

## Исследование распространения сильноточного электронного пучка секционированного плазмонаполненного диода

© А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: andzh@oit.hcei.tsc.ru

(Поступила в Редакцию 28 сентября 2015 г.)

Приведены результаты исследований распространения электронного пучка плазмонаполненного диода при отсутствии металлического анода между областями генерации и транспортировки пучка. Параметры диода 160 кА, 400 кВ, 50 ГВ. На расстоянии более 10 см за областью генерации реализованы ток пучка на мишень 100 кА, плотность энергии  $20 \text{ J/cm}^2$  при площади поперечного сечения пучка около  $200 \text{ cm}^2$ . Показана возможность варьирования тока пучка и плотности энергии за счет изменения расстояния до мишени.

### Введение

Перспективным методом генерации сильноточного релятивистского электронного пучка является использование диода со взрывоэмиссионным катодом и предварительным плазменным заполнением [1–3]. В плазмонаполненном диоде генерация электронного пучка происходит в двойном слое, где роль анодного электрода выполняет плазменная граница и ускоряющее напряжение сосредоточено в узком зазоре между плазменной поверхностью и катодом. Уменьшение зазора, во первых, приводит к резкому возрастанию напряженности электрического поля на катоде, которое достигает порядка  $10^6 \text{ V/cm}$ . Высокие значения напряженности поля и интенсивная ионная бомбардировка катода способствуют появлению катодных пятен и образованию плотного однородного плазменного эмиссионного слоя на катоде. При этом можно использовать катоды из нержавеющей стали, не прибегая к специальным мерам по созданию взрывоэмиссионной поверхности. Во-вторых, малый ускоряющий зазор позволяет на один-два порядка увеличить мощность пучка при заданном напряжении в сравнении с вакуумными диодами.

Для использования плазмонаполненного диода в источниках электронного пучка большой площади необходимо решать вопрос сжатия пучка собственным магнитным полем в отсутствие расталкивающих сил пространственного заряда. В [4–5] для получения электронного пучка площадью более  $50 \text{ cm}^2$  использовалось разделение плазмонаполненного диода на отдельные секции. В диоде с шестью секциями реализовано напряжение 400 кВ при токе 100 кА. Средняя плотность тока на аноде  $\sim 10^3 \text{ A/cm}^2$ , плотность энергии  $\sim 10 \text{ J/cm}^2$ . Параметры пучка в частотности удовлетворяют условиям таких применений, как очистка и модификация поверхности материалов [6]. Помимо этого, рассматривается возможность использования такого диода для генерации мощного СВЧ-излучения [7]. Для практических применений необходимо обеспечить транспортировку пучка,

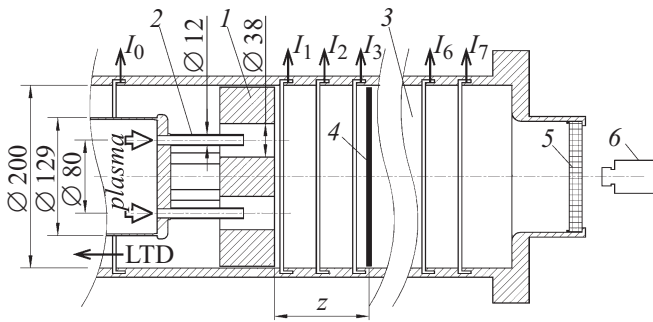
контролировать плотность тока пучка и ее распределение по поперечному сечению.

В настоящей работе представлены результаты исследования формирования и распространения электронного пучка секционированного плазмонаполненного диода с током более 100 кА и ускоряющим напряжением 400 кВ. Основное отличие конструкции диода от использованной ранее — это отсутствие фольги, отделяющей области генерации электронного пучка и его транспортировки на мишень. Поток ионов из зоны диода беспрепятственно проникает в область транспортировки, снимая ограничение тока транспортируемого электронного пучка собственным пространственным зарядом. При этом мишень можно размещать на удаленном от катода расстоянии в несколько десятков сантиметров. Это позволяет исключить локальные повышения плотности тока и энергии на мишени, связанные с прикатодными эффектами, секционированием или дуговой стадией разряда в диоде. Приводятся результаты измерений тока электронного пучка в области транспортировки и данные тепловизионных измерений распределения плотности энергии транспортируемого пучка.

### Схема эксперимента

В качестве питающего генератора плазмонаполненного диода использовался линейный импульсный трансформатор с шестью последовательно включенными трансформаторными ступенями [8]. Эквивалентная емкость трансформатора 53 нФ, запасаемая энергия 6.1 кДж при зарядном напряжении ступеней 80 кВ. Индуктивность генератора 260 нГн. Волновое сопротивление генератора около  $2 \Omega$ .

Геометрия электронного диода показана на рис. 1. Анод 1 разбит на шесть цилиндрических полостей диаметром 38 мм. В каждую полость погружен цилиндрический катод 2 диаметром 12 мм из нержавеющей стали.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — секционированный анод, 2 — катод, 3 — камера транспортировки пучка, 4 — мишень, 5 — окно для вывода инфракрасного излучения, 6 — тепловизор.

Катоды установлены на диаметре 80 мм. За секционированным анодом расположена камера для транспортировки пучка 3 диаметром 200 мм и длиной 290 мм. На расстоянии  $z$  за анодом 1 размещается мишень 4 толщиной 1 мм из нержавеющей стали. Расстояние до мишени определяет условия распространения электронного пучка из зоны диода, ток пучка на мишень, а также переданную в мишень энергию и ее распределение.

Для создания плазмы в диоде используются шесть плазменных пушек капиллярного типа. Материал диэлектрика пушек — полиэтилен. Диаметр капилляра 1.3 мм, длина 15 мм. Пушки размещаются внутри катодов 2 и инжектируют плазму вдоль оси диода в направлении камеры 3. Металлический анод (фольга либо сетка) перед областью транспортировки отсутствует. Для питания пушек используется отдельный генератор емкостью 40 пФ с зарядным напряжением 80 кВ. Амплитуда тока через единичную пушку 1.5 кА, длительность первой полуволны 800 нс. Инжекция плазмы осуществляется в течение времени  $t_d$  до подачи импульса на диод от линейного трансформатора.

В экспериментах регистрировались полный ток диода  $I_0$  индуктивным датчиком и напряжение на выходе линейного трансформатора резистивным делителем напряжения. Напряжение на диоде пересчитывалось с учетом индуктивного падения на участке между датчиком напряжения и катодом. Помимо этого, регистрировался ток пучка  $I_1$ – $I_8$  в камере транспортировки 3 на различных расстояниях  $z$  за анодом 1. Измерения тока пучка производились с помощью индуктивных датчиков, размещенных с шагом 40 мм вдоль оси камеры.

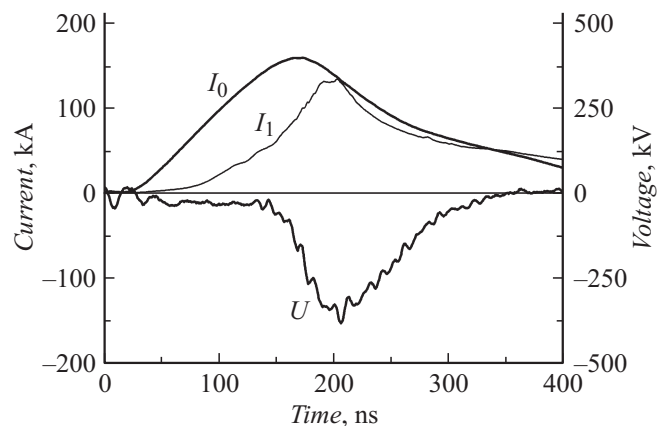
Для изучения радиального распределения энергии на мишени использовалась тепловизионная диагностика. Измерялось распределение температуры на тыльной стороне металлической мишени, нагреваемой падающим на нее пучком. В свою очередь, распределение температуры дает распределение плотности энергии по сечению пучка. Данный метод ранее успешно применялся для диагностики мощных импульсных ионных пучков [9], высокоэнергетических [10] и низкоэнергетических силь-

ноточных электронных пучков [11,12]. Тепловизионные измерения проводились аналогично методике [11]. Для целей измерений тыльная сторона мишени 4 была покрыта черной матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения около 0.95. Тепловое излучение мишени выводилось через инфракрасное окно из флюорита кальция 5 и попадало в объектив тепловизора TESTO 875-1 6. Пауза между импульсом пучка и фиксацией термограммы составляла около 1 с. Это время необходимо для распространения и выравнивания тепла по всей глубине мишени. Пространственное разрешение метода, определявшееся в нашем случае расплыванием теплового поля в течение времени 1 с, составляло около 2 мм. Калибровочная зависимость в диапазоне 30–95°C описывалась линейной функцией  $T_f = 2.53T_i - 44.9(°C)$ , где  $T_f$  — температура мишени,  $T_i$  — температура, измеренная тепловизором [11]. При обработке результатов из термограммы пучка вычиталась термограмма фона, которая фиксировалась перед каждым „выстрелом“. Интервал между выстрелами превышал 10 мин, что обеспечивало остывание мишени до окружающей температуры.

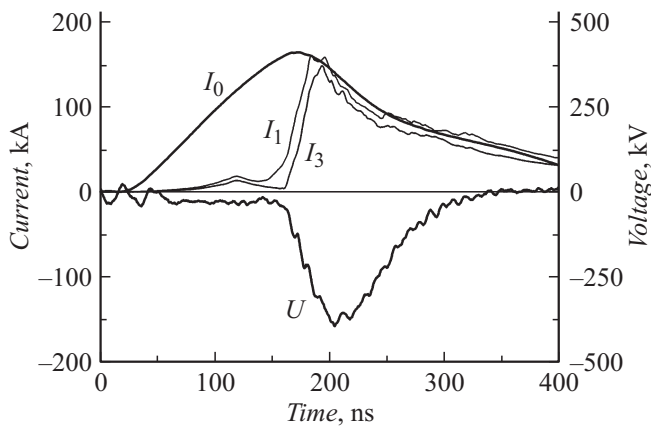
## Результаты экспериментов

На рис. 2–4 показаны экспериментальные осциллограммы напряжения диода и тока электронного пучка для случаев размещения мишени на расстояниях  $z = 3, 11$  и 27 см за анодом 1. Мишень находилась за токовым датчиком  $I_1, I_3$  либо  $I_7$ . Время задержки  $t_d$  пуска линейного трансформатора относительно начала инжекции плазмы во всех трех случаях 1  $\mu$ s.

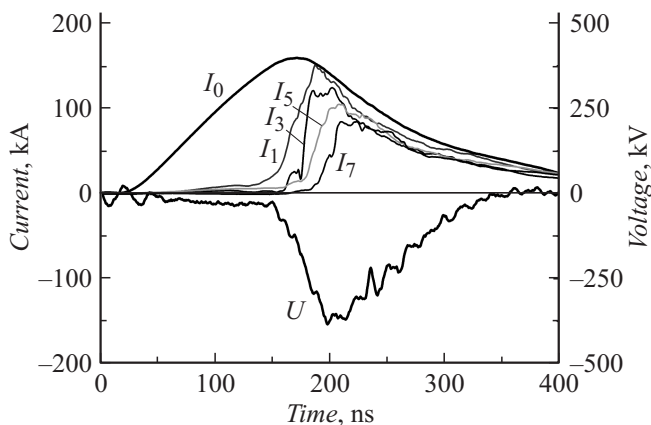
Инжектируемый ионный поток обеспечивает разряд между катодом 2 и анодом 1 с сопротивлением существенно ниже волнового сопротивления генератора. Амплитуда тока диода в низкоомной фазе достигает 160 кА. Ток в одной секции более 25 кА. При последующем обрыве тока сопротивление диода возрастает



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения и тока плазмонного диода, тока электронного пучка при установке мишени на расстоянии  $z = 3$  см.



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения и тока плазмонаполненного диода, тока электронного пучка при установке мишени на расстоянии  $z = 11$  см.

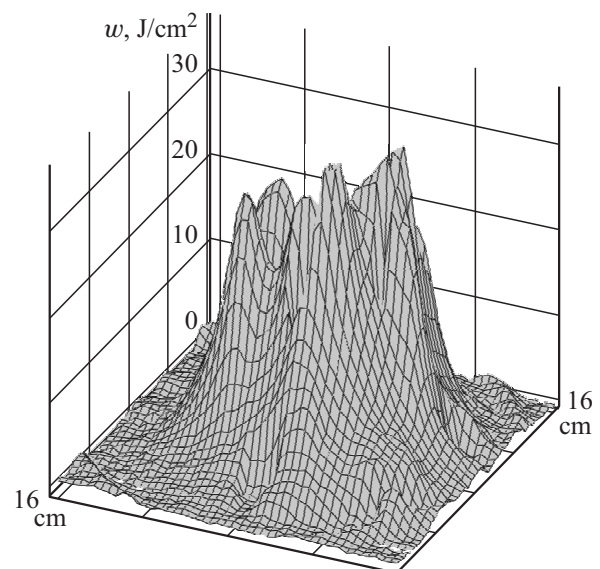


**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения и тока плазмонаполненного диода, тока электронного пучка при установке мишени на расстоянии  $z = 27$  см.

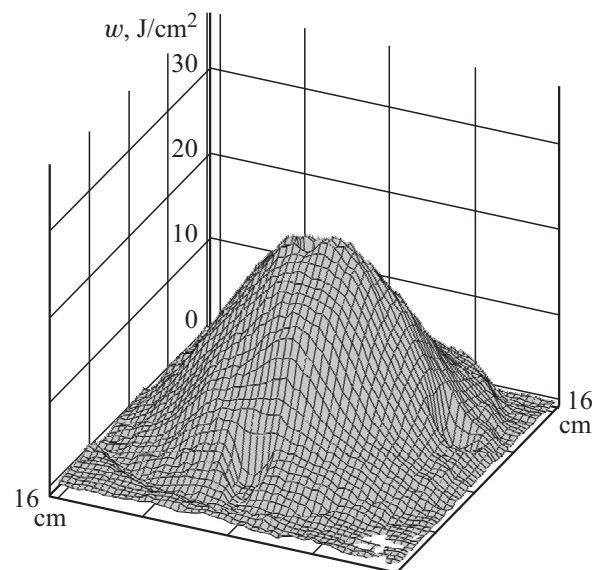
до  $3 \Omega$ , формируется импульс напряжения амплитудой более  $400$  кВ, происходит генерация электронного пучка и его распространение в области транспортировки. Из запасаемых в генераторе  $6.1$  кДж в диоде рассеивается  $3.8$  кДж с пиковой мощностью  $50$  ГВт. Положение мишени не оказывает влияния на характеристики диода как в низкоомной, так и высокоомной стадиях.

Положение мишени влияет на распределение и амплитуду тока в камере транспортировки. При установке мишени на расстояние  $z = 3$  см часть тока протекает в камере транспортировки  $3$  и замыкается на мишень  $4$  уже в низкоомной фазе разряда плазмонаполненного диода. К моменту достижения напряжением амплитудного значения в высокоомной фазе весь ток диода замыкается на мишень. С увеличением расстояния до мишени в низкоомной фазе почти весь ток замыкается на боковые стенки секций анода  $1$ , в камере  $3$  ток незначительный. Сигналы тока пучка в камере транспортировки начинают

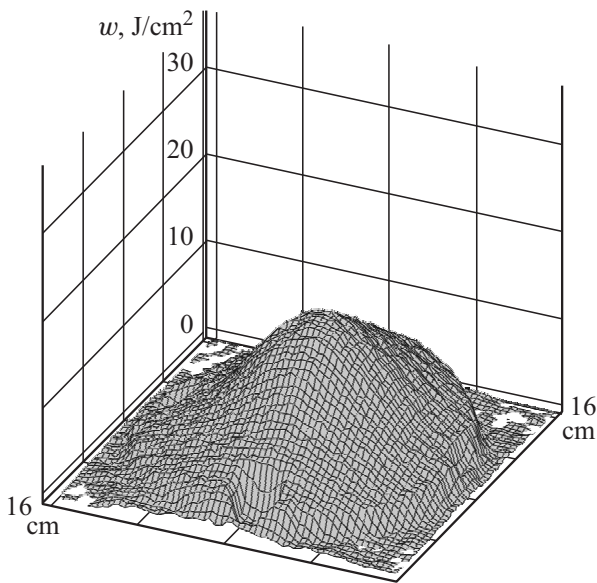
резко нарастать лишь с началом высокоомной фазы. Причем сигналы с датчиков вдоль оси камеры транспортировки появляются с задержками по времени. Так, при  $z = 11$  см ток на мишени появляется с задержкой  $8$  нс относительно начала высокоомной фазы. Электронный пучок распространяется практически без потерь, ток пучка на мишени достигает  $150$  кА. При  $z = 27$  см пучок появляется в области мишени с задержкой  $35$  нс. Часть тока пучка теряется при транспортировке. Амплитуда тока пучка снизилась до  $85$  кА при полном токе в диоде в этот момент времени  $125$  кА. Необходимо отметить, что в используемой схеме после обратного замыкания диода в дуговой стадии разряда весь ток замыкается на анод  $1$ , не попадая на мишень.



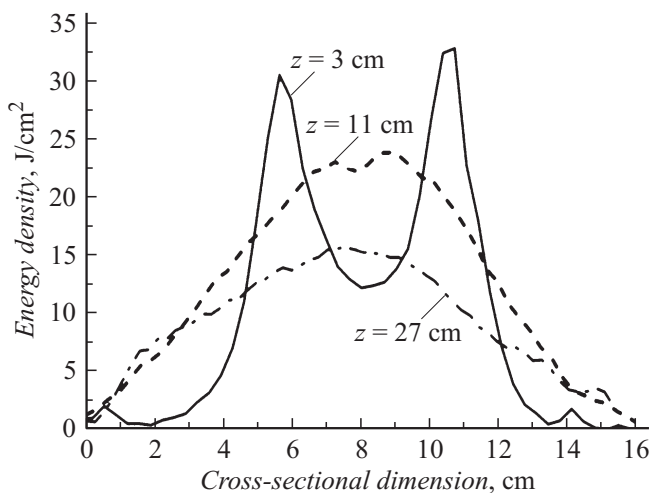
**Рис. 5.** Распределение плотности энергии на мишени, расположенной на расстоянии  $z = 3$  см.



**Рис. 6.** Распределение плотности энергии на мишени, расположенной на расстоянии  $z = 11$  см.



**Рис. 7.** Распределение плотности энергии на мишени, расположенной на расстоянии  $z = 27$  см.



**Рис. 8.** Распределение плотности энергии в сечении, проходящем через центр электронного пучка. Мишень расположена на расстояниях  $z = 3, 11$  и  $27$  см.

Результаты экспериментов показывают, что менее чем за  $40$  ns после начала высокоомной фазы ионы из зоны диода полностью заполняют камеру транспортировки и обеспечивают эффективное прохождение электронного пучка на мишень. Подобная картина реализуется и в численном эксперименте, выполненном в PIC-коде KARAT [7]. Достигнуто качественное и количественное совпадение токов в камере транспортировки численного моделирования с экспериментом.

Оценка энергии пучка, падающего на мишень, из осциллограмм напряжения и тока:  $3.2$  kJ при  $z = 3$  см,  $2.9$  kJ при  $z = 11$  см и  $1.8$  kJ при  $z = 27$  см.

Распределение плотности энергии, выделенной на мишени за импульс, для трех положений мишени  $z = 3, 11$  и  $27$  см показаны на рис. 5–7. Распределения построены из данных тепловизионных измерений.

На рис. 8 приведены распределения плотности энергии в сечении, проходящем через центр электронного пучка. На расстоянии  $z = 3$  см распределение плотности энергии резко неоднородное. Присутствуют шесть ярко выраженных пиков, соответствующих секциям диода. Пики плотности энергии находятся на диаметре примерно  $6$  см, что несколько меньше диаметра установки катодов. Диаметр пучка около  $12$  см соответствует наружной границе секций в аноде 1. При удалении от анода неравномерность распределения плотности энергии размывается в процессе транспортировки пучка. Распределение становится существенно однородней. Так, на расстоянии  $z = 11$  см распределение уже имеет один максимум по центру. Плотность энергии в центре превышает  $20$  J/cm<sup>2</sup>. Диаметр пучка увеличился до  $16$  см. При дальнейшем удалении расстояния до  $z = 27$  см вид распределения плотности энергии и диаметр пучка существенным образом не меняются. Наблюдается уменьшение значения плотности энергии до  $15$  J/cm<sup>2</sup>, обусловленное потерей части тока пучка в камере транспортировки 3.

Интегрирование распределения плотности энергии на рис. 5–7 по площади позволяет получить значение полной энергии, выделенной в мишени, из данных тепловизионных измерений. Сопоставление этих данных со значениями энергии из осциллографических измерений показывает, что тепловизионные измерения дают заниженные значения на  $25$ – $35\%$ . Основная причина расхождения значений связана с уносом энергии в результате абляции мишени под действием электронного пучка. Доля уносимой энергии сильно зависит от плотности энергии в пучке. Так, тепловые расчеты в [11] показывают, что при плотности энергии  $10$  J/cm<sup>2</sup> доля энергии, уносимой из мишени парами, составляет около  $2\%$  от падающей, а при  $15$  J/cm<sup>2</sup> уже  $11\%$ . Таким образом, в условиях наших экспериментов тепловизионные измерения дают скорее качественную, нежели количественную оценку плотности энергии. Возможным способом повышения достоверности измерений является использование перед мишенью маски из металлической сетки, снижающей плотность энергии до значения ниже порога абляции материала [9]. В этом случае плотность энергии в пучке пересчитывается с учетом коэффициента прозрачности сетки.

## Заключение

Результаты экспериментов показали возможность эффективной транспортировки электронного пучка плазмонаполненного диода без разделительной фольги или сетки между областями генерации и транспортировки. Положение мишени в тракте транспортировки не оказывает влияния на характеристики генерируемого в

диоде импульса, но определяет распределение и амплитуду тока транспортируемого пучка, плотность энергии на мишени. При времени предварительной инжекции плазмы  $1 \mu\text{s}$  на расстояние более 10 см электронный пучок из области диода распространяется практически без потерь. В процессе транспортировки пучка, неравномерности распределения плотности тока и энергии пучка, связанные с секционированием, размываются.

Полученные в рамках работы результаты могут быть применены для транспортировки плотных высокоэнергетических пучков заряженных частиц на мишень в прикладных целях, а также использованы при проектировании безфольговых СВЧ-генераторов на основе плазмонаполненного диода.

Авторы признательны Г.Е. Озуру за помощь в проведении тепловизионных измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-01123-а.

## Список литературы

- [1] *Weber B.V., Boller J.R., Cooperstein G., Kellogg J.C., Stephanakis S.J., Swanekamp S.B.* // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conference. Albuquerque. New Mexico, 1993. P. 802–804.
- [2] *Kormilitsin A.I., Diyankov V.S.* // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conference. Baltimore. 1997. P. 796–800.
- [3] *Weber B.V., Hinshelwood D.D., Murphy D.P., Stephanakis S.J., Harper-Slaboszewicz V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32(5). P. 1998–2003.
- [4] *Zherlitsyn A.A., Kovalchuk B.M., Pedin N.N.* // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2010. P. 269–272.
- [5] *Kovalchuk B.M., Zherlitsyn A.A., Pedin N.N.* // Laser and Particle Beams. 2010. Vol. 28(4). P. 547–552.
- [6] *Engelko V.I., Mueller G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41(10). P. 2769–2773.
- [7] *Eltchaninov A.A., Kovalchuk B.M., Kurkan I.K., Zherlitsyn A.A.* // J. Physics: Conf. Series. 2014. Vol. 552. P. 012 031.
- [8] *Zherlitsyn A.A., Kovalchuk B.M., Smorudov G.V., Tsoy N.V., Visir V.A., Zorin V.B.* // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics. Tomsk, 2008. P. 296–298.
- [9] *Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C., Rej D.J., Wagenaar W.J.* // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82(7). P. 3223–3231.
- [10] *Pushkarev A.I., Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83(10). P. 103 301.
- [11] *Кизириди П.П., Марков А.Б., Озур Г.Е., Фролова В.П.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. Вып. 3/2. С. 120–123.
- [12] *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 6. С. 132–136.