

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

13-88-292

**С.А.Коренев, А.М.Баранов, С.В.Костюченко,
Н.М.Черненко**

**КАТОД СО ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИЕЙ
НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА**

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1988

Введение

Среди плазменных катодов, применяемых в импульсных источниках электронов, наибольшее распространение получили катоды со взрывной эмиссией электронов^{/1/}. Взрывоэмиссионные катоды состоят из двух основных элементов: переходника и инициатора катодной плазмы. Первый элемент предназначен для электрического соединения с катодной ножкой источника электронов, второй - для формирования катодной плазмы. В качестве инициатора катодной плазмы используются многоострижные структуры^{/2/}, такие, как: углеродно-волоконистая структура^{/3/}, ниобий-титановая нитевидная структура сверхпроводящих кабелей типа НТ-50^{/4/} и др.^{/5, 6/}.

Углеродно-волоконистый инициатор катодной плазмы наиболее полно отвечает предъявляемым противоречивым требованиям. Он обладает стойкостью к ионной бомбардировке, имеет минимальное время задержки тока пучка относительно напряжения и др. Основное его достоинство - высокий геометрический коэффициент усиления электрического поля на волокнах. Однако технологические трудности получения ровной торцевой поверхности приводят к проявлению эффекта экранировки электрического поля в районе перичного катодного факела, в результате чего появляются осцилляции тока на импульсе тока пучка электронов^{/5/}, повышается поперечная неоднородность плотности тока пучка.

В данной работе рассматривается технология изготовления катода со взрывной эмиссией из углепластика, приводятся результаты измерений его основных характеристик.

Методика изготовления катода

Методика изготовления катода из волоконистого углепластика включает следующие технологические операции:

- 1) приготовление заготовки;
- 2) термообработка заготовки;

- 3) механическая обработка заготовки;
- 4) частичная карбонизация.

Приготовление заготовки начинается с изготовления препрега методом пропитки углеродной ткани раствором фенол-формальдегидной смолы на пропиточной машине. Затем производится выкладка препрега с армированием по основе ткани с последующим прессованием при давлении ~ 10 атм.

Термическая обработка спрессованной заготовки производится при температуре 200°C в течение 2,5–3 часов в специальной печи.

Механическая обработка заготовки необходима для придания ей необходимой формы и геометрии катода. Эта операция осуществляется на токарном или фрезерном станке. После термической обработки заготовка обладает прочностью, достаточной для качественной механической обработки. При этом торцевая поверхность катода, на которой формируется катодная плазма, может обрабатываться с высокой степенью чистоты обработки.

Частичная карбонизация является последней операцией, при которой органическая связка (фенол-формальдегидная смола) по специальному термическому режиму превращается в углерод.

После выполнения всех указанных выше операций катод на основе волокнистого углепластика пригоден для исследования в источниках электронов.

Электрические характеристики катода

На основе предложенной в работе методики было изготовлено несколько катодов с различной геометрией (рис. 1) с 40% степенью карбонизации органической матрицы из фенол-формальдегидной смолы. Диаметр углеродных волокон 5–8 мкм, а диаметр микрофибрил $\sim 10^{-2}$ мкм. Продольное электрическое сопротивление (вдоль волокон) $\sim 0,1$ Ом-см

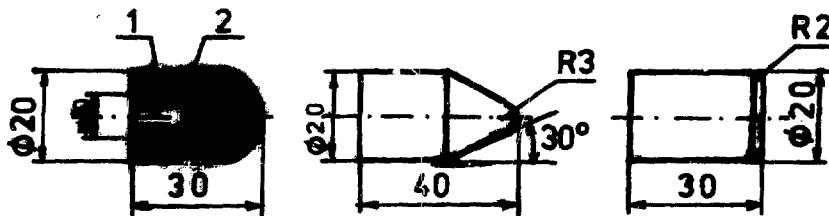


Рис. 1. Катод из волокнистого углепластика: 1 – углеродные волокна; 2 – органическая матрица.

Измерение характеристик катодов проводилось на экспериментальном стенде^{17/}, который состоит из генератора импульсного напряжения и вакуумного диода. Катод изготовлен по предложенной выше методике. Анод представлял из себя сетку с ячейкой $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ из нержавеющей стали. Давление остаточного газа в вакуумной камере диода составляло $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$. Для измерения эмиссионных характеристик использовался генератор Аркадьева-Маркса типа ГИИ-500, а для пороговых напряжений зажигания катодной плазмы - генератор на кабельной формирующей линии^{18/}. Для измерения тока применялся цилиндр Фарадея и интегрирующий пояс Роговского, для исследования микроструктуры - коллектор с отверстием диаметром от 0,1 до 4 мм и токоприемник с шунтом тока. Регистрация момента формирования (зажигания) катодной плазмы осуществлялась на широкополосном осциллографе при помощи шунта полного тока и фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ-87. На рис. 2 приведена зависимость напряжений зажигания катодной плазмы U от расстояния между анодом и катодом (зависимость I) при давлении остаточного газа $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$. Из нее видно, что при $D \geq 15 \text{ мм}$ наблюдается нелинейный характер зависимости для данных катодов. Известно, что средняя пороговая напряженность электрического поля $E_{пор}$ для формирования однородной катодной плазмы должна удовлетворять условию^{19/}:

$$E_{пор} = \frac{KU}{D} \geq (300 \div 400) \text{ кВ/см}, \quad (I)$$

где: K - коэффициент усиления электрического поля инициаторов катодной плазмы;

U - напряжение на диоде;

• D - расстояние между анодом и катодом.

Анализируя кривую I (рис. 2), можно предполагать, что в линейной области K является величиной постоянной, составляет ~ 100 и определяется геометрией структуры углеродных волокон. Затем, начиная с $D > 15 \text{ мм}$, значение K уменьшается и является величиной переменной. С увеличением D темп роста K падает. Это, по всей видимости, связано с наличием неполностью карбонизованной органической матрицы (связки), у которой диэлектрическая проницаемость $\epsilon \sim 6 \div 8$. Наличие диэлектрических вclusions приводит к усилению электрического поля на поверхности катода^{10/} и к нелинейности K в зависимости от D .

Интересно совместить с указанной зависимостью (кривая I, рис. 2) на этом же рисунке зависимость уровня токовых осцилляций $\Delta I/I$ при диаметре щели $\phi = 0,2 \text{ мм}$, кривая 2 (рис. 2). На рис. 3 представлена схема токовых измерений. Серия осциллограмм тока, измеренного за щель разного диаметра, приведена на рис. 4 для предложенного в данной

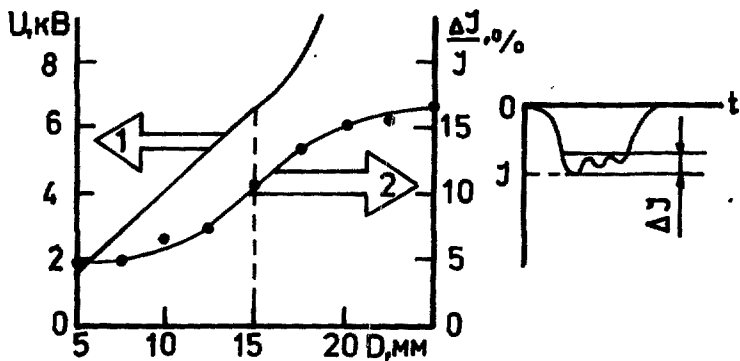


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания катодной плазмы от расстояния между анодом и катодом D (кривая 1) и зависимость уровня токовых осцилляций $\Delta J/J$ от D (кривая 2).

работе катода (а) и для катода из углеродной ткани, свернутой в рулон^{5/б} при напряжении на диоде $U = 10$ кВ, расстоянии между анодом и катодом $D = 10$ мм. На другом рисунке (рис. 5 а, б, в, г) приведены серии таких же осциллограмм тока для этих двух катодов (5 а, б), для графитового катода с металлической сеткой^{II/} (5в) и металлического катода (5г) при напряжении на диоде 150 кВ и расстоянии между анодом и катодом 10 мм.

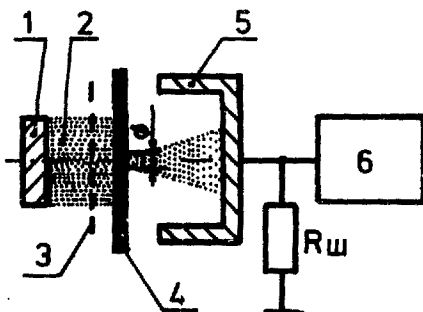


Рис. 3. Схема измерения токовых характеристик:
 1 - катод; 2 - анод;
 3 - пучок электронов;
 4 - коллиматор с отверстием ϕ (со щелью);
 5 - коллектор с шунтом тока;
 6 - осциллограф.

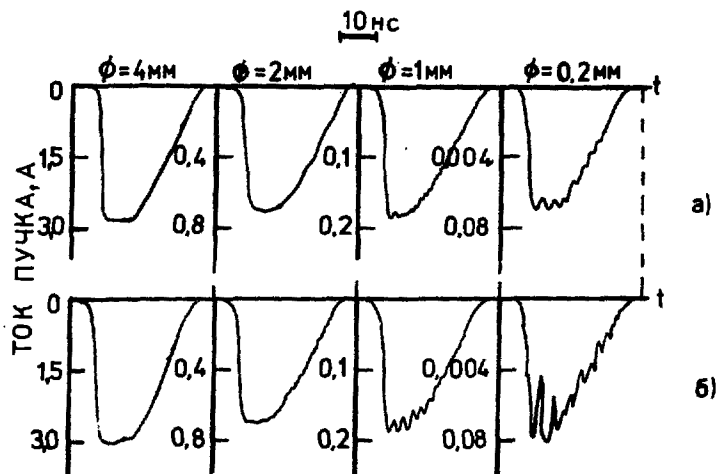


Рис. 4. Серия осциллограмм тока пучка электронов за коллиматором при разных значениях диаметра щели ϕ при $D = 10$ мм и напряжении на диоде 10 кВ:
 а) катод из волокнистого углепластика;
 б) катод из углеродной ткани, свернутой в рулон.

Для понимания объяснения физических процессов в катодной плазме напомним, что углеродное волокно диаметром $5+10$ мкм состоит из тысяч фибрилл, см. рис. 6. Углеродным волокнам присуща особо высокая прочность ($\sigma \sim 2000$ МПа)^{/12/}, которая объясняется совершенством структуры (малой плотностью дислокаций) из-за очень маленького размера микрофибрилл ~ 20 нм. Напомним также, что кристаллическая решетка графита является гексагональной и в ней в плоскости основания действуют сильные ковалентные силы, а между основаниями - слабые силы Ван-дер-Ваальса. Кроме того, графит характеризуется высоким коэффициентом газовыделений.

Таким образом при подаче на катод импульса напряжения на остриях формируется катодная плазма и вследствие эффекта регенерации катодных факелов^{/13/} наблюдается цикличность катодных процессов. Цикличность катодных процессов объясняется возникновением эмиссионного центра, его гибелью и появлением нового эмиссионного центра. В той же работе^{/13/} высказывается предположение о том, что причина взрыва эмиссионного центра, по-видимому, находится в процессе взаимодействия плазмы катодного факела с жидким металлом. Действительно, осцилляции тока пучка с металлического катода при его коллимации, по всей

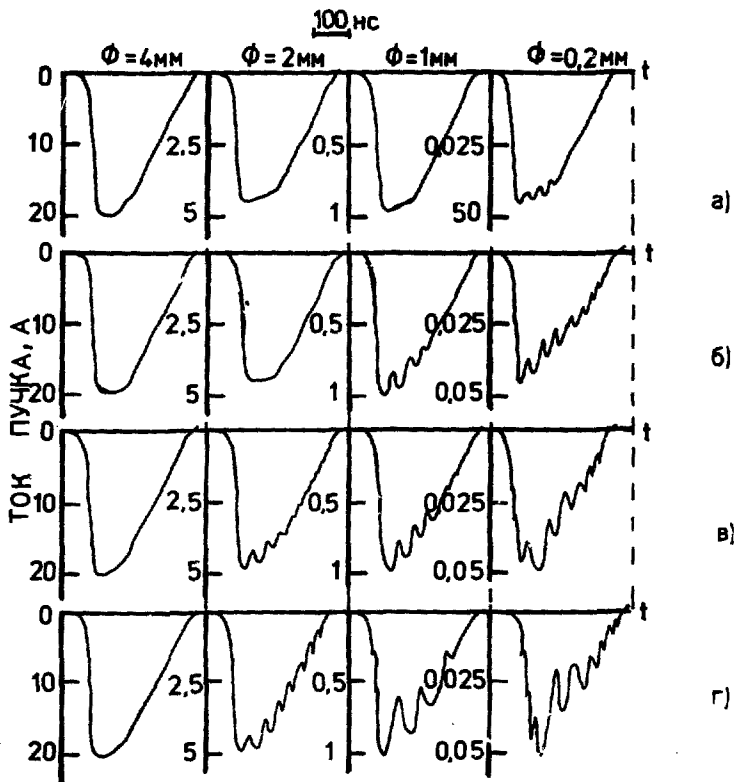


Рис. 5. Серия осциллограмм тока пучка электронов за коллиматором при разных значениях диаметра щели ϕ при напряжении на диоде 150 кВ, $D = 10$ мм:
 а) катод из волокнистого углеродистика; б) катод из углеродной ткани, свернутой в рулон; в) графитовый катод с металлической сеткой; г) металлический катод.

видности, на этой модели можно объяснить. Осцилляции тока на графитовом катоде с металлической сеткой определены, как показывает эксперимент, ячейкой металлической сетки, и также могут быть объяснены указанным выше механизмом. Другое дело возникает, когда мы рассматриваем углеродно-волокнистый катод. В этом случае сказывается высокая прочность углеродных волокон и его фибрилы в продольном направлении //12/

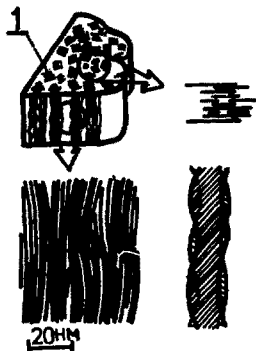


Рис. 6. Структура углеродного волокна.
1 - фибриллы.

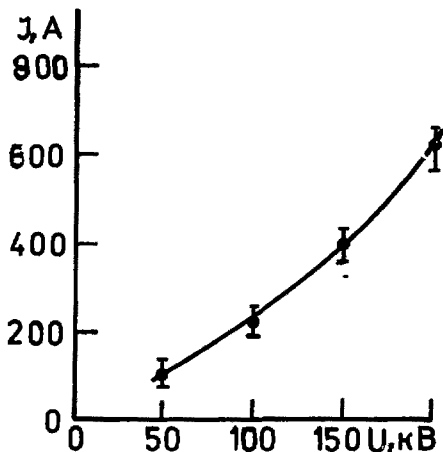


Рис. 7. Вольтамперная характеристика диода с катодом из волокнистого углепластика; расстояние между анодом и катодом 1 см, диаметр катода 2 см.

В результате этого не наблюдается механического разрушения волокон и микрофибрилл поддействующими силами при подаче на диод импульса напряжения. Кроме того, температурные режимы волокнистых углеродных инициаторов катодной плазмы более устойчивы по отношению к этим режимам у металлических острых инициаторов. В совокупности это позволяет, по всей видимости, предполагать, что катод из углеродного волокна наиболее стабилен по токоотбору в режиме варьивной эмиссии электронов.

Те осцилляции тока, которые появляются для углеродно-волокнистого катода, изготовленного по разработанной технологии, объясняются наличием органической матрицы.

Проведенные эксперименты показали, что углеродно-волокнистый катод обладает стабильным токоотбором при относительно низких напряжениях на диоде ~ 10 кВ.

Вольтамперная характеристика диода с данным катодом приведена на рис. 7. Из нее видно, что величина токоотбора соответствует закону Чайльда-Ленгмюра.

Заключение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана технология изготовления катода со взрывной эмиссией электронов на основе волокнистого углепластика, которая позволяет изготавливать катоды любой геометрической формы.
2. Измерены основные эмиссионные характеристики катода; при этом величина токоотбора соответствует закону Чайльда-Лангмюра.
3. Экспериментально показано, что катод из волокнистого углепластика, изготовленный на основе разработанной нами технологии, позволяет осуществлять более устойчивый режим токоотбора пучка электронов по сравнению с другими катодами: металлическими, графитовым с металлической сеткой, углеродно-волокнистым катодом из углеродной ткани, свернутой в рулон.

Литература

1. Месяц Г.А., Пучкарев В.Ф. Наука в СССР, 1987, № 2, с. 48.
2. Бугаев С.П., Крейнцель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого поперечного сечения. М., Энергоатомиздат, 1986.
3. Корнев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. ПТЭ, 1985, № 5, с. 190.
4. Вавра И., Корнев С.А. Препринт ОИЯИ 77-87-751, Дубна, 1987.
5. Корнев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. В сб. тезисов докладов V Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Изд-во ИСЭ СО АН СССР, Томск, 1984, ч. I, с. 45.
6. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. Сов. Радио, М., 1974.
7. Корнев С.А. Сообщение ОИЯИ № 9-81-703, Дубна, 1981.
8. Ishii M., Yamada H. Rev. Sci. Instrum., 1985, v. 56, N 11, p. 2116.
9. Смирнов В.П. ПТЭ, 1977, № 2, с. 7.
10. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. УФН, 1983, т. 139, № 2, с. 265.
11. Корнев С.А. ПТЭ, № 6, 1983, с. 190.
12. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. М., Машиностроение, 1986.
13. Месяц Г.А. Листья в ЖЭТФ, 1983, т. 9, в. 14, с. 891.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 апреля 1988 года.

Коренев С.А. и др.
Катод со взрывной эмиссией на основе
волоконистого углепластика

13-88-292

Описывается разработанная нами технология изготовления катодов со взрывной эмиссией электронов на основе волоконистого углепластика практически любой геометрической формы и размеров. Приведены экспериментальные исследования токоотбора пучка электронов с катодов диаметром 2 см при напряжении на диоде $u \sim 10$ кВ и $i \sim 150 \pm 250$ кВ. Показано, что напряжение зажигания катодной плазмы составляет ~ 2 кВ при межэлектродном зазоре диода 5 мм и давлении остаточного газа $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Тор. Показано, что углеродно-волоконистый катод, изготовленный по этой технологии, позволяет осуществлять более устойчивый токоотбор пучка электронов /без осцилляций/ по сравнению с другими катодами.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Korenev S.A. et al.
The Exploding Cathode on the Base
of Carbon-Fibrous Plastic Material

13-88-292

Production process of exploding cathodes on the base of carbon-fibrous plastic material of any geometric form and size is discussed. Experiment researches of current take-off from cathodes with diameter 2 cm of 10 kV and 150 ± 250 kV voltage are given. It is shown that ignition voltage of cathode plasma is 2 kV with 5 mm gap electrode of diode and $5 \cdot 10^{-5}$ Tor pressure of residual gas. It is shown that carbon-fibrous cathode, made by this technology, provides more stable current take-off electron beam / without oscillations/ in comparison with other cathodes.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988

12 коп.

Редактор Б.Б.Колесова. **Макет** Т.Е.Попеко.

Подписано в печать 11.05.88.

Формат 60x90/16. **Офсетная печать.** **Уч.-изд.листов** 0,78.

Тираж 330. **Заказ** 40543.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Дубна Московской области.