

10;11

## **Взрывоэмиссионный катод с большим временем жизни для генераторов мощного СВЧ-излучения**

© А.В. Гунин, В.Ф. Ландль, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

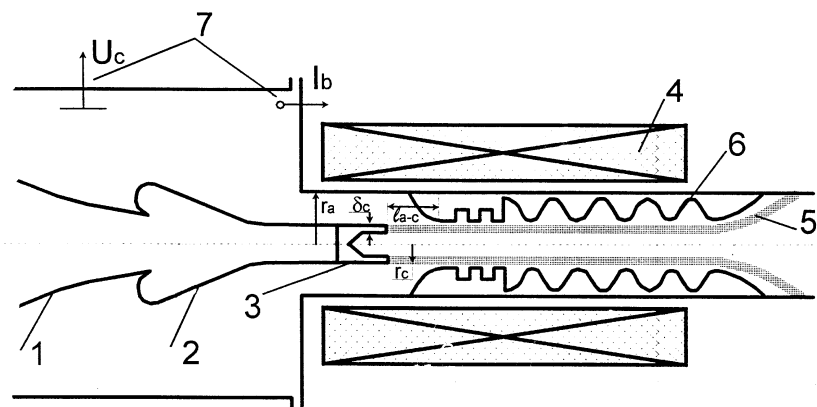
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 28 июля 1999 г.

Исследована работа холодных взрывоэмиссионных катодов с плотностью тока  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>, изготовленных из различных материалов, при большом числе включений. Напряжение на катоде составляло  $\sim 500$  кВ, максимальный ток  $\sim 5$  кА, длительность импульса  $\sim 20$  нс. Показано, что при небольшом числе включений ( $\leq 10^3$  импульсов) катоды с близкой геометрией обладают близкими эмиссионными свойствами. Для большинства исследованных материалов с ростом числа включений ( $\geq 10^3$  импульсов) происходит увеличение времени нарастания тока (вплоть до длительности импульса) и уменьшение максимального тока вакуумного диода. При использовании графитового катода максимальный ток оставался неизменным вплоть до  $10^8$  включений. Определен унос массы катодов для различных материалов. Полученные результаты позволили осуществить непрерывную работу релятивистской 3-х сантиметровой ЛОВ с выходной мощностью 350–400 МВт с практически неизменным уровнем мощности в течение  $10^8$  импульсов при частоте повторения  $100 \div 150$  Hz.

### **Введение**

Одной из основных проблем, которые возникают при использовании сильноточных импульсно-периодических ускорителей, является проблема создания холодных взрывоэмиссионных катодов с большим временем жизни. Эксперименты показывают, что в большинстве случаев эмиссионные свойства холодных катодов зависят от полного числа импульсов тока [1], причем с ростом числа импульсов увеличивается время нарастания тока, уменьшается максимальный ток электронного пучка, ухудшается его пространственная однородность [2]. В случае,



**Рис. 1.** Коаксиальный диод с трубчатым электронным пучком. 1 — изолятор, 2 — катододержатель, 3 — катод, 4 — соленоид, 5 — электронный пучок, 6 — структура ЛОВ, 7 — датчики напряжения на катоде и тока диода.

когда эмиссионная поверхность катода представляет собой набор отдельно функционирующих эмиттеров, полный ток диода начинает зависеть как от числа, так и от размеров (скорости расширения) эмиссионных центров [3]. В работе [4] для планарных вакуумных диодов с плотностью тока  $10\text{--}100\text{ А/см}^2$  предложен катод, в котором эмиссионной поверхностью является поверхность контакта металл–диэлектрик, так называемый металл–диэлектрический катод. В данном катоде, с одной стороны, уменьшен порог по напряжению, при котором возможно формирование эмиссионной поверхности, по сравнению с катодами, изготовленными из однородных материалов, с другой стороны, решена проблема постоянства условий возникновения эмиссионных центров при наличии эрозии, как металла, так и диэлектрика. Исследования показали, что металл–диэлектрический катод с площадью эмиссионной поверхности  $\sim 200\text{ см}^2$  обладает временем жизни более  $10^8$  импульсов при уровне напряжения  $\sim 500\text{ кВ}$ , тока  $\sim 5\text{ кА}$  и длительности импульсов  $\sim 20\text{ нс}$ .

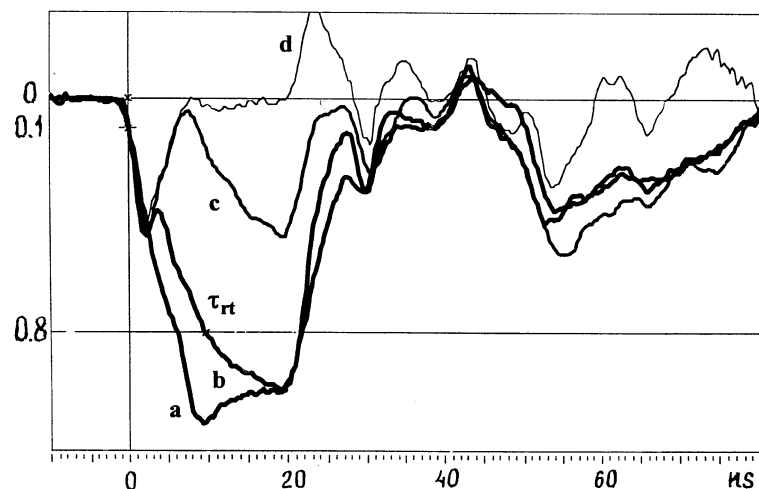
В коаксиальных вакуумных диодах с внешним магнитным полем (рис. 1) обычно используются холодные взрывоэмиссионные катоды с острой кромкой, которые позволяют формировать трубчатые электрон-

ные пучки с плотностью тока  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Такие пучки, как правило, применяются в релятивистских СВЧ-генераторах для получения мощного СВЧ-излучения. Кромочные катоды в виде полых цилиндров позволяют обеспечить на их поверхности достаточно высокий уровень электрических полей, которые могут достигать более  $10^6$  В/см при напряжении на катоде  $\sim 500$  кВ. Это позволяет надеяться на то, что такие катоды могут сохранять свои эмиссионные свойства в течение достаточно большого числа импульсов. С другой стороны, вследствие высокой плотности тока взрывоэмиссионные катоды с острой кромкой подвержены более сильному влиянию процессов эрозии по сравнению с катодами в планарных вакуумных диодах [1,2]. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование изменения эмиссионных свойств катодов в коаксиальном вакуумном диоде при большом числе импульсов тока, определение уноса массы катода и поиск материала для создания катодов со временем жизни более  $10^8$  импульсов тока.

## Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты проводились на установке "СИНУС-500", которая является модификацией установки "СИНУС-6" [5] и представляет собой мощный наносекундный СВЧ-генератор на основе релятивистской ЛОВ с высокой частотой следования импульсов. Трубчатый электронный пучок формировался в продольном магнитном поле с индукцией  $\sim 0.6$  Т, которое создавалось постоянным охлаждаемым соленоидом с потребляемой мощностью  $\sim 20$  кВт. Пучок транспортировался через электродинамическую структуру ЛОВ [6] и осаждался на охлаждаемый коллектор. Напряжение на катоде  $\approx 500$  кВ, ток пучка  $\approx 5$  кА, длительность импульса  $\approx 20$  нс. Выходная мощность СВЧ-излучения была 350–400 МВт, длина волны  $\approx 3$  см, длительность импульса излучения 6–11 нс. Частота следования импульсов составляла 100–150 Нз. Все эксперименты проводились при неизменной амплитуде падающей волны напряжения на диоде, что обеспечивалось постоянным уровнем напряжения срабатывания управляемого разрядника ускорителя.

В экспериментах исследовались катоды, изготовленные из различных материалов: нержавеющей стали ( $\rho = 8.1$  г/см<sup>3</sup>), меди ( $\rho = 8.93$  г/см<sup>3</sup>), магния ( $\rho = 1.74$  г/см<sup>3</sup>) и пиролитического графита ( $\rho = 1.88$  г/см<sup>3</sup>),



**Рис. 2.** Характерные осциллограммы импульсов. *a* — напряжение, *b* — ток, *c* — ток диода в случае прекращения эмиссии, *d* — реактивный ток диода (без электронного пучка).

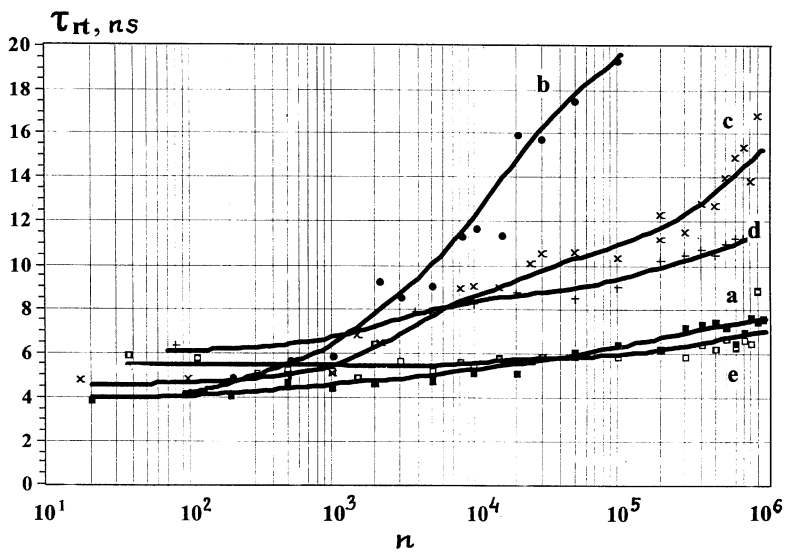
а также композиции различных материалов, таких как медь–графит и медь–диэлектрик. Катоды изготавливались в виде полых цилиндров с диаметром  $\approx 35$  mm и толщиной стенки от 0.2 до 2 mm. Медно–графитовый катод с суммарной толщиной стенки  $\approx 0.4$  mm изготавливался путем плотной посадки графитового кольца в медное, медно–диэлектрический катод — из двустороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 0.2 mm.

Измерения проводились с помощью осциллографа TDS-754C (500 MHz, 2 Gs/s). Регистрировались осциллограммы импульсов напряжения на катоде, тока вакуумного диода и выходной мощности СВЧ-излучения. Датчиком напряжения являлся емкостной делитель, тока — пояс Роговского, СВЧ-мощности — калиброванный детектор на основе вакуумного диода 6Д16Д. Эмиссионные свойства катодов оценивались по максимальному току в течение длительности импульса и времени нарастания тока до уровня 4 kA (рис. 2). Расход материала катодов вследствие эрозии эмиссионной поверхности определялся по

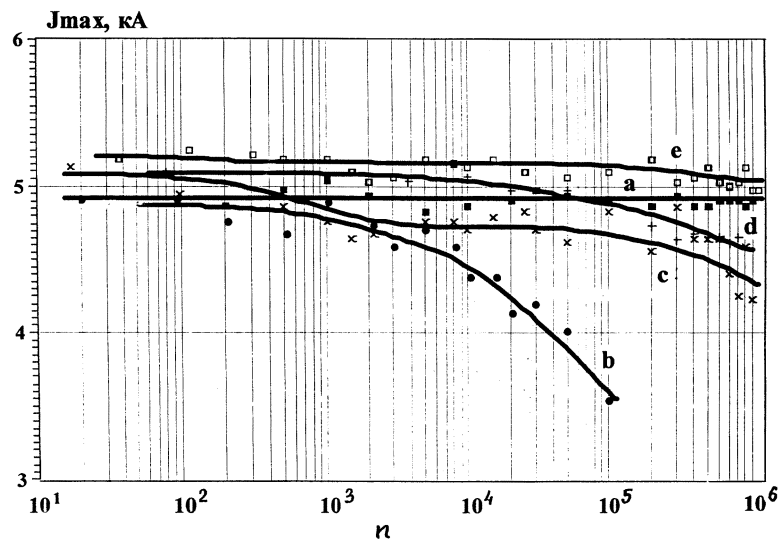
общему уменьшению массы катода после прохождения через него  $10^6$  импульсов тока. Заряд, прошедший через катод, вычислялся путем интегрирования импульса тока (рис. 2, *b*), за время от 0 до 80 ns. Его величина в экспериментах составляла  $\approx 160 \mu\text{C}/\text{имп.}$  Погрешность в определении заряда, даваемая током смещения вакуумного диода (рис. 2, *c*), не превышала 10%.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3 приведены зависимости времени нарастания тока для катодов с примерно одинаковой толщиной стенки, изготовленных из различных материалов, от числа импульсов. На рис. 4 представлены зависимости максимального тока вакуумного диода от числа импульсов для тех же катодов. Видно, что при небольшом числе импульсов ( $N \leq 10^3$ ), как время нарастания тока, так и максимальный ток вакуумного диода



**Рис. 3.** Изменение времени нарастания тока до уровня 4 кА. *a* — графит 0.3 mm, *b* — нержавеющая сталь 0.1 mm, *c* — медь 0.2 mm, *d* — магний 0.2 mm, *e* — медь-диэлектрик 0.2 mm.



**Рис. 4.** Изменение амплитуды тока. *a* — графит 0.3 mm, *b* — нержавеющая сталь 0.1 mm, *c* — медь 0.2 mm, *d* — магний 0.2 mm, *e* — медь-диэлектрик 0.2 mm.

практически не зависят от материала катода. По-видимому, это можно объяснить наличием на поверхности катода различных диэлектрических включений, а также адсорбированного газа, что понижает критические электрические поля, при которых возможно образование плазменных эмиссионных центров. Электрофизические свойства материала катода, в этом случае, оказывают слабое влияние на процессы формирования эмиссионной поверхности катода.

С ростом числа импульсов происходит очищение поверхности катода от посторонних включений и адсорбированного газа. При числе импульсов  $N \geq 10^3$  в условиях эксперимента начинают проявляться индивидуальные свойства материала катода. Для большинства исследованных катодов рост числа импульсов приводит к увеличению времени нарастания тока до длительности импульса напряжения и, как следствие, уменьшению максимального тока вакуумного диода. Эксперименты, проведенные с катодами, обладающими различной толщиной стенки  $\delta_c$ ,

Материал	Средний расход $10^{-9}$ г/имп.	Объемный расход $10^{-6}$ см <sup>3</sup> /С	Расход массы $10^{-6}$ г/С	Расход массы, $10^{-6}$ г/С			
				[8]	[9]	[10]	[11]
медь	9.1	6.7	60	12	130	115	40
магний	4.13	14.4	25	–	36	–	25
графит	5.58	18.1	34	142	–	170	–
медь–графит	10.1	–	63	–	–	–	–
медь–диэлектр.	27	–	170	–	–	–	–

показывают, что с увеличением  $\delta_c$  происходит более быстрое изменение времени нарастания тока и максимального тока пучка как функции числа импульсов. Для чистых металлов наиболее вероятным механизмом образования эмиссионных центров является взрыв микроострий за счет их быстрого разогрева автоэмиссионным током [1]. При взрыве микроострий происходит их разрушение. С другой стороны, микроострия могут рождаться вследствие вытеснения жидкого металла из зоны эмиссии под действием высоких давлений [7]. Увеличение времени нарастания тока вакуумного диода свидетельствует об уменьшении числа эмиссионных центров с ростом числа импульсов. В частности, для катода из нержавеющей стали, наблюдалось полное прекращение эмиссии после  $10^4$ – $10^5$  импульсов. Формы импульсов тока, в этом случае, приближались к форме реактивного тока диода (рис. 2, *d*). Таким образом, ухудшение эмиссионных свойств катодов может быть связано с изменением микрорельефа и очищением поверхности катода за счет протекания тока.

Результаты экспериментов по измерению расхода материала катодов приведены в таблице. В этой же таблице приведены данные по уносу, полученные другими авторами [8–11] в различных экспериментах.

Сравнение этих данных показывает, что удельный расход массы зависит от режима протекания тока (импульсный [8] или квазипостоянный [9–11]). Тем не менее, можно предположить, что основной причиной уноса массы катода и в том и в другом случае является испарение при разогреве материала катода в области эмитирующего катодного пятна. Доля капельной фракции эрозии катода в нашем случае, по-видимому, невелика, что не противоречит результатам работы [12].

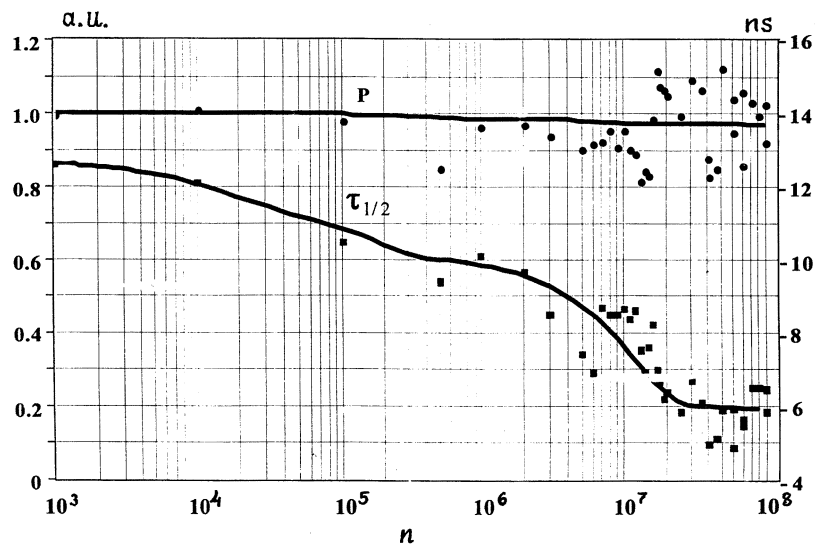


Рис. 5. Изменение выходных параметров СВЧ-генератора.

Как уже отмечалось, для всех исследованных катодов с ростом числа импульсов тока наблюдалось ухудшение эмиссионных свойств. Это, в частности, проявлялось в увеличении времени нарастания тока ( $\tau_{1/2}$ ), свидетельствующем об уменьшении числа эмиссионных центров с ростом числа импульсов. Стабилизация  $\tau_{1/2}$  наблюдалась только для графитового и медно-диэлектрического катодов. Однако последний имеет аномально высокий расход материала, связанный по-видимому, с интенсивным испарением диэлектрика.

Катод из пиролитического графита, диаметром 34.8 mm и толщиной кромки 0.3 mm был испытан при  $10^8$  включений. Начальное расстояние  $L_{a-c}$  выбиралось так, чтобы предполагаемое уменьшение его длины за счет эрозии ( $\sim 9$  mm), не оказывало значительного влияния на импеданс коаксиального вакуумного диода. Это позволило осуществить в течение всего эксперимента ( $10^8$  включений) работу релятивистской ЛОВ. На рис. 5 показано относительное изменение мощности и длительности на полувысоте СВЧ-импульсов. Мощность излучения уменьшилась не более чем на 10%. Более существенное изменение претерпела длитель-



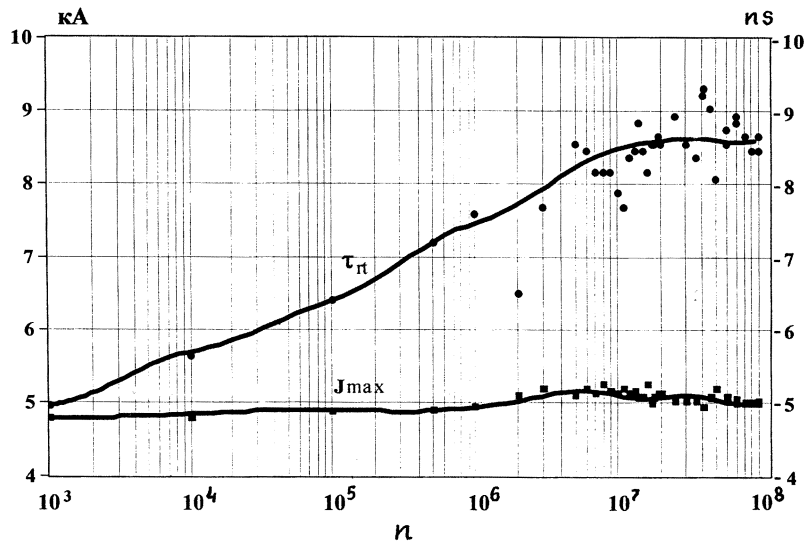


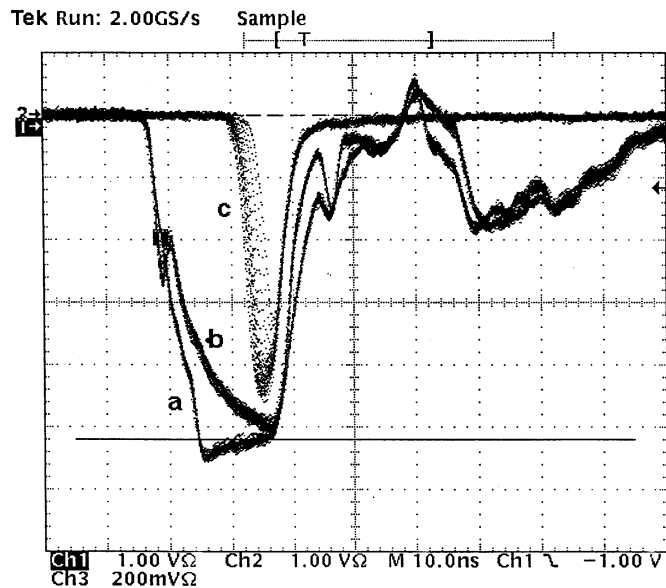
Рис. 6. Амплитуда тока и время нарастания для катода из графита.

ность СВЧ-импульсов, которая уменьшилась от 11 до 6 ns. Изменение длительности импульсов излучения происходило одновременно с ростом времени нарастания тока вакуумного диода. Уменьшение длительности СВЧ-импульсов сопровождалось увеличением ее нестабильности от импульса к импульсу. Это косвенно свидетельствует о некотором ухудшении качества электронного пучка, связанного с уменьшением числа эмиссионных центров.

Время нарастания тока для графитового катода быстро изменялось в течение первых  $10^6$  импульсов, а после  $5 \cdot 10^6$  импульсов достигло  $\sim 8.5$  ns и оставалось неизменным (рис. 6). Данные по объемному расходу графита (таблица) показывают, что такое число импульсов соответствует изменению длины катода на величину, порядка толщины его стенки  $\delta_c = 0.3$  mm. Это позволяет сделать вывод о том, что в течение первых  $(3-5) \cdot 10^6$  импульсов происходит изменение профиля кромки катода, которое выравнивает распределение электрического поля на его поверхности и, как следствие, работа катода принимает стационарный характер.

## Выводы

Проведенные эксперименты показали, что при небольшом числе импульсов тока ( $10^3 \div 10^4$ ) эмиссионные свойства катодов определяются главным образом начальным состоянием поверхностного слоя и практически не зависят от материала катода. Графитовые катоды, при определенном выборе геометрических параметров коаксиального вакуумного диода, обладают временем жизни более  $10^8$  включений (рис. 7). Процессы, приводящие к изменению параметров электронного пучка, связанные с изменением эмиссионной способности графитового катода, в условиях эксперимента прекращаются после  $\sim 5 \cdot 10^6$  импульсов. Эти процессы связаны с формированием профиля эмитирующей кромки катода, соответствующего минимуму электрического поля на его поверхности. Качество электронного пучка не претерпевает существен-



**Рис. 7.** Характерные осциллограммы после  $10^8$  импульсов. *a* — напряжение на катоде, *b* — ток диода, *c* — СВЧ-излучение.

ных изменений и позволяет его использовать для получения мощного микроволнового излучения в относительно низких магнитных полях.

Работа проводилась при финансовой поддержке GEC–Marconi Research Centre, Chelmsford, UK.

## Список литературы

- [1] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [2] Ельчанинов А.С., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Загулов Ф.Я. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 5. С. 1005–1007.
- [3] Беломятцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 97–101.
- [4] Вуков Н.М., Губанов В.Р., Гунин А.В. et al. "Development of Long Lifetime Cold Cathode" in Proc. 10th Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, 1995. P. 71–74.
- [5] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д. и др. Сильноточные импульсно-периодические ускорители электронов для генерации СВЧ-излучения. В кн. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1981. ИПФ АН. С. 5–21.
- [6] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 10. С. 43–47.
- [7] Коваль Б.А., Проскуровский Д.И., Трегубов В.Ф., Янкелевич Е.Б. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 10. С. 603–605.
- [8] Коваль Б.А., Проскуровский Д.И., Янкелевич Е.Б. О материалах эмиттеров долговечных холодноэмиссионных катодов. 3 Всес. симп. по сильн. имп. электронике. Тез. докл., Томск. 1978. С. 19–20.
- [9] Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. № 8. С. 494–507.
- [10] Kimblin C.W. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 7. P. 3074–3081.
- [11] Daalder J.E. "Cathode spots in the vacuum arcs", Physica, 104C. 1981. P. 91–106.
- [12] Проскуровский Д.И., Янкелевич Е.Б. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 1. С. 132–137.