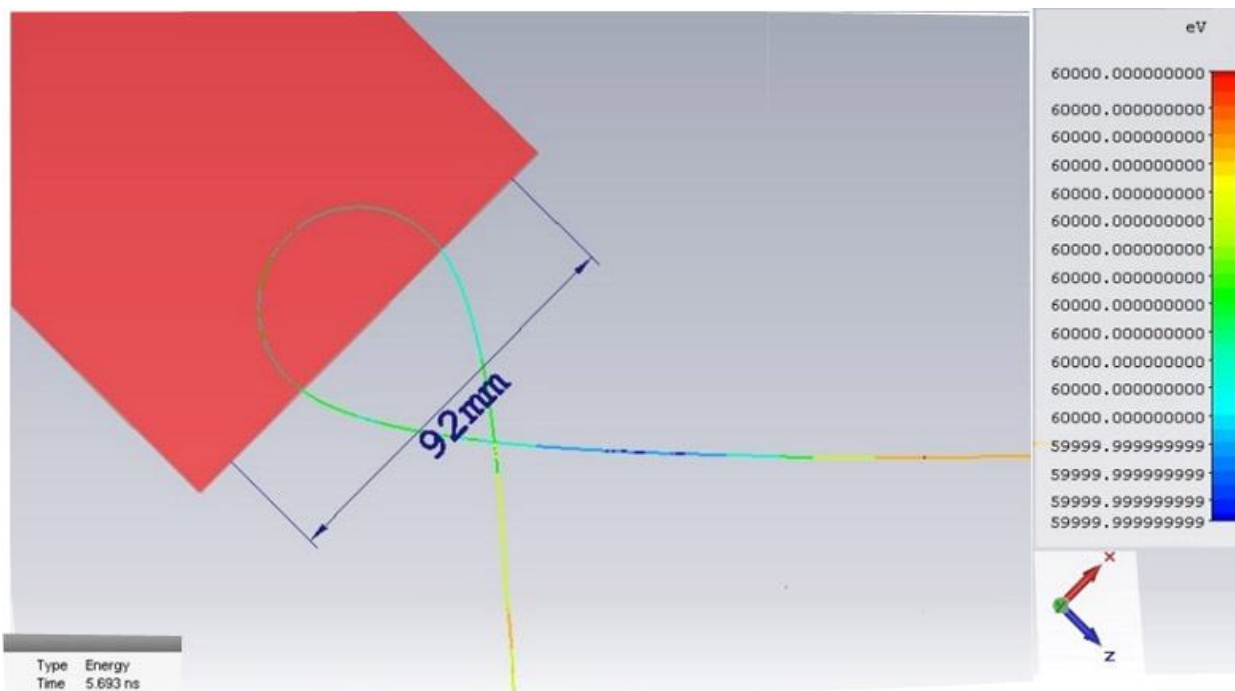
$$b_y|_{y=0} = \frac{1}{1 + e^{E(z)}}, \quad E(z) = \sum_{n=0}^N a_n \cdot \left(\frac{z}{D}\right)^n,$$

где  $b_y$  — нормированное магнитное поле,  $D$  — расстояние между полюсами диполя. Точка начала координат находится в плоскости антисимметрии диполя, посередине проекции края диполя на эту плоскость. Ось  $OY$  направлена от одного полюса диполя к другому полюсу, ось  $OZ$  перпендикулярна торцевой плоскости диполя. Значения  $a_n$  приведены в табл. 2.

Глубина проникновения траектории в диполь  $z_{\min}$  определяется из выражения

$$r \cdot (1 + \sin(\alpha)) = \int_{z_{\min}}^{\infty} b_y(z) dz,$$

где  $r$  — магнитный радиус траектории электрона в максимальном поле диполя,  $\alpha$  — угол между траекторией пучка на большом удалении от магнитного зеркала и осью  $Z$ . Выражение для поперечной составляющей скорости электрона  $V_x$  можно записать в виде



**Рис. 5.** Траектория электрона с энергией 60 кэВ. Расстояние  $L = 92$  мм между точками пересечения осей магнитных линз до и после поворота с торцевой плоскостью диполя при 370 Гс

**Табл. 2.** Значения  $a_n$  при  $n=1, \dots, 5$

$n$	0	1	2	3	4	5
$a_n$	-1.542	4.447	-2.51	0.808	-0.123	0.007

$$V_x(z) = V \left( 1 - \frac{1}{r} \cdot \int_{z_{\min}}^z b_y(z) dz \right),$$

где  $V$  — модуль скорости электрона. Расстояние  $L$  между точками пересечения осей магнитных линз до и после поворота с торцевой плоскостью диполя:

$$L = 2 \left( \int_{z_{\min}}^{\infty} \left( \frac{V_x(z)}{\sqrt{V^2 - V_x(z)^2}} + \operatorname{tg}(\alpha) \right) dz + z_{\min} \right).$$

При 2-мерном описании распределения магнитного поля не учитывается конечная ширина магнитного зеркала, за счет этого спад поля в точках траектории происходит быстрее, чем по оси  $Z$ . Погрешность расстояния между точками пересечения осей магнитных линз до и после поворота торцевой плоскости при таком расчете составляет примерно 5–10 %. Эта особенность распределения магнитного поля обуславливает требование к выставке магнитного зеркала так, чтобы петлевая траектория пучка была симметрична относительно плоскости симметрии диполя  $YZ$ , перпендикулярной плоскости, на которой лежит траектория пучка (рис. 5). Существенное смещение приведет к тому, что падающий на зеркало электронный пучок и исходящий будут проходить в разном

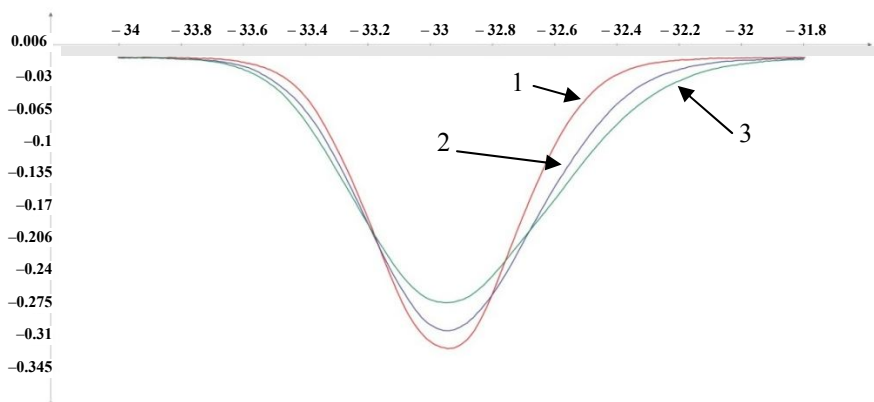
магнитном поле. Это приводит к изменению угла поворота и ухудшению качества пучка.

Вакуум в системе обеспечивается дифференциальной безмасляной откачкой пространства катод—анод, объема поворотного магнита и технологического объема. Рабочий вакуум в пространстве катод—анод  $10^{-4}$  мбар, в технологическом объеме — до 0.1 мбар.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения влияния магнитного зеркала на качество электронного пучка измерялись профили электронного пучка до и после магнитного зеркала. Для измерения профиля электронный пучок сканировался поперек щели шириной 0.3 мм в танталовой пластине. Оптические элементы установки настраивались для получения минимального размера пучка. Сравнение проводилось для тока 10 мА. Результаты измерения профиля пучка показали, что размеры пучка до и после поворота совпадают с учетом разницы расстояний от центра линзы.

Смещение относительно плоскости антисимметрии магнитного зеркала приводит к ухудшению качества пучка. На рис. 6 показаны измеренные профили пучка при различном смещении.



**Рис. 6.** Профили пучка при смещениях пучка относительно плоскости антисимметрии магнитного зеркала.  
1 — смещение на 0; 2 — на 1.3; 3 — на 2 мм





**Рис. 7.** Образцы проплава нержавеющей стали толщиной 10 мм

Из полученных данных следует, что при смещении магнита менее 1 мм качество пучка изменяется при повороте незначительно (рис. 6).

На рис. 7 представлено фото образцов проплава нержавеющей стали толщиной 10 мм, полученные на прототипе.

В целях термической обработки материалов сканируется нагреваемая поверхность электронным пучком, и чаще всего не требуется минимизация размера пятна электронного пучка. Минимизация размера пятна электронного пучка необходима при электронно-лучевой сварке для повышения удельной мощности пучка на единице площади на сварочном шве. На прототипе проведены исследовательские работы [7–9].

### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены критерии и способ выставки магнитного зеркала.

Проведенные измерения профиля пучка показывают:

- смещение траектории электронного пучка относительно плоскости антисимметрии магнитного зеркала приводит к незначительному увеличению поперечного сечения пучка в кроссовере пучка;
- размеры пучка до и после поворота совпадают;
- пучок прототипа применим для электронно-лучевой сварки.

Продемонстрированный прототип может служить основой для новых электронно-лучевых установок, отличающихся своей простотой, ком-

пактностью и широким диапазоном рабочего давления в технологическом объеме. Использование поворота электронного пучка на базе магнитного зеркала и квадрупольной коррекции позволяет расширить возможности применения электронного пучка в процессах термической обработки материалов для синтеза тугоплавких композитов и соединений, получения нанопорошков, реактивного нанесения защитных покрытий и электронно-лучевой сварки, а также производить электронно-лучевую сварку в труднодоступных местах.

Дифференциальная откачка обеспечивает необходимые вакуумные условия работы электронной пушки, может увеличить срок службы катода, повысить стабильность работы установки и позволить проводить электронно-лучевую обработку материалов при высоких уровнях парообразования и загрязнения в технологическом объеме.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кайдалов А.А., Истомин Е.И.* Сварочные электронные пушки. Киев: НТК "Институт электросварки им. Е.О. Патона", 2003. 153 с.
2. *Semenov Yu.I., Logatchev P.V. et al.* 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology // Proceedings of EPAC08. Genoa, Italy. TUPP161.
3. Патент № 2623578, 28.06.2017.
4. *Кельман В.М., Корсунский М.И., Ланге Ф.Ф.* Магнитное электронное зеркало // ЖЭТФ. 1939. Т. 9, вып. 6. С. 681–684.
5. *Coggeshall N.D.* Fringing Flux Corrections for Magnetic Focusing Devices // Journal of Applied Physics. 1947. Vol. 18. P. 855–861. DOI: 10.1063/1.1697559
6. *Enge H.A.* Deflecting magnets // Focusing of Charged Particles. Vol. 2 / Ed. by A. Septier. New York, 1967. P. 203–264. DOI: 10.1016/B978-0-12-636902-1.50012-3
7. *Ancharov A.I., Grigoryeva T.F., Logachev P.V., Semenov Iu.I., Starostenko A.A., Tolochko B.P.* Possibility of application of hafnium and tantalum carbides as materials for additive manufacturing // The International Seminar on Interdisciplinary Problems in Additive Technologies "Problems of materials science in additive technologies". Tomsk, Russia. December 6–9, 2016. P. 2.
8. *Анчаров А.И., Восмерилов С.В., Григорьева Т.Ф., Косачев М.Ю., Семенов Ю.И.* Исследование возможности получения высокотемпературных композиционных материалов методами механохимической и электронно-лучевой обработки // Труды 20-го юбилейного международного междисциплинарного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов". Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2017. Вып. 20, т. 1. С. 12–14.

9. Анчаров А.И., Григорьева Т.Ф., Косачев М.Ю., Семенов Ю.И., Старостенко А.А., Толочко Б.П. О возможности получения изделий из расплавленных тугоплавких карбидов гафния и тантала методом электронно-лучевой обработки // Труды 20-го международного симпозиума "Упорядочение в минералах и сплавах". 10–15 сентября 2017. Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2017. Вып. 20, Т. 1. С. 27–30.

**Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск (Старостенко А.А.)**

Контакты: Семенов Юрий Игнатьевич,  
Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН), Новосибирск (Алякринский О.Н., Батазова М.А., Болховитянов Д.Ю., Косачев М.Ю., Логачев П.В., Медведев А.М., Семенов Ю.И., Сизов М.М., Старостенко А.А., Цыганов А.С.)**

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

## PROTOTYPE OF ELECTRON SOURCE WITH MAGNETIC BEAM ROTATION FOR ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES

**O. N. Alyackrinskiy<sup>1</sup>, M. A. Batazova<sup>1</sup>, D. Yu. Bolkhovityanov<sup>1</sup>, M. Yu. Kosachev<sup>1</sup>,  
P. V. Logatchov<sup>1</sup>, A. M. Medvedev<sup>1</sup>, Yu. I. Semenov<sup>1</sup>, M. M. Sizov<sup>1</sup>,  
A. A. Starostenko<sup>1,2</sup>, A. S. Tsygunov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS), Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia*

This paper describes an online realtime data acquisition system. The design utilizes ARM single board computers that bring very low power requirements, portability and light weightness. We have implemented a unified approach to acquire, transfer and store the measurements. The approach takes advantages of SeedLink protocol to establish online real time data flows between the components of the system. Communication over IPv4 rely on secure virtual private networks. The system features remote management of data logger and all connected devices. For purposes of testing and technology showcase we've implemented support for a range of variometer-type magnetometers.

A prototype of a source of electrons with a magnetic beam rotation for electron-beam technologies is presented. The use of the principle of its operation will make it possible to expand the possibilities of using an electron beam in the processes of thermal processing of materials for the synthesis of heat-resistant composites and compounds, the production of nanopowders and reactive deposition of protective coatings, where there is increased gas evolution and contamination in the technological chamber, and also to produce electron-beam welding in hard-to-reach places.

The criteria and method for the exhibition of a magnetic mirror are given.

The measurements of the beam profile show:

- the displacement relative to the plane of antisymmetry of the magnetic mirror leads to an insignificant increase in the cross section of the beam at the crossover point of the beam;
- the beam dimensions before and after the rotation coincide;
- the prototype beam is suitable for electron beam welding.

**Keywords:** thermal treatment of materials, synthesis of heat-resistant materials, electron beam welding, magnetic rotation of the electron beam, electron beam focusing, electron beam profile, direct-tantalum cathode, differential vacuum pumping, electron beam welding in hard-to-reach places

## REFERENCES

1. Kaydalov A.A., Istomin E.I. *Svarochnye ehlektronnye pushki* [Welding electronic pappus]. Kiev, STC Paton Welding Institute, 2003. 153 p. (In Russ.).
2. Semenov Yu.I., Logatchev P.V. et al. 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology. *Proceedings of EPAC08*. Italy, Genoa, TUPP161.
3. Патент № 2623578, 28.06.2017.
4. Kelman V.M., Korsunskij M.I., Lange F.F. [Magnetic electronic mirror]. *ZhETF* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1939, vol. 9, no. 6, pp. 681–684. (In Russ.).
5. Coggeshall N.D. Fringing Flux Corrections for Magnetic Focusing Devices. *Journal of Applied Physics*, 1947, vol. 18, pp. 855–861. DOI: 10.1063/1.1697559
6. Enge H.A., Septier A., ed. Deflecting magnets. *Focusing of Charged Particles*, vol. 2. New York, 1967, pp. 203–264. DOI: 10.1016/B978-0-12-636902-1.50012-3
7. Ancharov A.I., Grigoryeva T.F., Logachev P.V., Semenov Yu.I., Starostenko A.A., Tolochko B.P. Possibility of application of hafnium and tantalum carbides as materials for additive manufacturing. *The International Seminar on Interdisciplinary Problemes in Additive Technologies "Problemes of materials science in additive technologies"*. Tomsk, Russia, December 6–9, 2016, pp. 2.
8. Ancharov A.I., Vosmerikov S.V., Grigor'eva T.F., Kosachev M.Yu., Semenov Yu.I. [Research of a possibility of receiving high-temperature composites by methods of mechanochemical and electron beam processing]. *Trudy 20-go yubilejnogo mezhdunarodnogo mezh-disciplinarnogo simpoziuma "Poryadok, besporyadok i svoystva oksidov"* [Proc. 20th anniversary international cross-disciplinary symposium "Order, disorder and properties of oxides"], Rostov-on-Don: Fund of science and education, 2017, iss. 20, vol. 1, pp. 12–14. (In Russ.).
9. Ancharov A.I., Grigor'eva T.F., Kosachev M.Yu., Semenov Yu.I., Starostenko A.A., Tolochko B.P. [About a possibility of receiving products from the melted refractory carbides of hafnium and a tantalum by method of electron beam processing]. *Trudy 20-go mezhdunarodnogo simpoziuma "Uporyadochenie v mineralah i splavah"* [Proc. 20th international symposium "Streamlining in minerals and alloys"], 10–15 September 2017, Rostov-on-Don: Fund of science and education, 2017, iss. 20, vol. 1, pp. 27–30. (In Russ.).

Contacts: *Semenov Yuriy Ignatievitch*,  
Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

Article received by the editorial office 28.06.2018