

## О профиле низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, управляемом с помощью ферромагнитных вставок

© П.П. Кизириди, Г.Е. Озур

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: kiziridi\_pavel@mail.ru

(Поступило в Редакцию 6 июня 2014 г. В окончательной редакции 10 октября 2014 г.)

Представлены результаты исследований распределения плотности энергии по сечению низкоэнергетического (10–30 keV) сильноточного (до 25 kA) электронного пучка, транспортируемого в плазменном канале в ведущем магнитном поле. Фокусировка пучка и перераспределение плотности энергии внутри его сечения осуществлялись с помощью вставок в виде полых цилиндров, изготовленных из ферромагнитной стали (концентраторов магнитного поля) и расположенных за фольговым коллектором (немагнитная нержавеющая сталь толщиной 200  $\mu\text{m}$ ). Измерение распределения плотности энергии проводилось с помощью тепловизора; для этого в паузе (около 1 s) между импульсом пучка и моментом фиксации термограммы концентратор убирался в сторону с помощью электромагнита. Эксперименты подтвердили возможность улучшения однородности пучка в поперечном сечении при использовании концентраторов магнитного поля. Результаты измерений удовлетворительно согласуются с результатами расчетов, опубликованных ранее.

### Введение

Низкоэнергетические (10–30 keV) сильноточные (10–25 kA) электронные пучки (НСЭП) представляют большой интерес для поверхностной обработки материалов [1–3]. Высокая плотность энергии (до 20 J/cm<sup>2</sup>) и короткая длительность импульса (2–4  $\mu\text{s}$ ) позволяют выделить энергию пучка в тонком (несколько микрон) поверхностном слое, доводя его до плавления и частичного испарения. Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения (до 10<sup>9</sup> K/s) в поверхностном слое могут происходить такие структурно-фазовые превращения, которые не могут быть реализованы в стационарном режиме. Это позволяет решать самые разнообразные задачи: осуществлять финишную очистку и полировку поверхности [2], повышать электрическую прочность вакуумной изоляции [1,3], формировать поверхностные сплавы [3].

Управление распределением плотности энергии,  $W(r)$ , НСЭП, используемых для поверхностной обработки материалов, является традиционно актуальной задачей. Для формирования НСЭП, как правило, используются пушки со взрывоземиссионным катодом и плазменным анодом на основе сильноточного отражательного (пеннинговского) разряда низкого давления [4]. Исследования и опыт эксплуатации таких пушек показали, что исходно однородный в плоскости инжекции пучок на выходе из канала транспортировки, заполненного плазмой, приобретает максимум плотности энергии в центральной части. Такая трансформация профиля пучка в процессе его транспортировки связана с накоплением ионов в приосевой области пучка, а также действием его собственного магнитного поля [4,5]. Для компенсации этого негативного эффекта и улучшения однородности пучка возможны два подхода. Первый заключается в перераспределении плотности тока инжектируемого

пучка в пользу периферии за счет организации соответствующего профиля концентрации ионов в плазменном аноде [3–5], второй — это перераспределение плотности энергии по сечению пучка с помощью ферромагнитных вставок (концентраторов магнитного поля), располагаемых непосредственно за коллектором (мишенью) и стягивающих на себя силовые линии ведущего магнитного поля,  $B_z$ , а следовательно, и электроны пучка [6]. Меняя размеры концентраторов и магнитную проницаемость материала, можно осуществлять необходимое перераспределение плотности энергии (тока) в поперечном сечении, а также фокусировку пучка. Следует отметить, что с помощью внешних катушек соленоида можно осуществлять лишь фокусировку (или дефокусировку) пучка; перераспределение же плотности тока внутри него реализовать таким способом практически невозможно.

В [6] было подтверждено, что использование полых концентраторов позволяет не только сфокусировать сильноточный электронный пучок, но и перераспределить плотность энергии по его сечению. При этом в центральной части пучка плотность энергии увеличилась до 1.5–2 раз; улучшалась однородность. Важным результатом [6] явилось и то, что ток пучка на коллектор практически не уменьшался в присутствии концентраторов (пробочное отношение составляло около 2.2) по сравнению со случаем их отсутствия.

Однако в [6] однородность распределения плотности энергии и ее абсолютное значение лишь оценивались по автографам пучка на металлических мишенях. Результаты [6], конечно, позволили сделать первый шаг в разработке методики компьютерных расчетов распределений  $W(r)$  при обработке изделий из магнитных материалов [7] (что по сути является основной целью данных исследований), однако для проверки расчетов [7] и дальнейшего уточнения их методики необходимы

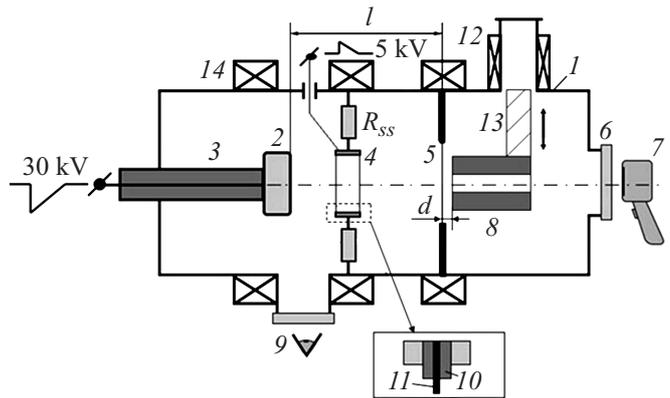
количественные измерения. Эти измерения и являются целью настоящей работы.

## Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты проводились на установке „РИТМ-У“, которая описана в [6]. В экспериментах использовались два метода создания плазменного анода. Первый — это традиционный метод, основанный на использовании сильноточного отражательного разряда с обычным кольцевым анодом [3–5]. Второй — сравнительно недавно разработанный [8] метод, основанный на гибридном разряде, сочетающем сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, инициируемыми пробоем по поверхности диэлектрика. При этом дуговые источники плазмы встроены непосредственно в кольцевой анод, а для улучшения параллельной работы резистивно развязаны между собой (рис. 1). Внутренний диаметр анода составлял во всех случаях 70 мм.

Для изучения распределений  $W(r)$  мы выбрали тепловизионную диагностику, т.е. измерение распределения температуры на тыльной стороне тонкой металлической мишени, нагреваемой падающим на нее пучком. В свою очередь распределение температуры однозначно и наглядно дает распределение плотности энергии по сечению пучка. Данный метод был с успехом применен для диагностики мощных импульсных ионных пучков и высокоэнергетических электронных пучков гигаваттной мощности [9,10]. Важным достоинством тепловизионной диагностики является ее панорамность, т.е. фиксация распределения плотности энергии по всему сечению пучка.

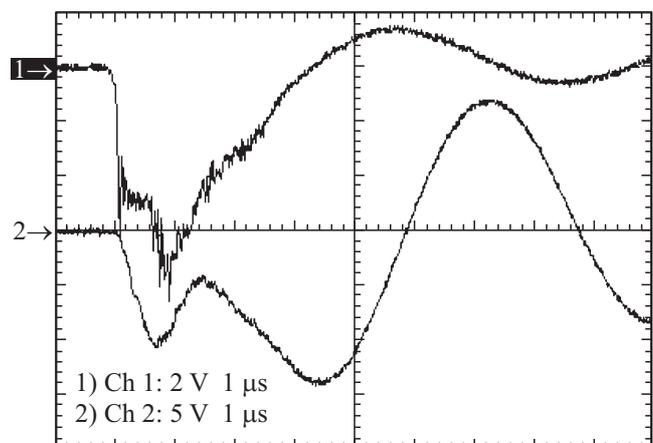
В работе [11] данная методика впервые была применена нами для диагностики НСЭП. Однако в [11] эксперименты проводились без использования концентратора, т.е. ничто не препятствовало прохождению инфракрасного излучения к тепловизору. При установке концентратора за мишенью возникает необходимость удаления его с оптического пути в течение паузы (около 1 с) между импульсом пучка и моментом фиксации термограммы с последующим возвратом на исходное место. В настоящей работе это осуществлялось с помощью электромагнита, состоявшего из катушки, к которой подключалось сетевое напряжение (220 В, 50 Hz) с помощью твердотельного реле SSR 40 DA, и цилиндрического сердечника, к которому жестко крепился концентратор через промежуточную пластину с продольным пазом, что позволяло менять продольное положение концентратора при изменении расстояния между катодом и мишенью. При подаче напряжения на катушку сердечник вместе с концентратором уходил вверх на 70 мм менее чем за 0.5 с и удерживался там в течение  $\sim 2$  с до окончания действия напряжения, а затем возвращался на место под действием собственного веса. Время действия сетевого напряжения ( $\sim 2.5$  с) задавалось специальной электронной схемой, запускавшейся импульсом напряжения на аноде пеннинговского



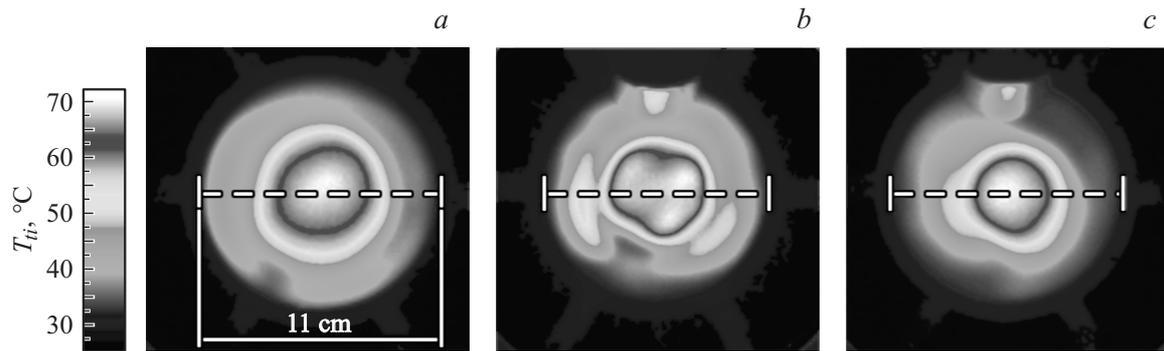
**Рис. 1.** 1 — корпус, 2 — взрывоэмиссионный катод пушки, 3 — изолятор, 4 — анодный узел, 5 — фольговый коллектор, 6 — инфракрасное окно из  $\text{CaF}_2$ , 7 — тепловизор, 8 — концентратор, 9 — окно для визуального наблюдения и фотографирования, 10 — керамическая трубка, 11 — катод искрового источника, 12 — катушка электромагнита, 13 — сердечник электромагнита, 14 — секционированный соленоид.  $R_{ss} = 110 \Omega$  — сопротивление в цепи искрового источника.

разряда, что в секундном масштабе времени означало совпадение момента включения электромагнита с началом генерации пучка.

Тепловизионные измерения проводились аналогично методике [11]. Коллектором пучка служила фольга из нержавеющей стали толщиной около  $200 \mu\text{m}$ . Тыльная сторона фольги была покрыта черной матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения около 0.95. Тепловое излучение фольги выводилось через инфракрасное окно из фторида кальция и попадало в объектив тепловизора TESTO 875-1. Пауза между импульсом пучка и фиксацией термограммы составляла около 1 с. Таким образом, пространственное разрешение метода, определявшееся в нашем случае расплыванием теплового поля в течение паузы, составляло около 2.5 мм.



**Рис. 2.** Типичные оциллограммы ускоряющего напряжения (Ch1, 8 kV/div), полного тока катода (Ch2, 15 kA/div). Концентратор диаметром 48 мм и  $l = 60$  мм. Кольцевой анод.  $B_z = 0.106$  Т.



**Рис. 3.** Типичные термограммы для режимов: *a* — без концентратора, *b* и *c* — концентратор длиной 120 мм, внешним диаметром 48 мм и внутренним диаметром 18 мм; *a* —  $B_z = 0.106$  Т, *b* —  $B_z = 0.106$  Т, *c* —  $B_z = 0.06$  Т. Расстояние между катодом и мишенью —  $l = 20$  см. Кольцевой анод.

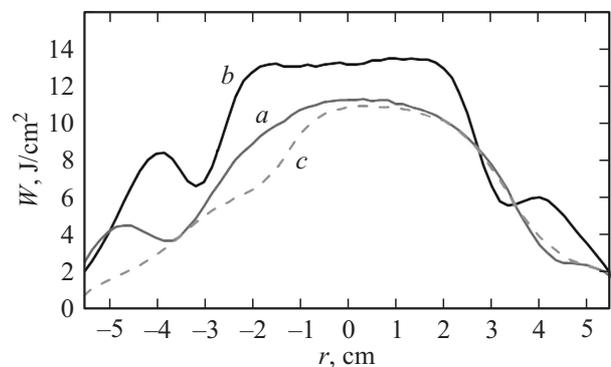
Калибровочная зависимость в диапазоне 30–95°С с хорошей точностью описывается линейной функцией  $T_f = 2.53T_{fi} - 44.9$  (°С), где  $T_f$  — температура фольги,  $T_{fi}$  — температура, измеренная тепловизором. Полученные термограммы обрабатывались по программе IIRSoft 3.1, прилагаемой к тепловизору. При изучении термограмм и построении на их основе распределений плотности энергии исследовались различные сечения: горизонтальные, вертикальные и наклонные. При обработке результатов из термограмм пучка вычитались термограммы фона, которые фиксировались перед каждым „выстрелом“. Интервал между выстрелами составлял 4–5 min, что обеспечивало остывание мишени до комнатной температуры. Суммарная погрешность измерений не превышала  $\pm 8\%$ . Поправка, связанная с учетом испарения мишени, составляла 2.3% при плотности энергии  $10 \text{ J/cm}^2$ , а при  $15 \text{ J/cm}^2$  — 11% [11], т. е. была в наших условиях невелика.

В ходе экспериментов варьировалось расстояние между катодом и коллектором,  $l$ , а также индукция внешнего ведущего магнитного поля. Расстояние  $l = 20$  см соответствовало расположению мишени в плоскости середины последней по ходу пучка катушки соленоида, т. е. на краю области однородного магнитного поля. В экспериментах использовалось несколько типов концентраторов, имевших форму полого цилиндра и изготовленных из магнитной углеродистой стали. В большинстве экспериментов зазор между торцом концентратора и мишенью составлял  $d = 5$  мм.

Наряду с фиксацией термограмм в каждом импульсе регистрировались осциллограммы ускоряющего напряжения и тока катода (рис. 2).

## Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены типичные термограммы пучка для режимов без использования и с использованием концентратора и соответствующие им распределения плотности энергии НСЭП (рис. 4) в горизонтальном сечении (штриховая линия на рис. 3).



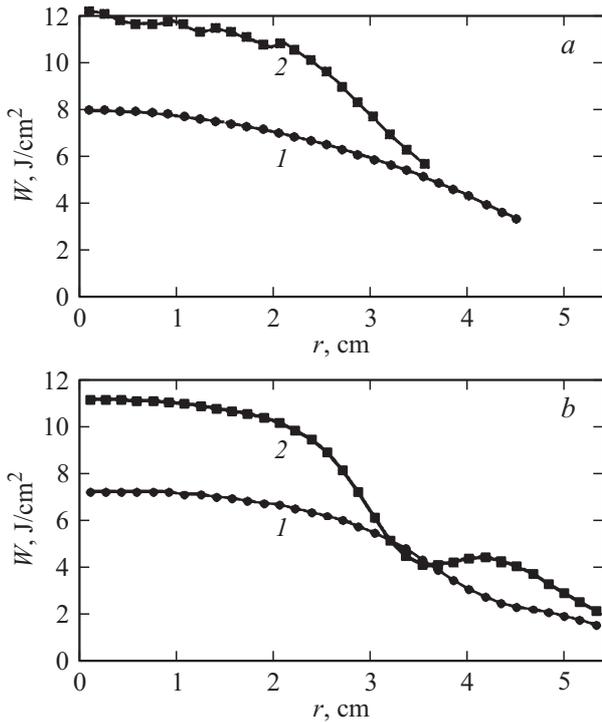
**Рис. 4.** Распределения плотности энергии по сечению пучка для режимов, соответствующих рис. 3.

Изучение большого количества термограмм показало следующее. При наличии концентратора и  $B_z = 0.106$  Т в центральной части пучка наблюдается область диаметром около 4–5 см с хорошей однородностью (рис. 4, *b*). При уменьшении индукции магнитного поля до 0.06 Т распределение имеет колоколообразный характер (рис. 4, *c*), что можно объяснить усилением действия собственного магнитного поля пучка. Следует отметить, что в режимах, где использовался обычный кольцевой анод, несмотря на увеличение плотности энергии в центральной части, интегральная по сечению, т. е. полная энергия пучка остается практически той же самой, т. е. происходит лишь перераспределение плотности энергии.

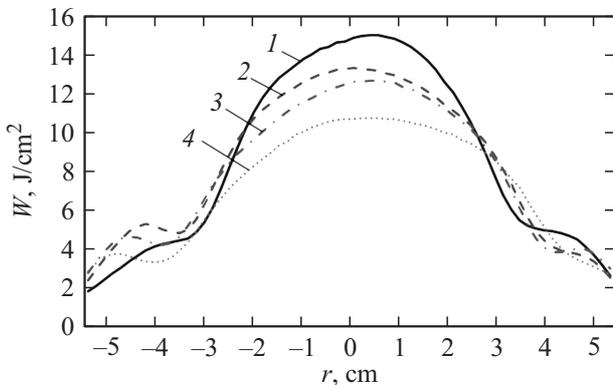
Сравнение полученных данных с результатами расчетов [7] показало, что наилучшее совпадение соответствует магнитной проницаемости (которая в расчетах была варьируемым параметром задачи)  $\mu \approx 10$  (рис. 5). Сравнительно небольшое значение  $\mu$  вполне логично, поскольку при внешней напряженности поля около  $10^5$  А/м материал вставки близок к насыщению.

При увеличении зазора между торцом концентратора и мишенью,  $d$ , с 5 до 35 мм эффект действия концентратора ослабляется, однако по-прежнему „работает“ (рис. 6).

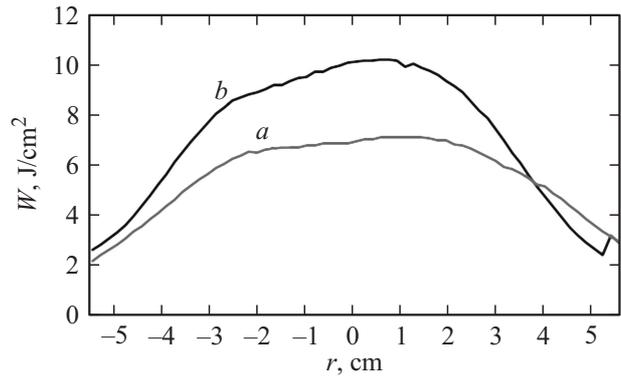
При увеличении  $l$  до 27 см (рис. 7) плотность энергии снижается, но превышение полной энергии пучка в случае наличия концентратора по сравнению со случаем его отсутствия наблюдается по-прежнему весьма часто. Близкие по смыслу результаты были получены и для случая гибридного анода; однородность пучка несколько улучшилась, что, впрочем, было ожидаемо. Наилучшая однородность пучка наблюдалась для концентратора с внутренним диаметром 35 мм, что составляет полови-



**Рис. 5.** Расчетные (а) [7] и экспериментальные (б) распределения плотности энергии пучка без концентратора (1) и с концентратором (2). Кольцевой анод. Расчет выполнен для  $\mu = 10$ .  $l = 22.5$  см. Радиальная координата отсчитывается от оси пучка.



**Рис. 6.** Распределения плотности энергии по сечению пучка для  $l = 20$  см. 1–3 — с концентратором длиной 60 мм, внешним диаметром 48 мм и внутренним диаметром 18 мм; 4 — без концентратора. 1 —  $d = 5$  мм, 2 —  $d = 15$  мм, 3 —  $d = 35$  мм. Кольцевой анод.



**Рис. 7.** Распределения плотности энергии по сечению пучка для  $l = 27$  см: а — без концентратора, б — концентратор длиной 120 мм, внешним диаметром 48 мм и внутренним диаметром 18 мм.  $B_z = 0.106$  Т. Кольцевой анод.

ну внутреннего диаметра анода. На рис. 8 приведены термограмма данного режима и соответствующие ей распределения плотности энергии. Кроме того, в данном режиме часто наблюдается некоторое (около 10–20%) увеличение полной энергии пучка, приходящей на мишень.

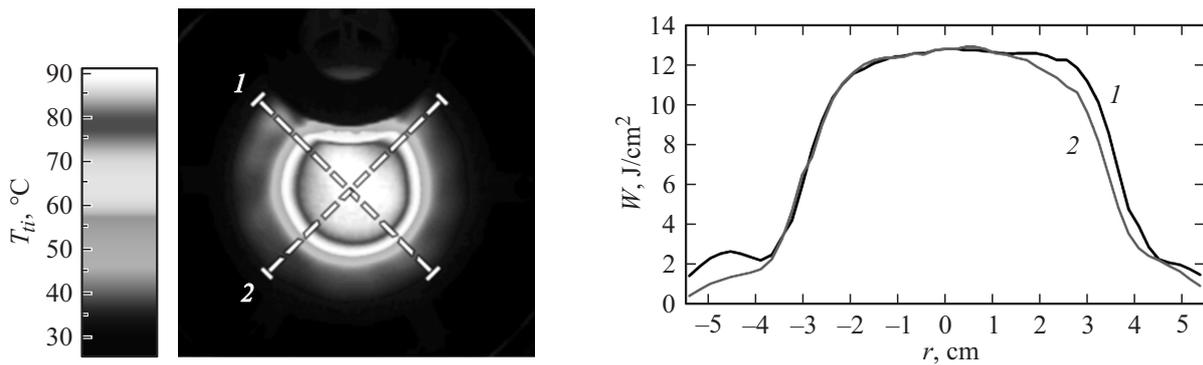
При изучении термограмм не было обнаружено каких-либо неоднородностей миллиметрового масштаба в распределении температуры по мишени, которые могли возникнуть вследствие дискретности эмиссионной поверхности катода. Для наших условий среднее расстояние между эмиссионными центрами составляет около 4–5 мм [12]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе транспортировки электронные струи, эмитируемые отдельными эмиссионными центрами, размываются в процессе транспортировки в плазменном канале.

## Заключение

1. Продемонстрирована возможность тепловизионной диагностики распределения плотности энергии сильноточного электронного пучка, транспортируемого в условиях фокусировки с помощью ферромагнитных вставок (концентраторов), располагаемых непосредственно за мишенью (коллектором). Для этого концентратор удалялся с оптического пути в течение паузы (около 1 с) между импульсом пучка и моментом фиксации термограммы с помощью электромагнита с последующим возвратом на исходное место под действием собственного веса.

2. Наилучшее совпадение экспериментально измеренных распределений плотности энергии с расчетными наблюдается для значения магнитной проницаемости  $\mu \approx 10$ . Это может являться основой для расчетов плотности энергии пучка при обработке изделий из магнитных материалов.

3. Полная энергия пучка, транспортируемого в присутствии концентратора, не меньше чем в случае отсут-



**Рис. 8.** Термограмма (слева) и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка (справа) для режима с концентратором длиной 80 мм, внешним диаметром 70 мм и внутренним диаметром 35 мм.  $B_z = 0.106$  Т,  $l = 22.5$  см. Гибридный анод.

ствия вставки, что свидетельствует об отсутствии существенных потерь электронов за счет отражения от „магнитной пробки“. В большинстве случаев использование концентратора магнитного поля совместно с гибридным анодом увеличивает полную энергию пучка на 10–20% по сравнению с режимами без концентратора.

4. Наилучшая однородность пучка достигнута в случае плазменного анода на основе гибридного разряда и при концентраторе внутренним диаметром 35 мм (примерно половина диаметра пучка), внешним — 70 мм, длиной 80 мм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН, шифр темы „П.14.2.1“, тема „Взрывоэмиссионные процессы в вакуумном разряде и разработка фундаментальных основ их применения в технологиях“, а также поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 12-08-00213-а, 13-08-98066-р\_сибирь\_а).

## Список литературы

- [1] Proskurovsky D.I., Ivanov Yu.F., Rotshtein V.P. et al. // J. Vac. Sci. & Technol. A. 1998. Vol. 16. N 4. P. 2480–2488.
- [2] Uno Y., Okada A., Uemura K. et al. // Precis. Eng. 2005. Vol. 29. P. 449–455.
- [3] Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. P. 157–174.
- [4] Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Карлик К.В. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 58–65.
- [5] Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // ПТЭ. 1996. № 4. С. 83–88.
- [6] Озур Г.Е., Батраков А.В., Карлик К.В., Зюлькова Л.А. // Изв. вузов. Сер. физ. 2013. Т. 56. № 7/2. С. 37–41.
- [7] Коваль Т.В., Ле Ху Зунг // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 2. С. 127–131.
- [8] Ozur G.E., Razin A.V. // Proc. of the 16<sup>th</sup> Symposium on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2010. P. 144–147.
- [9] Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C. et al. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. N 7. P. 3223–3231.
- [10] Pushkarev A.I., Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. N 10. P 103 301.

- [11] Кизириди П.П., Марков А.Б., Озур Г.Е., Фролова В.П. // Изв. вузов. Сер. физ. 2014. Т. 57. № 3/2. С. 120–123.
- [12] Карлик К.В., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // Изв. вузов. Сер. физ. 2007. № 9. Приложение. С. 214–217.