

## ВЗРЫВОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ С РЕЗИСТИВНОЙ РАЗВЯЗКОЙ ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПЛАЗМОНАПОЛНЕННЫХ ДИОДОВ

© 2019 г. П. П. Кизириди<sup>а</sup>, Г. Е. Озур<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

\* e-mail: ozur@lve.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 28.11.2018 г.

После доработки 28.11.2018 г.

Принята к публикации 16.12.2018 г.

Представлены устройство и характеристики многоэмиттерных взрывоэмиссионных катодов с резистивной развязкой, предназначенных для сильноточных плазмонаполненных диодов. Исследованы интегральное свечение плазмы эмиссионных центров, распределения плотности энергии по сечению нерелятивистского сильноточного электронного пучка, формируемого в данном плазмонаполненном диоде, а также ресурс катода. Наилучшие результаты получены для катода на базе резисторов ТВО-1, проволочные выводы которых являются эмиттерами.

DOI: 10.1134/S0032816219030200

### ВВЕДЕНИЕ

Резистивная развязка эмиттеров — известный метод стабилизации работы взрывоэмиссионных катодов [1, 2]. Включение резистора в цепь каждого эмиттера обеспечивает демпфирование эмиссионных центров-лидеров, обычно появляющихся при функционировании многоэмиттерных взрывоэмиссионных катодов. Присутствие таких лидеров приводит к уменьшению количества одновременно работающих эмиссионных центров, а следовательно, к ухудшению однородности и стабильности работы катода, к уменьшению длительности импульса.

В отличие от вакуумных диодов [1, 2], использование резистивной развязки эмиттеров в случае плазмонаполненного диода требует тщательной изоляции катодной подложки, поскольку эмиссия может быть легко возбуждена и на ее поверхности, контактирующей с предварительно создаваемой анодной плазмой. Тогда эмиссионные центры, возникшие на катодной подложке, зашунтируют эмиттеры, в цепи которых установлены резисторы, что неприемлемо.

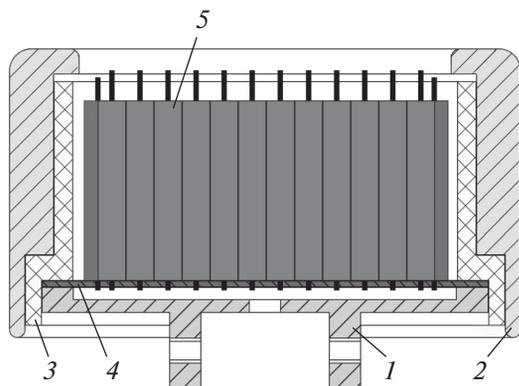
В сильноточном плазмонаполненном диоде катод с резистивной развязкой, представлявший собой пакет резисторов ТВО-0.125, склеенных эпоксидным компаундом, был впервые использован в [3]. Диаметр эмиттирующей части составлял 1.5 см. Торцы резисторов были отшлифованы до обнажения углеграфитовых сердечников, которые и служили эмиттерами. Однако углеродные продукты эрозии, которые могут попасть на обра-

батываемую пучком мишень, обычно нежелательны. Поэтому мы разработали аналогичные катоды [4], но уже с чисто металлическими эмиттерами. Было установлено, что катоды с резистивной развязкой эмиттеров позволяют увеличить скорость нарастания тока на 20–30% по сравнению с наиболее часто употребляемыми медно-оплеточными катодами. В данной статье представлены конструкции и результаты исследования характеристик таких катодов.

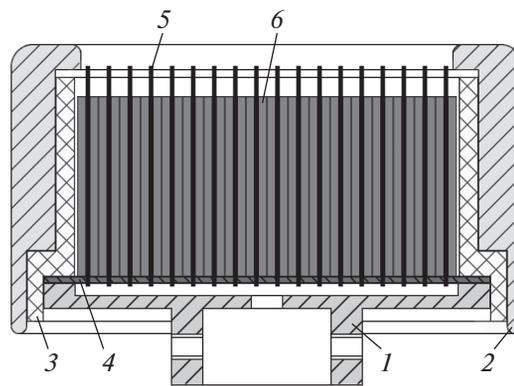
### КОНСТРУКЦИИ КАТОДОВ

Первый катод был изготовлен из резисторов ТВО-1 номиналом от 2.7 до 5.6 Ом, проволочные выводы (длиной около 6 мм) которых являлись эмиттерами (рис. 1). Их противоположные выводы распаяны на латунном диске. Общее число резисторов-эмиттеров — 156; эффективный диаметр эмиттирующей части катода составил около 58 мм. Пакет резисторов заключен во фторопластовую обойму, на которую напрессован экранный электрод из нержавеющей стали, имеющий исходно плавающий потенциал. Для того, чтобы столб анодной плазмы не контактировал с экранным электродом, на торце анода, обращенном к катоду, установлена диафрагма такого же диаметра. Пазухи между обоймой и пакетом резисторов заполнены герметиком.

Конструкция катода на базе нихромовых проволочек приведена на рис. 2. Проволочки  $\varnothing 100$  мкм и длиной 3 см вставлены в керамические трубки с



**Рис. 1.** Взрывоэмиссионный катод на основе резисторов ТВО-1. 1 – катододержатель; 2 – экранирующий электрод; 3 – фторопластовая обойма; 4 – латунный диск; 5 – резистор ТВО-1.



**Рис. 2.** Взрывоэмиссионный катод на основе нихромовых проволочек. 1 – катододержатель; 2 – экранирующий электрод; 3 – фторопластовая обойма; 4 – латунный диск; 5 – нихромовая проволока  $\varnothing 100$  мкм; 6 – керамическая трубка.

узкими каналами. Общее число эмиттеров составляет 297. В остальном конструкция катода сходна с конструкцией катода на базе резисторов ТВО-1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводились на установках “Ритм-У” и “Ритм-СП”, описанных соответственно в [5] и [6]. Для создания плазменного анода, заполняющего пространство между катодом и коллектором, использовался как обычный сильноточный отражательный (пеннинговский) разряд в аргоне [7], так и гибридный разряд, сочетающий сильноточный отражательный разряд с импульсными вакуумными дугами [5].

**Свечение катода.** Регистрация свечения катода проводилась с помощью цифрового фотоаппарата CASIO QV-3000EX/Ig в режиме открытого затвора, т.е. фиксировалось интегральное за импульс свечение. Съемка проводилась с торца электронной пушки. Для предотвращения попадания электронов пучка на оптическое окно осуществлялся их сброс на трубчатый коллектор с магнитной отсечкой электронов аналогично тому, как это делалось в [8]. Для предотвращения чрезмерной засветки матрицы фотоаппарата перед его объективом устанавливался интерференционный светофильтр НС-9 толщиной 3 мм.

На рис. 3 приведена характерная фотография свечения. Видно, что на фоне диффузного свечения слабой интенсивности выделяются более яркие пятна, “привязанные” к эмиттерам. Независимо от типа используемого плазменного анода они стабильно наблюдаются практически на всех эмиттерах, что свидетельствует в пользу хорошей работы катода.

Логично предположить, что относительно яркие пятна, локализованные на эмиттерах, пред-

ставляют собой свечение плазмы взрывоэмиссионных центров или, другими словами, катодных пятен. Считая, что к окончанию фронта импульса тока (примерно через 0.7 мкс, см. рис. 4) все эмиссионные центры функционируют, легко оценить, что средний ток на пятно составляет  $\sim 120$  А. При таком токе время его жизни намного превышает длительность импульса [9], что является положительным фактором для работы катода. Падение напряжения на резисторах составляет 250–500 В, что достаточно для реализации эффекта “подхвата” [10], т.е. возникновения нового эмиссионного центра при “набегании” на него плазмы от соседнего эмиттера.

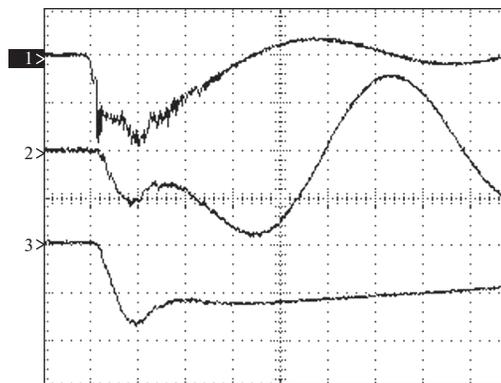


**Рис. 3.** Фотография свечения катода. Амплитуда импульса ускоряющего напряжения 30 кВ, давление аргона 0.4 мТорр, индукция внешнего ведущего магнитного поля 0.11 Тл.

Среднее расстояние между эмиттерами задается поперечными размерами резистора и составляет ~3.6 мм, а количество эмиссионных центров на единицу площади (плотность) – около 6 шт/см<sup>2</sup>. В случае катода из медной оплетки их плотность ниже примерно в 1.7–2 раза [8]. Это объясняет повышенную скорость нарастания тока в случае катода с резистивной развязкой, что и наблюдалось нами ранее [4]. Если изготовить катод из резисторов ТВО-0.5, имеющих меньшие поперечные размеры, то можно увеличить плотность эмиссионных центров еще примерно вдвое – до 11–12 шт/см<sup>2</sup>. При этом, однако, увеличиваются затраты на изготовление катода.

*О стабильности работы катода.* В этих экспериментах изучалась стабильность плотности энергии пучка от импульса к импульсу для вышеописанных катодов, которая сравнивалась с традиционно используемым медно-оплеточным катодом. В каждом режиме делалось 10 выстрелов. Измерения плотности энергии на установке “Ритм-СП” проводились с помощью калориметра на основе калиброванного терморезистора B57164K102-K NTC (1 кОм при 25°C) и медного поглотителя массой 26.2 г. Диаметр коллимирующей диафрагмы, расположенной перед поглотителем, составлял 3 см. Измерения плотности энергии на установке “Ритм-У” проводились с помощью тепловизора TESTO 875-1 по методике, описанной в [11, 12]. Обработка результатов тепловизионных измерений осуществлялась по программе IIRSoft 3.1 и в MS Excel. При обработке результатов значение плотности, соответствующей конкретному выстрелу, определялось путем усреднения внутри круга Ø5 см.

Необходимо также отметить, что часто более важным является не столько среднеквадратичное отклонение, сколько такой параметр, как отношение максимального значения плотности энергии к ее среднему значению в серии импульсов.



**Рис. 4.** Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (Ch1, масштаб по вертикали 16 кВ/деление), тока катода (Ch2, 24 кА/деление) и тока пучка на коллектор (Ch3, 12 кА/деление). Масштаб по горизонтали 1 мкс/деление. Плазменный анод на основе гибридного разряда. Давление аргона 0.4 мТорр, индукция внешнего ведущего магнитного поля 0.11 Тл.

Например, при формировании поверхностных сплавов Та-Тi на никелиде титана (сплав с памятью формы) [13] отклонение плотности энергии в большую сторону опаснее, чем отклонение в меньшую сторону, поскольку с увеличением плотности энергии растут толщина расплавленного слоя и время жизни расплава, что сильно искажает нужное распределение элементов в поверхностном сплаве.

В табл. 1 и 2 приведены результаты измерений плотности энергии пучка в различных режимах.

Из результатов, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что резистивная развязка эмиттеров, как правило, уменьшает среднеквадратичное отклонение плотности энергии и (что более важно) ее отклонение в большую сторону. По последнему

**Таблица 1.** Результаты калориметрических измерений на установке “Ритм-СП” для катодов двух типов: среднее за серию значение плотности энергии пучка  $W_{cp}$  со среднеквадратичным отклонением, максимальное и минимальное значения  $W_{max}$  и  $W_{min}$ , соответственно, и отношение  $W_{max}/W_{cp}$  в зависимости от зарядного напряжения  $U_{зар}$  генератора высоковольтных импульсов. Индукция ведущего магнитного поля 0.2 Тл, давление рабочего газа (аргон) 0.44 мТорр

$U_{зар}$	Медно-оплеточный катод				Катод из резисторов ТВО-1			
	$W_{cp}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{max}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{min}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{max}/W_{cp}$	$W_{cp}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{max}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{min}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{max}/W_{cp}$
18 кВ	3.74 ± 0.30	4.22	3.24	1.13	2.99 ± 0.28	3.52	2.52	1.18
22 кВ	4.28 ± 0.76	5.58	3.33	1.3	4.24 ± 0.51	4.92	3.49	1.16
26 кВ	5.50 ± 0.89	7.34	4.48	1.33	5.00 ± 0.59	5.79	3.91	1.16
30 кВ	7.02 ± 1.23	8.81	4.92	1.25	6.21 ± 0.49	6.92	5.43	1.11

**Таблица 2.** Результаты тепловизионных измерений на установке “Ритм-У” для катодов трех типов: среднее за серию значение плотности энергии пучка  $W_{\text{ср}}$ , ее максимальное значение  $W_{\text{max}}$ , отношение  $W_{\text{max}}/W_{\text{ср}}$ . Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов 30 кВ, индукция ведущего магнитного поля 0.11 Тл, давление рабочего газа (аргон) 0.4 мТорр

Катод	$W_{\text{ср}}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{\text{max}}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{\text{max}}/W_{\text{ср}}$
Медно-оплеточный	9.008	9.841	1.092
Из резисторов ТВО-1	9.964	11.307	1.135
Из нихромовых проволок	8.634	9.134	1.058

критерию наилучшие результаты дает катод из нихромовых проволок, однако анализ термограмм показал, что однородность распределения плотности энергии у данного катода хуже, чем у катода на базе резисторов ТВО-1 и медно-оплеточного катода. Таким образом, наиболее предпочтительным из исследованных катодов является именно катод на базе резисторов ТВО-1.

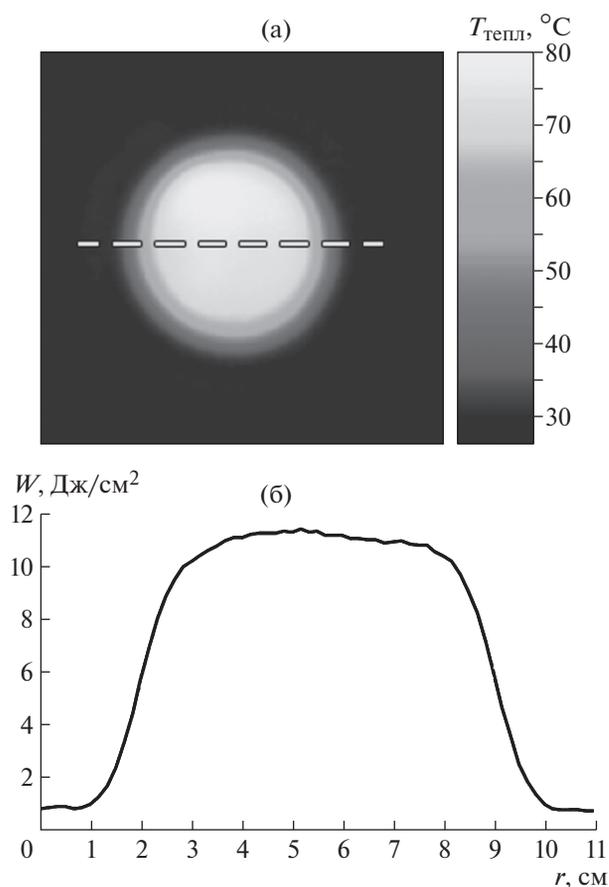
Характерная термограмма и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка приведены на рис. 5. Приведенное на нем распределение является одним из лучших за всю историю эксплуатации источников нерелятивистского сильноточного электронного пучка.

Следует отметить, что, варьируя величину сопротивлений в цепи эмиттеров, можно управлять распределением плотности энергии по сечению пучка. Поскольку проводимость катодной плазмы в поперечном направлении должна быть сильно ограничена действием ведущего магнитного поля, то можно ожидать, что падение напряжения на резисторах с различным сопротивлением также будет разным. Следовательно, электроны, испущенные различными эмиссионными центрами, могут ускориться до различных энергий. В нашем случае для улучшения однородности пучка сопротивления резисторов в центральной части катода были сделаны вдвое большими, чем на его периферии.

*Ресурс работы катода.* Испытания катода на базе резисторов ТВО-1 проводились в традиционной схеме формирования плазменного анода с помощью сильноточного отражательного разряда. Коллектором служил диск из нержавеющей стали Ø8 см. Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов составляло 25 кВ, что эквивалентно плотности энергии пучка на коллекторе  $\sim 7$  Дж/см<sup>2</sup>. В процессе испытаний четырежды проводилась чистка пушки и катода (кроме самих выводов резисторов, служивших эмиттерами) от осадка продуктов испарения коллектора и других конструктивных элементов, подвергающих-

ся интенсивному воздействию пучка. Такие достаточно жесткие условия эксплуатации (нержавеющая сталь, оседавшая на поверхность эмиттеров, как известно, обладает низкими эмиссионными свойствами) были выбраны нами преднамеренно.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения, тока катода и тока пучка на коллектор, полученные по прошествии указанного при них числа последовательных импульсов (интервал между импульсами – 10 с). Видно, что по мере наработки эмиссионные характеристики катода не ухудшаются: скорость нарастания тока катода и тока пучка не падают, равно как и их амплитуда. Нет сомнений, что ресурс работы данного катода существенно превзойдет уже достигнутую величину (50000 импульсов при токовой нагрузке  $\sim 0.001$  Кл/см<sup>2</sup>), которая, в свою очередь, в несколько раз превосходит ресурс медно-оплеточного катода (около 10000 импульсов), достигнутый в [14, 15].



**Рис. 5.** Термограмма (а) и соответствующее распределение плотности энергии пучка по сечению (б – вдоль штриховой линии на термограмме). Катод на базе резисторов ТВО-1, плазменный анод на основе гибридного разряда. Давление аргона 0.4 мТорр, индукция внешнего ведущего магнитного поля 0.11 Тл.

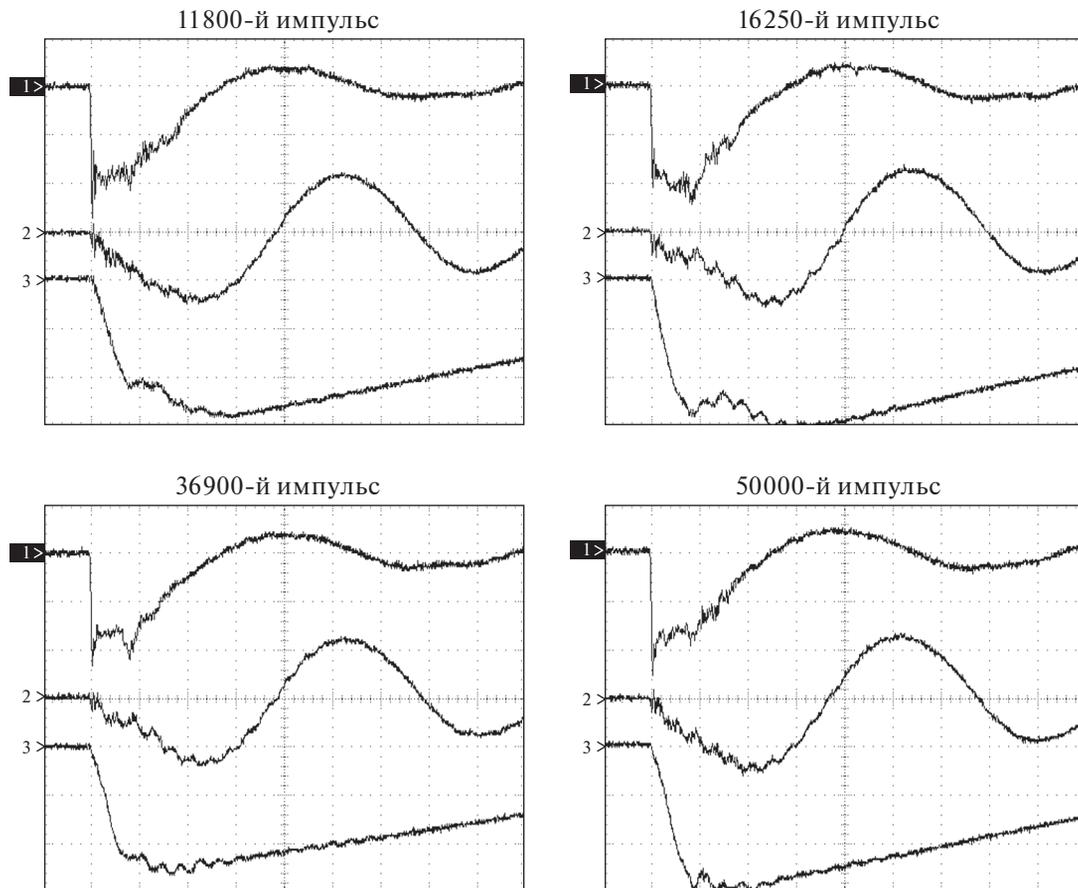


Рис. 6. Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (Ch1, масштаб по вертикали 10 кВ/деление), тока катода (Ch2, 25 кА/деление) и тока пучка на коллектор (Ch3, 5 кА/деление). Масштаб по горизонтали 1 мкс/деление.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Продемонстрирована устойчивая работа взрывоэмиссионного катода с резистивной развязкой эмиттеров в сильноточном плазмонаполненном диоде. Для данного катода скорость нарастания тока на фронте импульса в среднем на 20–30% превышает аналогичную величину, полученную в случае многопроволочного медного катода.

2. В сравнении с традиционными медно-оплеточными катодами, катоды с резистивной развязкой эмиттеров позволяют уменьшить как среднеквадратичный разброс плотности энергии от импульса к импульсу, так и отношение ее максимального значения к среднему значению в серии импульсов. По совокупности стабильности от импульса к импульсу и однородности распределения плотности энергии по сечению пучка наиболее предпочтительным оказался катод на базе резисторов ТВО-1.

3. Достигнутый к настоящему времени ресурс работы катода на базе резисторов ТВО-1 составил уже 50000 импульсов (при токовой нагрузке

$\sim 0.001$  Кл/см<sup>2</sup>) без ухудшения его эмиссионных свойств. Катод пригоден для дальнейшей эксплуатации.

Авторы признательны Е.В. Яковлеву за помощь в проведении экспериментов на установке “Ритм-СП”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев В.А., Василевский М.А., Ройфе И.М., Середенко Е.В., Энгелько В.И. // Письма ЖТФ. 1978. Т. 4. № 18. С. 1083.
2. Василевский М.А., Ройфе И.М., Энгелько В.И. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 6. С. 1183.
3. Озур Г.Е. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск. 1991. 163 с.
4. Kiziridi P.P., Ozur G.E. // J. Phys.: Conference Series. 2015. V. 652. P. 012008. doi 10.1088/1742-6596/652/1/012008
5. Кизириди П.П., Озур Г.Е., Зюлькова Л.А., Батраков А.В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 6/2. С. 42.

6. *Марков А.Б., Миков А.В., Озур Г.Е., Падей А.Г.* // ПТЭ. 2011. № 6. С. 122.
7. *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Карлик К.В.* // ПТЭ. 2005. № 6. С. 58.
8. *Карлик К.В., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9. Приложение. С. 214.
9. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
10. *Проскуровский Д.И., Пучкарев В.Ф.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 12. С. 2611.
11. *Кизириди П.П., Марков А.Б., Озур Г.Е., Фролова В.П.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/2. С. 114.
12. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 6. С. 132.
13. *Meisner L.L., Markov A.B., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Mironov Yu.P., Poletika T.M., Girsova S.L., Shepel D.A.* // J. Alloys & Compounds. 2018. V. 730. P. 376.
14. *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Карлик К.В.* Патент на изобретение 2313848 РФ. МПК H01J 3/02 // Оpubл. 27.12.2007. БИ № 36.
15. *Озур Г.Е.* Дис. ... док-ра техн. наук. Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск. 2009. 287 с.