

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАПЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ВЗРЫВОЭМИССИОННОГО КАТОДА

Ю.Е. Коляда, В.И. Федун, С.П. Десятский

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина

E-mail: kolyada@pstu.edu

Приведены результаты статистических исследований размеров микроскопических частиц вещества катода, возникающих при импульсном высоковольтном вакуумном разряде в режиме развития взрывной электронной эмиссии. Установлено, что их функция распределения с достаточной степенью точности описывается нормальным законом распределения, а их характерный размер оказывается порядка средней длины свободного пробега электронов Ферми в металле катода.

PACS: 52.50.Dg

Возникновение эктонов и развитие взрывной электронной эмиссии на поверхности холодного катода при импульсном высоковольтном вакуумном разряде приводит к появлению жидкого металла в виде струй и капель, паров и плазмы вещества катода. Эти факторы инициируют возникновение новых микровзрывов, что становится причиной непрерывного развития совокупности процессов: пробой – искра – дуга [1,2]. Однако роль указанных факторов в возникновении новых эмиссионных центров различна и до конца полностью не выяснена. Для точного установления физики этих процессов и явлений необходимо более детально знать параметры вещества, взаимодействующего с поверхностью катода: плотность, температуру и состав плазмы; размер и скорость микроскопических капель (частиц); механизм их появления и динамику движения. С этой точки зрения необходимо изучение как плазмы катодного факела, так и капельной фракции материала катода.

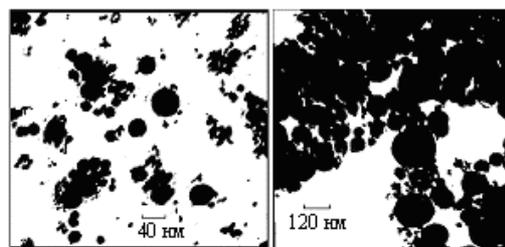
Следует отметить, что при переходе к микросекундным длительностям импульсов доля капельной фракции продуктов эрозии в катодной области может достигать 50...80% [3,4]. Поэтому в последнее время изучение капельной фракции при развитии электрического вакуумного разряда представляет повышенный интерес [5-7]. В частности, в [7] детально изучена функция распределения микрочастиц по скоростям, определены характерные скорости движения капель.

Не менее важным является вопрос изучения функции распределения микроскопических частиц по размерам и установление зависимости размеров микрочастиц от физических свойств материала катода. В частности, в [5] было высказано предположение о том, что характерный размер капель должен быть порядка длины свободного пробега электронов-ферми в металле катода. Изучению этих вопросов и экспериментальной проверке высказанного предположения посвящена данная работа.

Экспериментальные исследования капельной фракции проводились при работе сильноточного электронного ускорителя прямого действия с микросекундной длительностью импульса. Амплитуда высоковольтного импульса достигала  $10^6$  В, при этом ток пучка составлял несколько килоампер, длительность импульса по основанию – до 10 мкс. В каче-

стве холодного катода использовались материалы – Al, Cu, W, C. Длина ускоряющего промежутка составляла 20...30 см. Конструкция ускорителя и параметры полученного на нём мощного электронного пучка приведены в [8-9]. Для сбора и последующего анализа микроскопических частиц использовались стеклянные пластины размером 2×2 см, которые устанавливались в периферийной области диода. Экспозиция (сбор капель на одну пластину) осуществлялась за несколько десятков импульсов пучка. Их изучение проводилось при помощи электронного микроскопа «Tesla-613» с ускоряющим напряжением от 50 до 70 кВ. Разрешающая способность микроскопа позволяла получать четкое изображение частиц размером более 5 нм. Количество частиц всевозможных размеров на одной пластине составляло 200...300 штук.

На фотографиях Рис.1 с соответствующими масштабами представлены субмикронные фракции продуктов эрозии алюминиевого (а) и вольфрамового- (б) катодов. А в таблице 1 представлена выборка, как результат обработки фотоснимков капельной фракции катодов Al, Cu, W.



а б

Рис.1. Фотографии субмикронной фракции продуктов эрозии алюминиевого (а) и вольфрамового (б) катодов

При этом большой интерес представляет статистическая проверка вида распределения частиц по размерам. Полученные данные для Cu и W хорошо согласуются с гипотезой о нормальном распределении. Проверка соответствующей гипотезы с помощью критерия  $\chi^2$  Пирсона подтверждает это предположение. Параметры распределений ( $a$  – математическое ожидание и  $\sigma$  –среднеквадратическое отклонение) для Cu оказались равными:  $a = 23.73$  нм и  $\sigma = 10.49$  нм, а для W :  $a = 131.9$  нм и  $\sigma = 22.53$

нм. На Рис.2 приведены гистограммы частот с соответствующими им нормальными кривыми для медного (а) и вольфрамового (б) катодов.

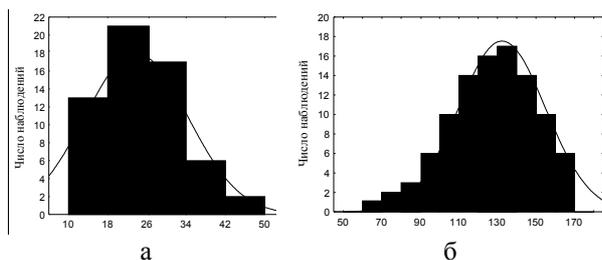


Рис.2. Гистограммы частот и соответствующие им нормальные кривые для медного (а) и вольфрамового (б) катодов

При расчете параметров, дающих наилучшее соответствие нормального распределения исходным данным, был применен метод численной минимизации суммы квадратов отклонений между опытными данными числа капель  $n_i$  в заданном частичном ин-

тервале и теоретическими значениями этой же величины  $n'_i(a, \sigma)$ , определяемыми известной формулой

$$n'_i(a, \sigma) = nP(x_{i-1} < X < x_i) = n(F(x_i, a, \sigma) - F(x_{i-1}, a, \sigma)); i = 1, \dots, k$$

где  $k$  – число групп или количество частичных интервалов для каждого материала, представленных в табл.1;  $n$  – объем выборки;  $F(x; a, \sigma)$  – функция нормального распределения с параметрами  $a$  и  $\sigma$ ;  $P(x_{i-1} < X < x_i)$  – вероятность того, что размер частицы будет принадлежать частичному интервалу  $(x_{i-1}, x_i)$ . Наименьшее значение функции

$L(a, \sigma) = \sum_{i=1}^k (n_i - n'_i(a, \sigma))^2$  для  $Cu$  достигается при  $a = 22.89$  нм и  $\sigma = 10.39$  нм, а для  $W$  – при  $a = 133.42$  нм и  $\sigma = 22.31$  нм.

Таблица 1.

Алюминий		Медь		Вольфрам	
Диаметр частиц, нм	Кол-во частиц	Диаметр частиц, нм	Кол-во частиц	Диаметр частиц, нм	Кол-во частиц
5...15	44	5...15	13	65...75	1
15...25	14	15...25	21	75...85	2
25...35	12	25...35	17	85...95	3
35...45	2	35...45	6	95...105	6
-	-	45...55	2	105...115	10
-	-	-	-	115...125	14
-	-	-	-	125...135	16
-	-	-	-	135...145	17
-	-	-	-	145...155	14
-	-	-	-	155...165	10
-	-	-	-	165...175	6

Следует отметить, что результат обработки алюминиевых частиц не представлен, так как определение размеров частиц диаметром менее 10 нм, что соответствует левой ветви нормального распределения, невозможно из-за ограниченной разрешающей способности микроскопа ( $\approx 5$  нм). Не представлен также результат обработки частиц графитового катода (углерода), так как их размеры значительно больше вольфрамовых, а количество значительно меньше, что не позволяет корректно провести статистический анализ. Далее осуществлялась проверка предположения, высказанного в работе [5], о примерном равенстве характерного размера частиц средней длине свободного пробега электронов-ферми в металле катода  $\langle \lambda_F \rangle$ . Эта величина определялась по известному соотношению  $\langle \lambda_F \rangle = Ed_0 / \pi n_0 kT$  и сравнивалась с полученными оценками математических ожиданий размеров частиц для соответствующих металлов. В этой формуле  $n_0$  – концентрация свободных электронов в металле, которая определялась по значению постоян-

ной Холла  $R_x$ ,  $d_0$  – постоянная решетки,  $E$  – модуль Юнга,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура. Указанные величины для каждого материала можно найти в [10]. В табл.2 приведены эти величины, рассчитанные по ним значения  $\langle \lambda_F \rangle$  и статистические оценки их математических ожиданий  $a$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma$  для соответствующих материалов.

Из представленных данных следует достаточно хорошая корреляция между средней длиной свободного пробега электронов-ферми для соответствующего металла катода  $\langle \lambda_F \rangle$  и характерным размером аэрозольных микроскопических частиц (их математическим ожиданием), возникающих в результате развития высоковольтного электрического разряда в вакууме.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Основная доля капельной фракции, возникающей при развитии мощного электрического разряда в вакууме,

представляет собой частицы субмикронного диапазона.

Таблица 2.

Материал катода	$T=293K$						
	$R_x \cdot 10^{10},$ м <sup>3</sup> /Кл	$n_0 \cdot 10^{28},$ м <sup>-3</sup>	$E, \text{ ГПа}$	$d_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}$	$\langle \lambda_F \rangle, \text{ нм}$	$a, \text{ нм}$	$\sigma, \text{ нм}$
С (графит)	-487	0.00128	1160...23	2.46...6.7	$1.76 \cdot 10^5 \dots 9.47 \cdot 10^3$	-	-
Al	-0.379	16.5	107...28	4.05	20.7...5.5	-	-
Cu	-0.52	12.0	168...75	3.61	40...16.6	23.74	10.49
W	+0.859	7.3	512...152	3.16	174...51.4	131.9	22.53

2. Функция распределения частиц по размерам с достаточной степенью точности описывается нормальным законом распределения.
3. Характерный размер микроскопических аэрозольных частиц (их математическое ожидание) соответствует средней длине свободного пробега электронов-ферми в металле катода.
4. Полученные количественные результаты могут способствовать установлению более точного механизма образования капельной фракции материала катода при электрическом разряде в вакууме и механизма возникновения эктонов.
4. А.А. Плюто, В.Н. Рыжков, А.Т. Капин. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг // *ЖЭТФ*. 1964, т.47, №8, с.494-507.
5. Н.С. Рудаков, В.Ф. Москалец, В.А. Базакуца. О роли микроскопических аэрозольных частиц в катодной области электрической дуги // *ЖТФ*. 1975, т.45, № 9, с.2009-2010.
6. J.E. Daalder. Study of electrode products emitted by vacuum arcs in form of molten metal particles // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1976, v.9, №11, p.2379-2395.
7. С.А. Попов, Д.И. Проскуровский, А.В. Батраков. Закономерности генерации капель жидкометаллическим взрывоэмиссионным катодом // *Известия вузов. Физика*. 1999, №3, с.105-109.
8. Ю.Е. Коляда, В.Ф. Ермоленко и др. Высоковольтный импульсный ускоритель наружного исполнения // *ПТЭ*. 1988, №1, с.226.
9. Ю.Е. Коляда, С.Б. Фиолетов и др. Влияние материала и геометрии взрывоэмиссионных катодов на параметры мощного РЭП // *Письма в ЖТФ*. 1990, т.16, №11, с.26-29.
10. Т.В. Андреева, А.С. Булгар и др. *Свойства элементов*. Справочник. М.: "Металлургия", 1976, 600 с..

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Месяц. Эктон – лавина электронов из металла // *УФН*. 1995, т.165, №6, с.601-626.
2. Г.А. Месяц. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*. М.: "Наука", 2000, 424 с.
3. В.Л. Грановский. *Электрический ток в газе. Установившийся ток*. М.: "Наука", 1971, с.336-377.

#### STATISTICAL ANALYSIS OF A DROPLET FRACTION OF AN EXPLOSIVE EMISSION CATHODE

*Yu.E. Kolyada, V.I. Fedun, S.P. Desyatsky*

The results of statistical investigations of the cathode material microscopic particle sizes that arise at a pulsed high voltage discharge in an explosive electron emission development regime have been presented. It was determined that its distribution function can be described with sufficient accuracy by normal distribution law and its characteristic size and an average free path in cathode material length of the Fermi-surface electrons are of the same magnitude.

#### СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ КРАПЕЛЬНОЇ ФРАКЦІЇ ВИБУХОВОЕМІСІЙНОГО КАТОДУ

*Ю.Є. Коляда, В.І. Федун, С.П. Десятський*

Приведені результати статистичних досліджень розмірів мікроскопічних частинок середовища катода, які виникають при імпульсному високовольтному вакуумному розряді у режимі розвитку вибухової електронної емісії. Встановлено, що їх функція розподілу з достатньою ступенем точності описується нормальним законом розподілу, а їх характерний розмір складає близько середньої довжини вільного пробігу електронів на Фермі-поверхні у металі катода.