

11

## Регенерация графитового взрывоэмиссионного катода при больших частотах повторения наносекундных ускоряющих импульсов

© С.Д. Коровин, С.К. Любутин, Е.А. Литвинов,  
Г.А. Месяц, А.М. Мурзакаев, В.В. Ростов, С.Н. Рукин,  
Б.Г. Словицкий, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов,  
В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: korovin@hcei.tsc.ru

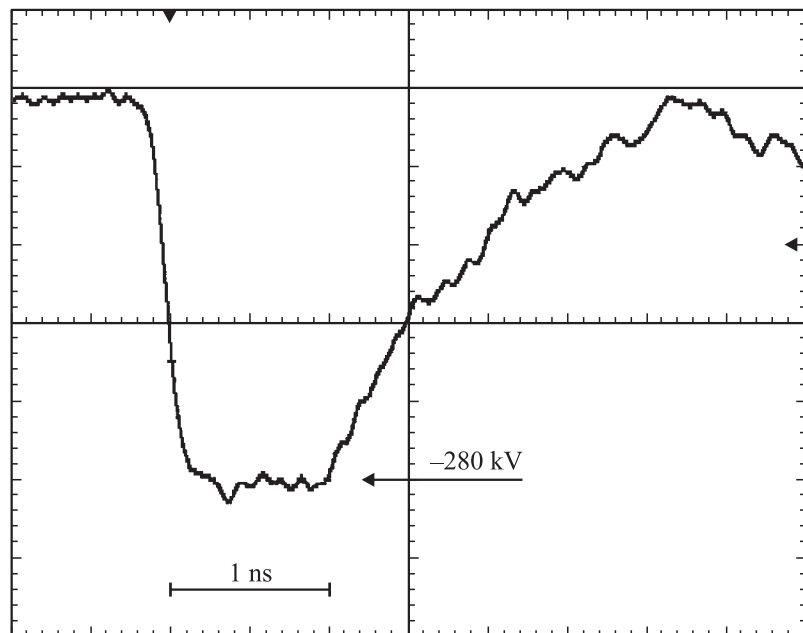
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 8 февраля 2005 г.

Экспериментально изучена возможность увеличения времени жизни взрывоэмиссионных графитовых катодов при высоких частотах повторения наносекундных импульсов в диапазоне единиц кГц. На основе анализа микрофотографий катода после тренировки, фотоснимков в рабочем режиме и изучения фракционного состава уносимого материала показана существенная роль нагрева отдельных зон эмиссионной кромки до температур плавления графита.

В работе [1] нами описаны изменения характеристик взрывоэмиссионного трубчатого графитового катода в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией (КДМИ) при воздействии ускоряющих импульсов (рис. 1) с длительностью на полувывоте  $\sim 1.5$  ns и амплитудой  $\sim 280$  kV, следовавших с частотами повторения  $1 \div 3.5$  kHz. При тренировке катода на частотах повторения импульсов  $F \leq 1$  kHz была обнаружена деградация эмиссионных характеристик, а последующий переход к  $F = 3.5$  kHz обусловил их восстановление. В последнем случае на микрофотографиях кромки катода отмечена гомогенизация поверхности, характерная для плавления. Оценки температурного режима области



**Рис. 1.** Типичный импульс ускоряющего напряжения с длительностью на полувысоте 1.5 ns, фронтом  $\sim 200$  ps и амплитудой на катоде  $-280$  kV. Регистратор — осциллограф Tektronix TDS6604 (6 GHz; 20 Gs/s).

отдельного центра взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) показали, что для периода следования  $\tau > 1$  ms за время между импульсами происходит охлаждение зоны эмиссии до 300 K, в то время как при  $\tau \approx 300 \mu\text{s}$  ( $F \approx 3$  kHz) имеет место ее остаточный нагрев до  $\sim 800 \div 900$  K [1]. На основании этих данных и расчетов было высказано предположение о существовании частотной границы эффекта полировки микрорельефа поверхности катода, явно выраженного в случае одиночных импульсов и малых частот повторения [2].

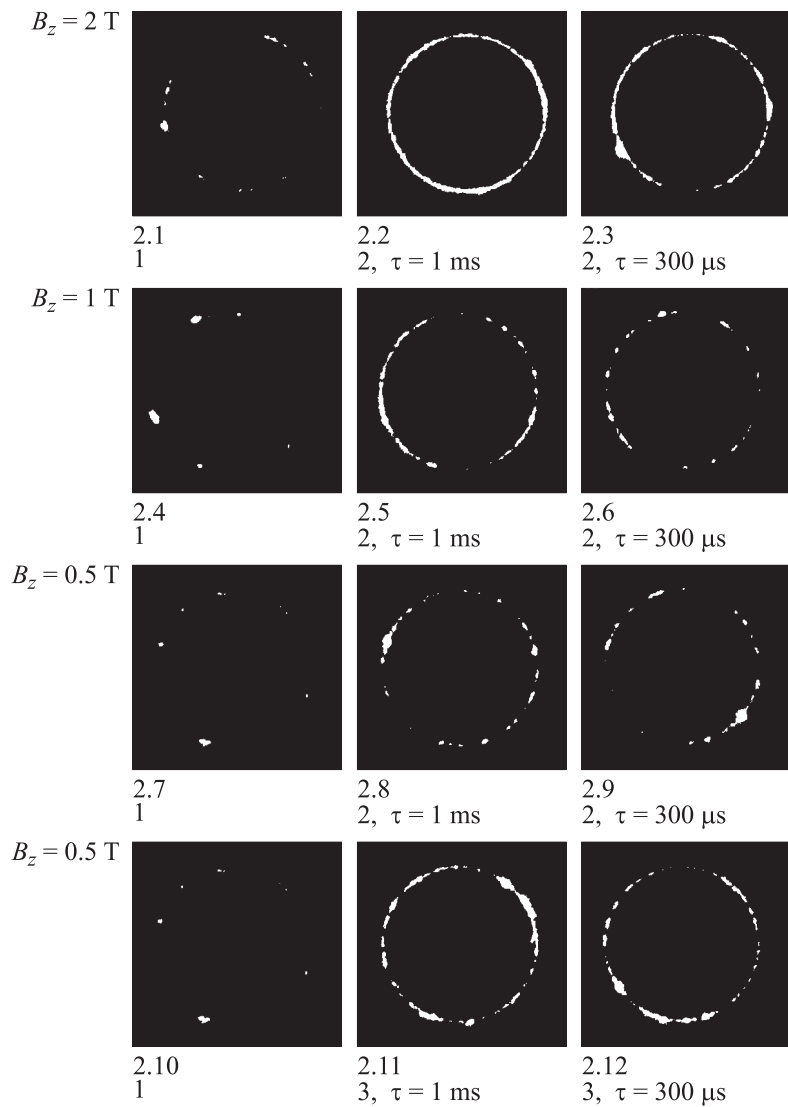
Цель настоящей работы состояла в постановке экспериментов для изучения механизма регенерации эмиссии катода, который, по-видимому, можно объяснить существенным вкладом термоэлектронной эмиссии в инициирование ВЭЭ за счет остаточного тепла в областях,

не успевших остыть в промежутке между импульсами. Так как эта гипотеза связана с нарастающим разогревом и вероятным плавлением графита, в эксперименте ставилась задача обнаружить возможную пространственную привязку зон ВЭЭ, а в продуктах распыления катодного материала — наличие оплавленных микрочастиц графита.

С учетом эффекта экранировки поверхности катода полем пространственного заряда электронов, эмитированных центрами-лидерами [3], и согласно оценкам в работе [1], количество эмиссионных зон на кромке катода в зависимости от напряженности магнитного поля может находиться в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков. Поэтому пространственная привязка зон ВЭЭ в режиме  $F \approx 3$  kHz в отличие от случая  $F \approx 1$  kHz должна подтверждаться фотографированием кромки работающего катода открытым затвором в режиме накопления равного количества импульсов. Эксперименты проводились на установке, использовавшейся в предыдущих исследованиях [1] при тех же параметрах ускоряющего импульса (рис. 1) и токе пучка  $\sim 2$  кА. Трубчатый катод был изготовлен из графита МПГ-6, имел диаметр 8.6 mm и радиальный размер эмитирующей кромки  $\sim 150$   $\mu$ m. Вакуум в КДМИ поддерживался на уровне  $10^{-4}$  Торр. Перед фотографированием катод предварительно тренировался пакетами импульсов на частотах повторения  $100 \div 3000$  Hz с суммарным количеством  $\sim 2300$  включений. Согласно данным работы [4], этой тренировки достаточно для очистки приповерхностных слоев катода от адсорбционных молекул газа и загрязнений, остающихся после изготовления.

Фотосъемка эмиссионной кромки катода выполнялась при длительностях интервалов между импульсами  $\tau = 1$  ms и  $\tau = 300$   $\mu$ s и количестве включений  $N_p = 1; 2$  или  $3$  (рис. 2). Дальнейшее увеличение  $N_p$  при фотосъемке без специальных светофильтров приводило к чрезмерной фоновой подсветке, переэкспонированию фотоматериала и затрудняло сравнительный анализ изображений. Фокусирующее магнитное поле КДМИ варьировалось в пределах  $0.5 \div 2$  Т. Обработка негативов производилась методом просвечивающего сканирования. Для всех кадров использовался идентичный режим увеличения контрастности изображения, позволяющий выделить яркие области катодных факелов и сравнивать их количество.

Рассматривая на рис. 2 последовательности снимков ( $2.7 \rightarrow 2.4 \rightarrow 2.1$ ); ( $2.8 \rightarrow 2.5 \rightarrow 2.2$ ) и ( $2.9 \rightarrow 2.6 \rightarrow 2.3$ ), видим, что увеличение

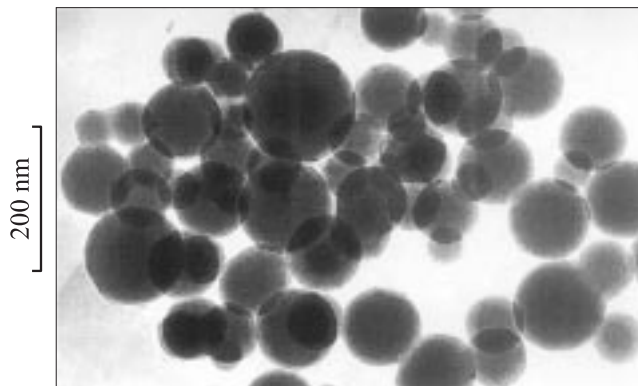


**Рис. 2.** Фотографии эмиссионной кромки трубчатого графитового катода с диаметром 8.6 мм, выполненные открытым затвором при различных значениях магнитного поля, количества импульсов и интервалов между ними.

магнитного поля приводит к росту количества эмиссионных центров в соответствии с эффектом экранировки. Сравнение пар снимков (2.2 → 2.3); (2.5 → 2.6); (2.8 → 2.9) и (2.11 → 2.12) показывает, что при любом значении магнитного поля имеет место уменьшение количества центров ВЭЭ при равном количестве импульсов (2 или 3) со снижением периода их следования от 1 ms до 330 μs. Важно, что в случае  $\tau = 300 \mu\text{s}$  количество регистрируемых плазменных факелов для двух или трех импульсов оказывается больше, чем при  $N_p = 1$ , т.е. полной привязки новых эмиссионных центров к зонам существования предыдущих на первых импульсах пакета не происходит. Этот факт объясним, поскольку при  $\tau \approx 300 \mu\text{s}$  в моменты подачи нескольких первых импульсов даже в случае привязки центров ВЭЭ область предыдущего эмиттера должна иметь температуру  $\sim 1000 \div 2000 \text{ K}$  [1]. Несмотря на то что такой нагрев уже выделяет данную область на фоне окружающего холодного графита, конкурирующие автоэмиссионные процессы на „свежих“ микронеоднородностях катода могут проявляться параллельно и частично маскировать эффект „термоэмиссионной“ привязки центров ВЭЭ.

Более наглядное проявление эффекта привязки возможно в случаях, которые связаны с увеличением остаточной температуры зон ВЭЭ. Поскольку частота повторения импульсов была ограничена, можно полагать, что при значении  $F \approx 3 \text{ kHz}$  привязка должна быть выраженной после относительно большого количества импульсов в пакете. Так, согласно оценкам в работе [1], уже при  $N_p \approx 10$  температура зоны привязки центра ВЭЭ может достигать  $\sim 4500 \text{ K}$ , когда создаются условия для плавления графита в соответствии с его фазовой диаграммой состояния [5]. При этом в продуктах уносимого катодного материала должна быть заведомо представлена капельная фракция графита, существование которой обнаружено ранее [6] в режиме редко повторяющихся наносекундных импульсов, прикладываемых к игольчатому графитовому катоду.

В настоящем эксперименте в продуктах распыления, собранных из промежутка между катодом и коллектором, при электронно-микроскопическом исследовании действительно обнаружена фракция сферических капель диаметром  $30 \div 200 \text{ nm}$  (рис. 3), кластеров из таких наночастиц и осколков субмикронного размера. Их графитовый состав был подтвержден соответствующими электронограммами. Происхождение субмикронных осколков, скорее всего, связано с термомеханиче-



**Рис. 3.** Микрофотографии графитовых наночастиц — оплавленных капель.

ским разрушением коллектора электронов, также изготовленного из графита. Оценки показывают, что в коротких пакетах при частоте повторения 3 kHz имеет место адиабатический нагрев зоны осаждения на коллектор трубчатого пучка с максимальной энергией электронов  $\sim 300$  keV, плотностью тока более  $10^4$  A/cm<sup>2</sup> и энергией в импульсе  $\sim 1$  J. В принципе, возможен нагрев кольцевой зоны коллектора до температуры плавления, однако это требует на порядок больше импульсов, чем для получения такой же температуры в микроразонах привязки центров ВЭЭ на катоде, где, кроме прочего, в момент инжекции развиваются наибольшие давления [6].

Таким образом, есть основания полагать экспериментально доказанным факт существования частотной границы эффекта полировки взрывоэмиссионного графитового катода. С учетом предыдущих результатов по тренировке катодов показана возможность преодоления деградации эмиссионных свойств при малой длительности ускоряющих импульсов за счет их высокой частоты повторения.

Авторы признательны Д.И. Проскуровскому за внимание к работе и полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 04-02-16576-а.

## Список литературы

- [1] *Коровин С.Д., Литвинов Е.А., Месяц Г.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [2] *Juttner B., Putschkarjov V.F., Rohrbech W.* // Proc. of VII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Novosibirsk, 1976. P. 189–192.
- [3] *Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 18. С. 1089–1092.
- [4] *Гунин А.В., Коровин С.Д., Ландль В.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 22. С. 84–94.
- [5] *Vundy F.P., Wentorf R.H.* // Nature. 1955. V. 176. N 4471. P. 51–55.
- [6] *Коваль Б.А., Проскуровский Д.И., Трегубов В.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 1079. Т. 5. В. 10. С. 603–607.