_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 537.533.72+537.533.335

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ УСКОРЯЮЩЕГО ЗАЗОРА В ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

© 2021 г. В. И. Шин^{*a*,*}, П. В. Москвин^{*a*}, М. С. Воробьев^{*a*}, В. Н. Девятков^{*a*}, С. Ю. Дорошкевич^{*a*}, Н. Н. Коваль^{*a*}

^а Институт сильноточной электроники СО РАН Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3 *e-mail: shin.v.i@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.06.2020 г. После доработки 07.10.2020 г. Принята к публикации 19.10.2020 г.

Исследована стабильность работы источника электронов с плазменным катодом с сеточной (слоевой) стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом, граница которого открыта. Повышение стабильности работы источника достигнуто за счет уменьшения обратных газового и ионного потоков при изменении траектории электронного пучка благодаря размещению эмиссионного электрода источника электронов и мишени в разных плоскостях. Проведены калориметрические измерения радиального распределения плотности энергии генерируемого электронного пучка как в условиях его отклонения, так и в режиме "прямой" транспортировки, когда коллекторная мишень находится в прямой видимости от эмиссионного электрода. Экспериментально показано, что при отклонении пучка стабильность работы источника электронов кратно возрастает, что позволяет расширить диапазон параметров пучка и открывает новые возможности использования такого электронного источника в научных и технологических целях.

DOI: 10.31857/S0032816221020191

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники электронов на основе плазменных эмиттеров применяются для генерации как широких, так и сфокусированных электронных пучков, имеющих энергию до 300 кэВ с током от единиц ампер до нескольких килоампер [1]. Отдельный интерес вызывают источники электронов, ориентированные на их использование для модификации поверхности различных неорганических материалов, функциональные свойства которых в ряде случаев улучшаются на порядок и выше [2, 3].

К основным преимуществам импульсного электронно-пучкового облучения, по сравнению с традиционным видом воздействия концентрированным потоком энергии на поверхность — лазерным, можно отнести более высокий коэффициент полезного действия (до 90%) электронных источников, высокую эффективность энерговклада в поверхностный слой материала (малый коэффициент отражения электронов), возможность полного контроля и управления всеми параметрами облучения при высокой степени локализации энергии в поверхностном слое, значительно бо́льшую (до 10 см²) площадь поверхности, обрабатываемой за импульс [4—8], а также сравнительно низкую (±10%) неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка.

По сравнению с мощными ионными пучками [9–11], которые также могут использоваться для модификации поверхности материалов, низкоэнергетические (<30 кэВ) плотные электронные пучки генерируются в частотно-импульсном (до 10 Гц) режиме при меньших (на порядок величины) ускоряющих напряжениях и не требуют создания специальной радиационной защиты, так как сопутствующее рентгеновское излучение экранируется стенками рабочей вакуумной камеры.

Высокая энергетическая эффективность, более высокая однородность плотности энергии по сечению потока, хорошая воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования выгодно отличают импульсные электронные пучки также и от импульсных потоков низкотемпературной плазмы при потенциальном использовании тех и других в технологических целях [9, 10, 12–14]. Таким образом, в настоящее время можно сделать однозначное заключение о перспективности использования электронных пучков в различных технологических процессах и научных целях, позволяющих достигать эффектов на поверхности материалов, которые не могут быть реализованы с использованием альтернативных методов.

Однако, как и в любых других источниках электронов, проблемы электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка и эмиссионной способности сетчатого плазменного катода на основе различного типа разряда являются крайне актуальными. Теоретическая модель такого катода и анализ его эмиссионных свойств представлены в [15, 16]. Эффективность извлечения электронов из плазмы разряда, которая определяется отношением тока электронной эмиссии к току разряда, в высоковольтных электронных источниках с плазменным катодом обычно ограничена на уровне 70% во избежание дестабилизации работы плазменного катода [17].

Рабочее давление источников электронов с плазменным катодом также ограничено сверху, что связано не только с пашеновским пробоем ускоряющего промежутка, но и, согласно [18], с нарушением стабилизирующей функции эмиссионной сетки в результате выхода границы эмитирующей плазмы за сетку в ускоряющий промежуток и переключением разряда с анода на извлекающий электрод. В этом случае в ускоряющем промежутке происходит неконтролируемая интенсивная ионизация газа, рост ионного потока со стороны ускоряющего промежутка в эмитирующую плазму, повышение концентрации плазмы, а соответственно, дальнейшее увеличение электронной эмиссии.

Поскольку все эти процессы носят лавинообразный характер, завершаются они так называемым "плазменным" пробоем промежутка. Также эти процессы накладывают жесткие требования к выбору размера ячейки эмиссионной сетки. При этом авторы работы [18] отмечают, что существуют и другие механизмы возникновения электрического пробоя ускоряющего промежутка, например электрический пробой, связанный с зажиганием низковольтного разряда между электродами ускоряюшей системы. Такой механизм пробоя отмечен также и в работе [1] и чаще всего связан с тем, что значительная геометрическая прозрачность эмиссионных электродов приводит к равенству давлений в ускоряющем промежутке и плазменном эмиттере, поэтому работоспособность источников электронов обеспечивается благодаря тому, что ускоряющий промежуток делают достаточно длинным для предотвращения вакуумного пробоя и в то же время достаточно коротким, чтобы избежать в нем самостоятельного газового разряда [1].

Основным же механизмом электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов такого типа считается зарядка обратным ионным потоком диэлектрических пленок на поверхности эмиссионной сетки, обращенной в сторону ускоряющего промежутка. Накопление электрического заряда в этом случае приводит к росту напряженности электрического поля в пленке, при достижении определенного значения которой происходит пробой пленки. Ток пробоя приводит к инициированию на поверхности эмиссионной сетки катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью и, как следствие, к электрическому пробою ускоряющего промежутка. Единственным "спасением" от таких пробоев является высокая чистота высоковольтных электродов, а также безмасляные средства вакуумной откачки.

Для повышения электрической прочности ускоряющего промежутка необходимо обеспечить защиту эмитирующей поверхности катода от формирования диэлектрических пленок, образованных в результате взаимодействия интенсивного электронного пучка с мишенью.

Однако какими бы ни были средства откачки и материал высоковольтных электродов, взаимодействие пучка с мишенью приводит к интенсивной десорбции газа, испарению различных загрязнений с поверхности мишени, а также к плавлению самой мишени. Эти пары, расширяясь со скоростью ~ 10^4 см/с в канале транспортировки, могут достигать эмиссионного электрода, загрязняя и отравляя его поверхность, а, следовательно, также снижать электрическую прочность высоковольтного ускоряющего промежутка [19].

Кроме этого пары́ могут ионизоваться электронным пучком, образуя коллекторную плазму, скорость расширения которой ~ 10⁶ см/с, что также чаще всего приводит к инициированию пробоя в ускоряющем зазоре. Именно поэтому данная работа посвящена решению задачи повышения стабильности работы источника электронов с сетчатым плазменным катодом путем уменьшения обратного газового и ионного потоков с целью дальнейшего расширения рабочих параметров генерируемого электронного пучка.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа выполнена с использованием источника электронов "Соло" [7] с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом, граница которого открыта и подвижна, что позволяет генерировать широкий (диаметром до 40 мм) интенсивный (током до 200 A) субмиллисекундный (до 200 мкс) электронный пучок. Схема модернизированной экспериментальной установки "Соло" представлена на рис. 1.

Система имеет двухступенчатую схему зажигания разряда. Инициирующий (поджигающий) разряд загорается между полым электродом 1 и



Рис. 1. Схема модернизированной электронно-пучковой установки "Соло". 1 – поджигающий электрод; 2 – катод; 3 – анод; 4 – сетка; 5 – эмиссионный электрод; 6 – извлекающий электрод; 7 – труба дрейфа; 8 – коллектор; 9, 10 – соленоиды системы транспортировки; 11-15 – соленоиды отклоняющей системы; 16 – секторный отвод; U_d – напряжение дугового разряда, U_{ac} – ускоряющее напряжение, I_g – ток в ускоряющем промежутке, I_c – ток коллектора.

катодом 2. Основной дуговой разряд горит между катодом 2 и полым анодом 3. Постоянное ускоряющее напряжение (до 25 кВ) прикладывается между плоским эмиссионным электродом 5 и извлекающим электродом 6, выполненным в виде диафрагмы Ø82 мм. Эмиссионный электрод представляет собой плоскую пластину из нержавеющей стали, в центре которой выполнено эмиссионное отверстие Ø40 мм, перекрытое мелкоячеистой сеткой 4 из нержавеющей стали.

Извлекающий электрод *6*, труба дрейфа 7 и коллектор *8* находятся под потенциалом "земли". В качестве материала коллектора выбран алюминий, являющийся сравнительно легкоплавким материалом, как наиболее подходящий для проведения данных экспериментов, целью которых на данном этапе являлось не достижение максимальных параметров пучка, а определение наиболее устойчивых режимов его генерации.

Для транспортировки пучка используются соленоиды 9, 10. Для уменьшения обратного ионного и газового потоков в конструкцию данного стенда была внедрена магнитная отклоняющая система, которая позволила разместить эмиссионный электрод источника электронов и мишень в разных плоскостях. Отклоняющая система представляет собой секторный отвод 16 из нержавеющей стали, на каждый сектор которого смонтированы соленоиды 11–15.



Рис. 2. Внешний вид и вид калориметра в разрезе.

Система визуализации радиального распределения относительной плотности энергии пучка в области взаимодействия с материалом, необходимая для выявления возможных радиальных неоднородностей в распределении плотности энергии пучка, представляет собой цилиндр, на приемном основании которого имеется 9 круглых отверстий, расположенных линейно на одной оси, с расстоянием между соседними осями отверстий 7 мм (рис. 2). В корпусе блока термисторов из нержавеющей стали линейно смонтированы 9 теплоизолированных поглотителей (цилиндры Фарадея), каждый из которых находится за своим отверстием, через которое на него попадает электронный пучок. К поглотителю прикреплен терморезистор. Измеряя сопротивление этого терморезистора до и после воздействия на него электронным пучком, можно определить принесенную в поглотитель удельную энергию пучка.

Калориметр устанавливается в плоскости коллектора. При измерении радиального распределения плотности энергии калориметр всегда был ориентирован одинаково таким образом, чтобы оси отверстий в нем были параллельны оси системы транспортировки. Такое решение обусловлено тем, что в предварительных экспериментах вращение калориметра относительно его оси позволило определить отклонение в радиальном распределении плотности энергии пучка несущественным. Однако нужно отметить, что во всех последующих экспериментах калориметр устанавливался так, чтобы при отклонении электронного пучка прямая, на которой размещены отверстия на калориметре, была параллельна оси источника электронов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим радиальное распределение плотности энергии и форму профиля пучка в плоскости коллектора без системы отклонения и при ее наличии. Используя калориметрические измерения, было показано, что как в случае "прямой" транспортировки электронного пучка, так и в

случае его отклонения радиальное распределение плотности энергии пучка в плоскости коллектора имеет одинаковую форму (рис. 3а), а автографы пучка (рис. 3б), полученные на титановой пластине, имеют одинаковый диаметр оплавленной зоны. Расхождение в абсолютных значениях плотности энергии электронного пучка, представленных на рис. За, вероятнее всего, может быть связано с точностью юстировки калориметра относительно оси пучка и погрешностью самого прибора, обусловленной, в том числе, его пространственной дискретностью. Режим, при котором фиксировались распределение плотности энергии и профиль пучка: ускоряющее напряжение $U_{ac} = 14 \text{ kB}$, давление в камере p = 45 мПа, длительность импульса t = 50 мкс, ток пучка I = 170 A, магнитное поле в соленоидах 11-15 (рис. 1) $-B_1 \approx 30$ мТл, 9, $10-B_2 \approx 50$ мТл.

При облучении поверхности материалов электронными пучками исследователи, как правило, оперируют двумя параметрами: плотностью мощности и плотностью энергии электронного пучка. Так, например, источники электронов на основе взрывной эмиссии [5, 8], чаще всего имеющие длительность пучка, не превышающую нескольких микросекунд, позволяют обеспечивать гигаваттную мощность пучка, что позволяет получать на мишени расплавленный слой при сравнительно низкой плотности энергии (единицы Дж/см²). Плазменные эмиттеры [1, 2, 6, 7] обеспечивают существенно меньшую мощность пучка (до уровня десятков мегаватт), но существенно бо́льшую его длительность, что позволяет получать на поверхности мишени расплавленный слой при плотности энергии, достигающей десятков и даже сотен Дж/см².

В данной работе предельные режимы генерации электронного пучка характеризовались как по максимальной мощности в цепи ускоряющего промежутка Pg, так и по энергосодержанию пучка Eg как интеграла произведения тока и напряжеия в цепи ускоряющего промежутка по длительности импульса тока разряда (важно отметить, что энергосодержание пучка оценивалось именно в рамках длительности импульса тока разряда, поскольку после окончания последнего наблюдаются так называемые "самоинициированные" всплески тока пучка, о природе и характере которых будет более предметно указано ниже). Превышение некоторых значений этих параметров вело к пробою ускоряющего промежутка, поэтому для оценки стабильности работы источника электронов был введен коэффициент S, который определяется как $S = (N_{\text{цел}}/N) \cdot 100\%$, где N - общее количество импульсов тока пучка (в эксперименте эта величина составляла N = 50), $N_{\text{цел}} -$ количество импульсов тока пучка, прошедших без пробоя ускоряющего промежутка.



Рис. 3. Радиальное распределение плотности энергии пучка в плоскости коллектора (а) и автограф пучка на титановой пластине (б).

Для оттренированного высоковольтного ускоряющего промежутка источника электронов проведено экспериментальное сравнение стабильности работы источника с системой отклонения и без нее. Ток дугового разряда І_d в эксперименте является вариативным параметром, превышение которым некоторой величины приводило к пробою ускоряющего промежутка. В табл. 1 приведены предельные режимы генерации электронного пучка для исходной системы и определены коэффициенты стабильности работы источника для исходной и отклоняющей систем при данных режимах. Предельными условно названы режимы генерации пучка, стабильность S работы источника при которых ниже 80%, что затрудняет их использование в большинстве технологических процессов.

Представленные данные из табл. 1 показывают, что при одних и тех же режимах генерации электронного пучка использование отклоняющей системы приводит к повышению стабильно-



Рис. 4. Характерные осциллограммы тока разряда I_d , тока в ускоряющем промежутке I_g и напряжения анод–катод разрядной ячейки U_d систем № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в). $U_{ac} = 20 \text{ kB}, p(\text{Ar}) = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ Па.}$

сти работы источника электронов. Некоторые режимы, которые считались предельными для исходной системы, при отклоняющей системе являются режимами, где пробои ускоряющего промежутка отсутствовали вовсе.

Предельные режимы, сведенные в табл. 2, определялись для трех конфигураций трубы

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 2 2021

дрейфа: исходная "прямая" система № 1 (длина трубы дрейфа около 150 мм), система № 2 с поворотом пучка на 90° (длина трубы дрейфа 780 мм), "прямая" система № 3 транспортировки пучка (длина трубы дрейфа 780 мм).

Из табл. 2 видно, что режимы с наибольшим энергосодержанием пучка удалось достичь, используя системы транспортировки электронного пучка № 2 и № 3. В ряде случаев интегральные и мгновенные характеристики максимальных режимов для этих систем имеют близкие значения, однако, в ходе экспериментов с различными системами наблюдался выброс "самоинициированного" тока в цепи ускоряющего промежутка после окончания горения основного дугового разряда (рис. 4а-4в). Вероятно, этот ток связан с процессами взаимодействия электронного пучка с парами материала мишени, которые, развиваясь, приводят к инициированию ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода даже после прекращения генерации эмиссионной плазмы. Из осциллограмм видно, что при увеличении длины трубы дрейфа или ее искривлении задержка образования этого "самоинициированного" тока увеличивается, а его амплитуда уменьшается.

Система отклонения оказалась наиболее эффективной в случае воздействия на алюминиевый коллектор пучком большой длительности. В исследованиях при длительности импульса 50 мкс, давлении 25 мПа и ускоряющем напряжении 20 кВ не удалось добиться увеличения параметров пучка при переходе от прямой к поворотной системе транспортировки той же длины, тогда как при 150 мкс более чем вдвое (от 2.6 до 5.5 МВт) увеличилась максимальная мощность в цепи ускоряющего промежутка по сравнению с прямой транспортирующей системой. В этом же режиме в 1.8 раза (от 385 до 700 Дж) увеличилось энергосодержание пучка в ускоряющем промежутке, а расчетная энергия, перенесенная пучком электронов на коллектор E_b , вычисленная по методике, описанной в работах [20, 21], возросла в 1.7 раза с 325 до 560 Дж (табл. 3).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в источнике электронов с сетчатым плазменным катодом системы отклонения электронного пучка позволяет повысить стабильность работы этого источника, заключающуюся в снижении количества электрических пробоев ускоряющего зазора, и, тем самым, позволяет кратно (в эксперименте до 3.5 раза) расширить предельные параметры электронного пучка (как амплитуды, так и длительности тока пучка). Нужно отдельно отметить большое содержание распыленного материала мишени, наблюдаемого визуально на трубе дрейфа со стороны мишени.

№ режима	Pe	жимы работь	Стабильность без системы		
	<i>р</i> , мПа	<i>U_{ac}</i> , кВ	<i>t</i> , мкс	I_d , A	отклонения (с системой) S, %
1		14	50	200	54 (90)
2	25		150	105	26 (100)
3		20	50	145	42 (100)
4			150	55	80 (100)
5	45	14	50	170	44 (90)
6			150	90	52 (100)
7		20	50	105	66 (80)
8			150	50	80 (100)

Таблица 1. Стабильность работы источника электронов "Соло"

Таблица 2. Предельные режимы источника электронов "Соло" для трех конфигураций трубы дрейфа

№ режима	Параметры		Система № 1		Система № 2		Система № 3					
	<i>р</i> , мПа	<i>U_{ac}</i> , кВ	<i>t</i> , мкс	P_g , MBT	E_g , Дж	<i>S</i> , %	P_g , МВт	<i>E</i> _g , Дж	<i>S</i> , %	P_g , MBT	<i>E</i> _g , Дж	<i>S</i> , %
1	25	14	50	2.5	132	54	4.0	225	48	4.0	211	48
2			150	1.5	213	26	3.1	405	20	3.4	437	28
3		20	50	2.8	141	42	6.0	327	74	6.8	314	68
4			150	1.7	197	80	5.5	699	80	2.6	384	58
5	45 2	14	50	2.6	138	44	3.5	200	28	3.5	213	56
6			150	1.4	217	52	2.9	357	68	3.0	395	80
7		20	50	3.1	150	66	4.5	259	48	5.1	304	62
8			150	1.9	226	80	4.1	530	80	2.7	408	56

При этом противоположная сторона трубы дрейфа оставалась чистой, что также подтверждает предположение авторов о росте электрической прочности ускоряющего зазора в результате достижения большей чистоты поверхности эмиссионного электрода.

Это же предположение подтверждают полученные осциллограммы, из которых видно, что при удлинении или искривлении трубы дрейфа

увеличивается задержка возникновения "самоинициированного" тока пучка, а также уменьшается его амплитуда и длительность. Амплитуда "самоинициированного" тока пучка увеличивается при повышении плотности энергии электронного пучка. В некоторых режимах замечено, что при генерации пучка от импульса к импульсу происходит повышение амплитуды этого "самоинициированного" тока пучка при превышении некоторого

№ режима	Параметры			Система № 1	Система № 2	Система № 3	
	<i>р</i> , мПа	<i>U_{ac}</i> , кВ	<i>t</i> , мкс	E_b , Дж	E_b , Дж	E_b , Дж	
1		14	50	111	177	169	
2	25	14	150	169	326	331	
3	23	20	50	118	261	251	
4		20	150	152	560	323	
5		14	50	108	150	163	
6	15		150	164	278	296	
7	73	20	50	116	201	236	
8			150	164	420	306	

Таблица 3. Предельные величины расчетной энергии электронного пучка источника электронов "Соло"

порогового значения амплитуды, при котором также происходит пробой ускоряющего зазора.

Так, при использовании отклоняющей системы амплитуда этого тока минимальна в сравнении с "прямыми" системами, что, вероятно, и определяет более стабильную работу источника электронов, а кроме этого позволяет более точно контролировать энергию, вложенную в поверхность образца при модификации поверхности конкретного металлического изделия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. // Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Окс Е.М. // Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: НТЛ (Изд-во науч.-техн. лит-ры), 2005.
- Gromov V.E., Yurev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. // The microstructure of quenched rails. Cambridge international science publishing, 2016. P. 157.
- Astrelin V.T., Kandaurov I.V., Vorobyov M.S., Koval N.N., Kurkuchekov V.V., Sulakshin S.A., Trunev Yu.A. // Vacuum. 2017. V. 143. P. 495. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.03.025
- Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams // Materials surface processing by directed energy techniques / Ed. Y. Pauleau. Elsevier, 2006. Ch. 6.
- Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под общ. ред. А.И. Потекаева. Томск: НТЛ, 2007. Гл. 13.
- Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.B. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. № 2. P. 243. . https://doi.org/10.1017/S026303460321212X

- Ozyr G.E., Proskurovsky D.I., Karlik K.V. // Proc. 7th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 25–30 July 2004, Tomsk, Russia. 2004. P. 20.
- Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Русаков В.С., Туркебаев Т.Э. // Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: МГУ, 2005.
- Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калин Б.А., Якушин В.Л. // Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М.: Круглый стол, 2001.
- Remnev G.E., Isakov I.F., Opekunov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutayev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., Pushkaryov A.N., Kutuzov V.L., Ovsyannikov M.Yu. // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 114. № 2–3. P. 206. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00058-4
- Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. // Плазменные упрочняющие технологии. Киев: Наукова думка, 2008.
- Углов В.В., Анищик В.М., Стальмошенок Е.К., Черенда Н.Н., Асташинский В.В., Румянцева И.Н., Аскерко В.В., Кузьмицкий М.М. // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 5. С. 44.
- 14. Uglov V.V., Cherenda N.N., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Kononov A.G., Petuhov Yu.A., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. // High Temperature Material Processes. 2007. V. 11. № 3. P. 383. https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.v11.i3.60
- 15. Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Терюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 66.
- Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Терюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687.
- 17. *Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. //* Эмиссионная электроника. М.: МГТУ, 2009.
- 18. Бурдовицин В.А., Куземченко М.Н., Окс Е.М. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 134.
- 19. Батраков А.В. // Эмиссионная электроника. Томск: ТПУ, 2008.
- Григорьев С.В., Астрелин В.Т., Кандауров И.В., Коваль Н.Н., Москвин П.В., Тересов А.Д. // Плазменная эмиссионная электроника. Труды IV Международного Крейнделевского семинара / Под ред. А.П. Семенова. Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, Россия, 2012. С. 81.
- Воробьев М.С., Григорьев С.В., Москвин П.В., Сулакшин С.А. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. Вып. 11–3. С. 199.