

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

13-88-347

Г.Н.Акапьев, С.А.Коренев

**ВЗРЫВОМИССИОННЫЙ КАТОД,
ИЗГОТОВЛЕННЫЙ С ПОМОЩЬЮ
ТРЕКОВОЙ МЕТОДИКИ**

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

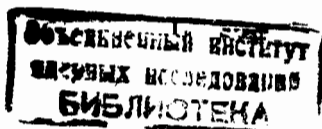
1988

В настоящее время электронные пучки широко используются в технике физического эксперимента, в поисковых работах по управляемому термоядерному синтезу, в физике твёрдого тела, физике плазмы газового разряда, ускорительной технике и др. Для генерации электронных пучков используются физические явления автоэлектронной и взрывной эмиссии^{/1/}. В этом направлении работ достигнут определённый прогресс, особенно в области многоострижных эмиттеров электронов. Технологические трудности изготовления больших по площади многоострижных структур ограничивают их широкое применение в физике плазмы (накачка лазеров), в промышленной технологии (поверхностное упрочнение, обработка различных материалов и др.). Одним из известных технических решений является создание углеродных волокнистых эмиттеров^{/2/}. Однако при создании эмитирующей поверхности с повышенной однородностью углеродно-волокнистого эмиттера возникает ряд технических проблем. Особенно они проявляются при разработке источников электронов для технологических применений, например, для поверхностной обработки материалов. Такие источники должны быть легко перестраиваемыми по своим параметрам. Исходя из этого, к катоду (эмиттеру) предъявляются особые требования, которые заключаются в необходимости создания многоострижной структуры с равномерным коэффициентом усиления электрического поля с одной стороны, и с другой - создания самих эмиттеров с минимальным радиусом закругления при вершине острия. Кроме того, необходимо существенно увеличить площадь эмиттера, для того чтобы сформировать электронный пучок большого сечения. Обобщая требования, можно сформулировать следующую задачу: необходимо разработать методику изготовления многоострижных структур большой площади с равномерным распределением остриев-эмиттеров и высоким геометрическим коэффициентом усиления электрического поля.

Данная работа посвящена разработке технологии изготовления многоострижных катодов с помощью трековой методики и измерению их эмиссионных характеристик.

Изготовление металлических острижных эмиттеров

В основу метода положено явление образования в микроструктуре диэлектриков локальных микрозон радиационного повреждения (треков) при прохождении через материал сильно ионизирующих ядерных частиц. Для выявления треков поверхность диэлектрика подвергается химической обработке в соответствующем травителе, который быстро растворяет материал в треке. Возникающие на месте треков углубления постепенно увеличиваются за счёт медленного травления окружающей трек матрицы. Геомет-



рическая форма и размеры вытравленных треков могут варьироваться в широких пределах (от $5 \cdot 10^{-3}$ мкм до десятков мкм) соответствующим выбором условий травления, материала диэлектрика, типа и энергии частиц, создающих треки. Затем протравленная поверхность диэлектрика покрывается металлом (метод реплик ^{/3/}). Условия нанесения металлического слоя выбираются таким образом, чтобы металл полностью заполнял объём вытравленных треков. После этого реплика отделяется от поверхности диэлектрика. Полученная таким образом металлическая фольга имеет поверхность (обращённую к диэлектрику), на которой имеются выступы, идентичные по форме и размерам вытравленным на поверхности диэлектрика трекам. Поверхность фольги просматривается для контроля на сканирующем электронном микроскопе.

Подробно технология изготовления металлических фольг с многоострийной структурой поверхности изложена ниже.

Облучение

Плётка из полиэтилентерефталата (лавсана) толщиной 10 мкм облучалась ионами аргона с энергией $E=2$ Мэв/нуклон на ускорителе У-300 ЛЯР ОИЯИ. Угол входа ионов в плётку составлял 90° . Длина образующихся треков $\ll 10$ мкм. В принципе, возможности ускорителя позволяют получать треки длиной до 100 мкм за счёт большей энергии ионов. Плотность треков на поверхности плётки варьировалась в пределах от 10^5 до 10^8 треков/см².

Химическое травление

Лавсановая плётка с облучённой стороны травилась в водно-спиртовом насыщенном растворе едкого натра. Содержание этилового спирта - 50%, время травления - 2 часа, температура - 20°C .

Нанесение электропроводящего слоя

Протравленная сторона лавсановой плётки запылялась слоем меди путем термического распыления в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Тор. Толщина напылённого слоя меди составляла около 0,1 мкм. Температура поверхности лавсана при напылении не превышала 50°C .

Электролитическое нанесение металлической реплики

Для заполнения объёма вытравленных треков металлом и получения фольги с практически неограниченной толщиной применялся метод электро-

литического осаждения. Он позволяет формировать металлические слои с заранее заданными свойствами, а именно микровёрдостью, пластичностью, внутренним напряжением и др. ^{/4,5/}.

Нами использовалось электролитическое меднение из водного сернокислого электролита: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (200 г/л), H_2SO_4 (50 г/л), NaCl (120 мг/л), ПАВ (1,6 мл/л). Присутствие поверхностно-активной добавки (ПАВ) позволяет формировать электролитически осаждённый слой меди практически с нулевой величиной внутреннего напряжения и мелкокристаллической структурой. Выбранный нами состав электролита обладает высокой микровыравнивающей способностью, благодаря которой достигается полное заполнение осаждаемым металлом микроуглублений в покрываемой поверхности ^{/6,7/}. Электролиз проводился при комнатной температуре ($t=20^\circ\text{C}$) в гальваностатическом режиме при плотности катодного тока $j=4$ А/дм². Скорость роста слоя меди составляла 1 мкм/мин при 100%-ном выходе по току.

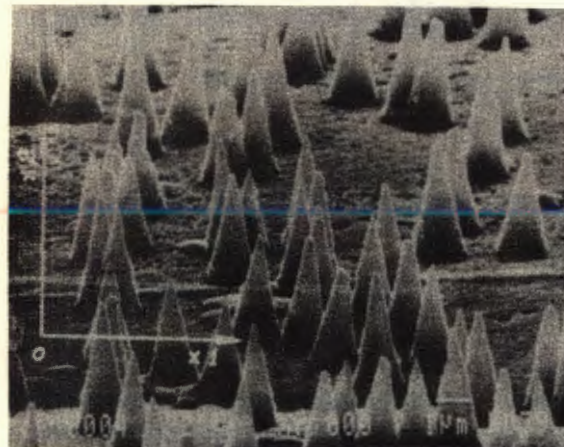


Рис.1. Электронная микрофотография медной реплики с многоострийной поверхностью. Плотность острий $N=10^7$ остр/см². Форма острий - ортогональные конусы высотой $h=6,6$ мкм, диаметром при основании $d=1,5$ мкм, средним радиусом кривизны вершины $r=0,1$ мкм и углом раствора конуса $\theta=12^\circ$.

По завершении электролиза медная реплика отделялась от лавсана погружением в 6N-водный раствор едкого натра (время выдержки 1+3 мин при температуре 50°C).

На рис.1 приведена электронная микрофотография медной реплики с многоострийной поверхностью. Полученная описанным способом металлическая фольга использовалась в качестве катода-эмиттера.

Схема измерения эмиссионных характеристик катода

Измерение эмиссионных характеристик катода проводилось по схеме ^{/8/}, состоящей из генератора импульсного напряжения, электрон-

ной пушки с исследуемым катодом и диагностической аппаратуры (рис.2). Для питания электронной пушки использовался генератор Аркадьева-Маркса с амплитудой напряжения 100÷300 кВ и длительностью импульса $\tau=300$ нс.

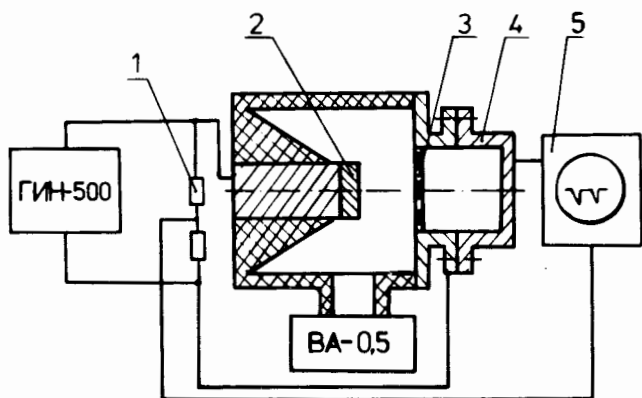


Рис.2. Схема измерения эмиссионных характеристик катода: ГИИ - генератор импульсного напряжения, 1 - высоковольтный делитель напряжения, 2 - катод, 3 - анод, 4 - измеритель тока пучка, 5 - осциллограф, ВА-0,5 - вакуумный агрегат.

Электронная пушка включает в себя исследуемый катод, проходной высоковольтный изолятор и анод. Анодом служила сетка из нержавеющей стали с коэффициентом прозрачности $P=0,7$. Давление остаточного газа в электронной пушке поддерживалось на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ Тор.

Для измерения тока пучка электронов использовался цилиндр Фарадея с малоиндуктивными шунтами и интегрирующий пояс Роговского, а для регистрации импульсов тока и напряжения - широкополосные осциллографы типа И2-7 и С1-108.

Результаты измерений

Особый интерес представляют исследования плёночного многоострийного катода, изготовленного на основе трековой методики, в режиме взрывной эмиссии. Если сравнить морфологию поверхности плоского катода с данным катодом, то становится очевидным тот факт, что распреде-

ление острий выглядит более регулярным, чем распределение микроненородностей по поверхности плоского катода. Отсюда следует, что необходимо создать условия, чтобы не проявлялся эффект экранировки электрического поля в районе первичного катодного факела ^{/9/}. Другое преимущество рассматриваемого катода заключается в возможности создания большой по площади эмитирующей поверхности. Для формирования катодной плазмы взрывного типа необходимо выполнить условие ^{/10/}

$$E = KU/D > 300 \div 400 \text{ кВ/см}, \quad (1)$$

где E - напряжённость электрического поля на катоде,
 K - коэффициент усиления электрического поля, зависящий от конфигурации и размера острий,
 U - напряжение на диоде,
 D - расстояние анод-катод.

Для ансамбля острий, являющихся телами вращения, коэффициент усиления поля можно вычислить из выражения ^{/11/}

$$K = th(\pi h/a) / \pi r/a, \quad (2)$$

где h - высота острия,
 r - радиус вершины острия,
 a - расстояние между остриями.

В случае многоострийных структур, изготовленных на основе трековой методики, за величину параметра "а" можно взять среднее квадратичное расстояние $\langle a^2 \rangle^{1/2}$ между треками ($\langle a^2 \rangle = l/\pi N$). Если $\pi h/a > 2$, то $th(\pi h/a) \approx 1$ и тогда

$$K = a/\pi r. \quad (3)$$

Для многоострийного катода (см. рис.1) $K=8$. В этом случае при $U=100 \div 300$ кВ и $D=1$ см напряжённость электрического поля на катоде составляет $800 \div 2400$ кВ/см, что, в соответствии с требованием ф-лы (1), удовлетворяет условию формирования катодной плазмы взрывного типа. При длительности переднего фронта импульса напряжения 30 нс задержка тока пучка относительно напряжения должна составлять 10-15 нс.

На рис.3 для двух катодов приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода, построенные по осциллограммам тока пучка электронов и напряжения на диоде. Из них видно, что ВАХ диода подчиняется закону Чайлда-Ленгмюра, а параметр N практически не влияет на величину токоотбора пучка электронов при больших площадях потери. В то же время параметр N играет существенную роль в процессе формирования катодной

плазмы, влияя на её временные характеристики. Измерение времени

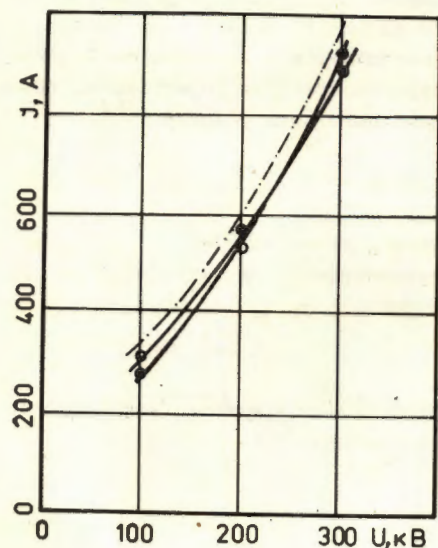


Рис.3. Вольт-амперные характеристики диода с катодами площадью $S=2 \text{ см}^2$, расстоянием анод-катод $D=0,7 \text{ см}$ и различной плотностью острий N :
 (•) - $N_1=10^7 \text{ остр/см}^2$,
 (○) - $N_2=1,5 \cdot 10^8 \text{ остр/см}^2$,
 (---) - расчёт по закону "3/2".

задержки пучка τ_3 относительно напряжения при $U=250 \text{ кВ}$ показывает, что при $N_2=1,5 \cdot 10^8 \text{ остр/см}^2$ τ_3 составляет $(15 \pm 3) \text{ нс}$, а при $N_1=10^7 \text{ остр/см}^2$ $\tau_3 = (28 \pm 5) \text{ нс}$ при одном и том же уровне тока пучка.

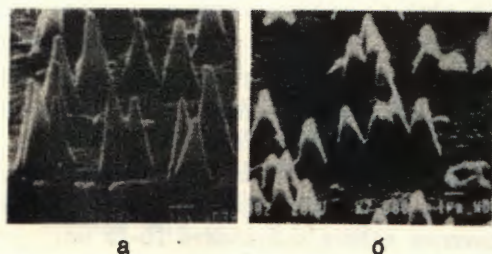


Рис.4. Электронные микрофотографии многоострийного катода с $N=10^7 \text{ остр/см}^2$:
 а - до включения,
 б - после 10^3 срабатываний.

Исследование интегрального свечения катодной плазмы указывает на отсутствие при формировании катодной плазмы ярко выраженных лидирующих факелов.

На рис.4а,б приведены микрофотографии поверхности катода до и после 10^3 срабатываний, из которых видно, что катод обладает значительным ресурсом работы, т.к. удельный унос вещества катода на единицу заряда весьма мал ($10^{-5} \div 10^{-4}$) г/Кл /II/.

Заключение

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Трековая методика позволяет создать многоострийные эмитирующие структуры, имеющие одинаковую форму и размеры острий, с неограниченной, в принципе, площадью поверхности. Эмитирующие структуры имеют равномерный коэффициент усиления электрического поля по поверхности.

В режиме взрывной эмиссии электронов регулярные острия-эмиттеры играют основную роль в формировании однородной катодной плазмы, а их количество не сказывается на величине токоотбора пучка электронов, который соответствует закону Чайлда-Ленгмюра.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н.Флёрову за активную поддержку и внимание к нашей работе, а также В.А.Щёголеву за полезные обсуждения и замечания, О.Л.Орелсвичу, В.А.Алтынову, И.Е.Ларионовой за просмотр образцов на электронном микроскопе, С.В.Костыченко и З.Д.Покровской за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов.Радио, 1974.
2. Корнев С.А. и др. - ПТЭ, 1985, № 5, с.190.
3. Флейшер Р.Л., Прайс П.П., Уокер Р.М. Методы исследования треков. М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Шалкаускас М. и др. Химическая металлизация пластмасс. М.: Химия, 1981.
5. Вячеславов П.М., Волянюк Г.А. Электролитическое формование. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1979.
6. Кругликов С.С., Коварский Н.Я. - Итоги науки и техники, сер. Электрохимия. М.: ВИНТИ, т.10, 1975, с.106.
7. Гинберг А.М. Повышение антикоррозийных свойств металлических покрытий. М.: Металлургия, 1984.
8. Корнев С.А. Сообщение ОИЯИ, 9-81-753, Дубна, 1981.

9. Месяц Г.А. и др. В сб.: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Томск: Изд-во ИСЭ СО АН СССР, 1980, с.54.
10. Смирнов В.П. - ПТЭ, 1977, № 2, с.7.
11. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 мая 1988 года.

Акапьев Г.Н., Коренев С.А. 13-88-347
Взрывоэмиссионный катод, изготовленный
с помощью трековой методики
Описан взрывоэмиссионный катод на основе тонких металлических фольг, имеющих равномерную игольчатую поверхность. Для его изготовления применялась трековая методика, с помощью которой можно получать катоды с неограниченной площадью с плотностью острий от $\sim 10^3$ 1/см² до $\sim 10^9$ 1/см². Электронная пушка с данным катодом имеет следующие параметры: I=200÷900 А, E=100÷300 кэВ. Электронный пучок по поперечному сечению достаточно однороден. Показано, что одинаковые по форме и размерам острия-эмиттеры играют основную роль в формировании однородной катодной плазмы.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод Л.В.Пашкевич

Akapiiev G.N., Korenev S.A. 13-88-347
An Explosive-Emitter Cathode Produced
Using the Heavy Ion Track Technique
A cathode based on thin metallic foils with a homogeneous needle surface is described. The cathode was manufactured using the heavy ion track technique which permits the production of cathodes with an unlimited area and a needle density ranging from about 10^3 to 10^9 needles per cm². An electron gun using this type of cathode has a current of 200-900 A and an energy of 100-300 keV. The cross section of the electron beam is fairly uniform. It is shown that needle emitters of similar shape and size play the principal role in forming a homogeneous cathode plasma.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division of High Energy Physics, JINR.
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988