

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И. В. Филатов, А. О. Бакумов, С. В. Воеводин, А. С. Долотов, М. М. Иванов,  
И. Г. Федосеев, В. А. Чернышов, П. А. Шарбанов, Ю. М. Шибитов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Для ряда научных и технических приложений актуальным является создание источника ионизации сред низкого давления в магнитном поле, способного сформировать однородную плазму с концентрацией не менее  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  в объеме  $1-10 \text{ м}^3$  [1]. Перспективным для этих целей является несамостоятельный разряд с термокатодом, который способен обеспечивать за сетчатым анодом поток электронов с энергией  $50-100 \text{ эВ}$  с плотностью тока до  $10 \text{ А/см}^2$  [2, 3].

## Оксидный термокатод

Среди известных типов прессованных оксидный термокатод (ТК) [4] при высокой эмиссионной способности и большом сроке службы имеет самые низкие работу выхода электронов, рабочую температуру, мощность накала и стоимость. При этом он достаточно устойчив к отравлению остаточными газами и ионной бомбардировке.

В работе использовался произведенный в ФГУП «Исток» г. Фрязино прессованный оксидный термокатод  $\varnothing 37 \text{ мм}$  с запасом активного вещества  $40 \text{ мг/см}^2$ .

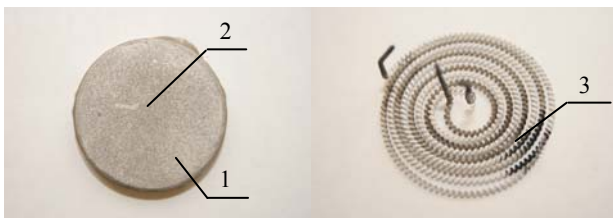


Рис. 1. Эмиссионная поверхность и нагреватель

Основным элементом конструкции ТК является эмиссионная поверхность, представляющая собой kern 1 из сплава Ni с нанесенным на него губчатым слоем 2. Губчатый слой заполнен карбонатами щелочно-земельных металлов.

На тыльной стороне керна располагается нагреватель, представляющий собой две витые вольфрамовые нити  $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ , покрытые керамикой для предотвращения пробоя на корпус.

## Формирование несамостоятельного разряда

Разряд формировался в плоскопараллельном электродном промежутке при низких давлениях газа,

т. е. на начальной стадии представлял собой вакуумный диод.

Идеализированная вольтамперная характеристика (ВАХ) вакуумного диода условно может быть разбита на три области (рис. 2).

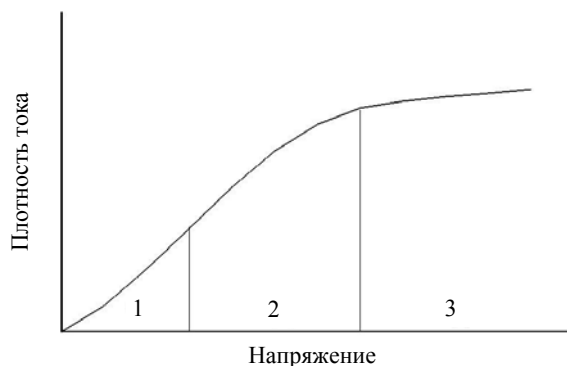


Рис. 2. Идеализированная ВАХ вакуумного диода

В области 1 анодный ток ограничен отрицательным объемным зарядом электронов пучка, растет с анодным напряжением, слабо зависит от температуры катода и определяется по формуле Чайльда–Ленгмюра

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2}, \quad (1)$$

где  $j, \text{ А/см}^2$  – плотность тока;  $U, \text{ В}$  – напряжение;  $d, \text{ см}$  – межэлектродное расстояние.

Область 2 является переходной, где плотность тока в диоде зависит как от напряжения, так и от температуры.

В области насыщения 3 зависимость анодного тока от напряжения исчезает и каждый эмитированный электрон достигает анода. В этом случае плотность тока эмиссии зависит только от температуры и может быть вычислена по формуле Ричардсона – Дешмана

$$j = AT^2 \exp\left\{-\frac{\phi}{kT}\right\} \frac{e\Phi}{kT} \quad (2)$$

где  $A$  – универсальная термоэлектронная постоянная Зоммерфельда;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\phi$  – работа выхода электронов.

При увеличении давления, когда концентрация нейтралов достигнет пороговой величины, определяемой неравенством

$$n_0 i \frac{2}{\sigma_i L} \frac{jm}{\mu M} \frac{1}{\mu}, \quad (3)$$

существенной становится ионизация газа пучком электронов. При этом за время  $\tau_i$  в промежутке нарабатывается плазма

$$\tau_i = \frac{1}{n_0 \sigma_i u}. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_i$  – сечение ионизации;  $m$  – масса электрона;  $M$  – масса иона;  $L$  – длина разрядного промежутка;  $u$  – скорость пучка. При этом влияние объемного заряда пучка снижается, а ток разряда увеличивается.

## Экспериментальная часть

Разрядный промежуток образован оксидным термокатодом  $\varnothing 37$  мм, вмонтированным в алюминиевый диск  $\varnothing 400$  мм, и проволочной сеткой, размещенной на диэлектрических опорах (рис. 3). Сетка выполнена из вольфрамовой проволоки  $\varnothing 0,8$  мм, натянутой на квадратный каркас со стороной 100 мм с шагом 5 мм. Эксперименты проводились при межэлектродных расстояниях 8 и 105 мм. Электродная система размещалась в металлической камере  $\varnothing 1$  м и длиной 5 м.

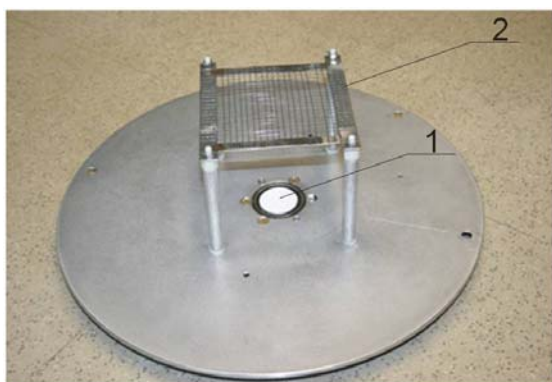


Рис. 3. Электродная система разряда: 1 – термокатод; 2 – вытягивающий анод

В экспериментах проводилось измерение напряжения на промежутке, тока с термокатода и тока с сетки (рис. 4).

ТК разогревается источником питания ИП2 до рабочей температуры при подключенном к сети источнике бесперебойного питания ИБП. Емкость  $C1$  заряжается источником питания ИП1. Перед коммутацией  $C1$  на промежуток, ИБП отключается от сети. Напряжение на промежутке ТК – ВА появляется при срабатывании электронного коммутатора SA1.

Для исследования эмиссионных характеристик термокатода на первом этапе эксперименты проводились в режиме вакуумного диода. На рис. 5 представлены полученные в экспериментах ВАХ вакуумного диода при давлениях остаточного газа  $5 \cdot 10^{-7}$  торр и межэлектродном расстоянии 8 мм и плотность тока, рассчитанная по формуле (1).

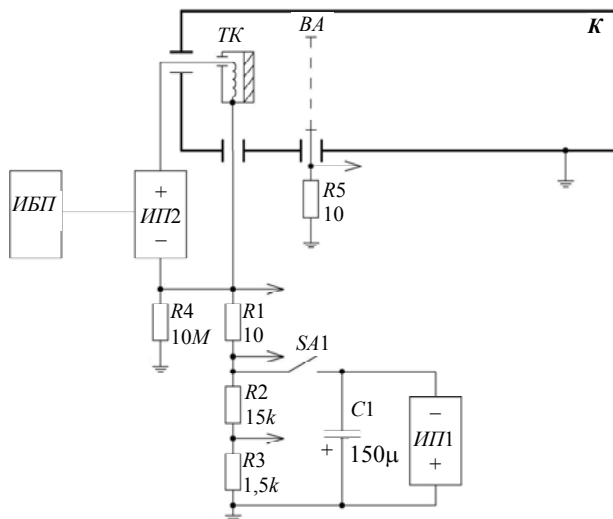


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема стенда: R2:R3 – делитель напряжения; R1, R5 – шунты; ВА – вытягивающий анод; К – металлическая камера

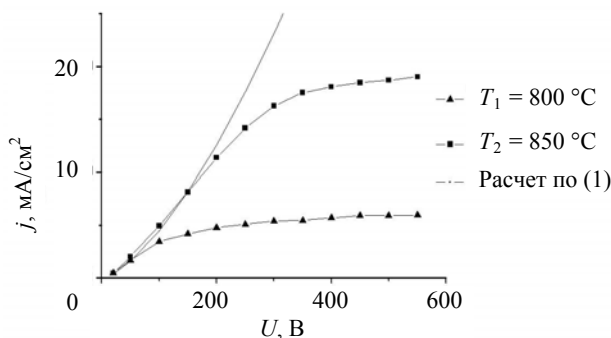


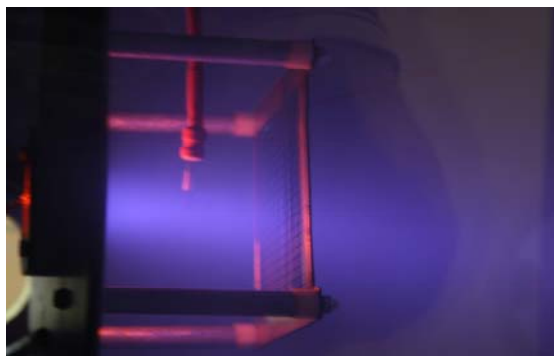
Рис. 5. Зависимость плотности тока вакуумного диода от напряжения

Как видно из рисунка начальные участки ВАХ хорошо описываются формулой Чайльда–Ленгмюра. Ток в переходной области и в насыщении зависит от температуры, большей температуре соответствует большее значение тока насыщения. Полученная из обработки экспериментальных данных работа выхода электронов с термокатода составляет 2 эВ.

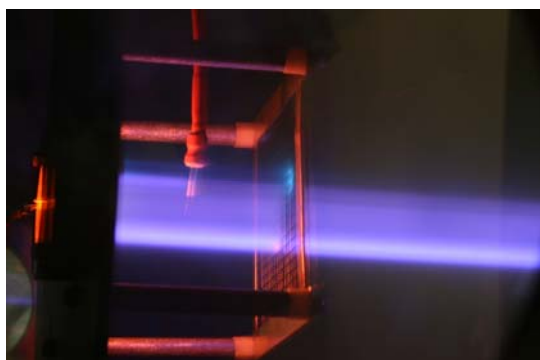
Целью второго этапа работы являлось исследование несамостоятельного разряда в зависимости от рода и давления газа, температуры термокатода, анодного напряжения и индукции магнитного поля. На рис. 6 представлены интегральные фотографии свечения разряда без магнитного поля и в магнитном поле индукцией 80 мТл.

Как видно из фотографий свечение наблюдается и за пределами сетки, что обусловлено возбуждением и ионизацией газа в промежутке ВА – К. Без магнитного поля свечение разряда имеет размытые контуры и слабую интенсивность, при включении поля плазменный столб приобретает четкие границы.

На рис. 7 представлена зависимость плотности тока разряда от индукции продольного магнитного поля в Аг при давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  торр, анодном напряжении 80 В и температуре катода 850 °С.



а



б

Рис. 6. Интегральная фотография свечения разряда без магнитного поля (а) и в магнитном поле индукцией 80 мТл (б)

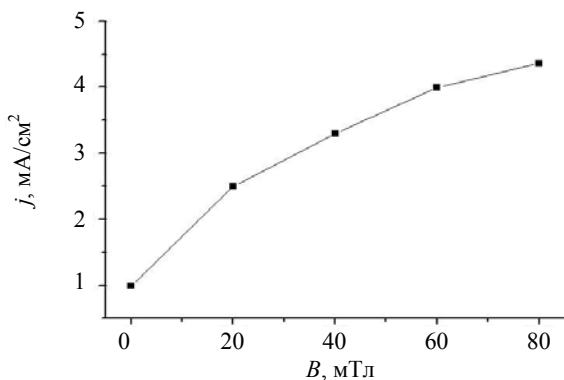


Рис. 7. Зависимость плотности тока разряда от индукции магнитного поля

Видно, что с ростом индукции магнитного поля плотность тока увеличивается. Это объясняется уменьшением ларморовского радиуса ионов плазмы, их ухода за пределы разрядного промежутка и, как следствие, увеличением степени ионизации в промежутке катод-анод.

На рис. 8 представлены ВАХ разряда в Ar и He при давлении  $5 \cdot 10^{-4}$  торр, индукции магнитного поля 80 мТл и температуре катода  $950^\circ\text{C}$ .

Как следует из этих данных, плотность тока разряда в Ar приблизительно в три раза превышает плотность тока в He, что, по-видимому, объясняется меньшим потенциалом ионизации атомов Ar.

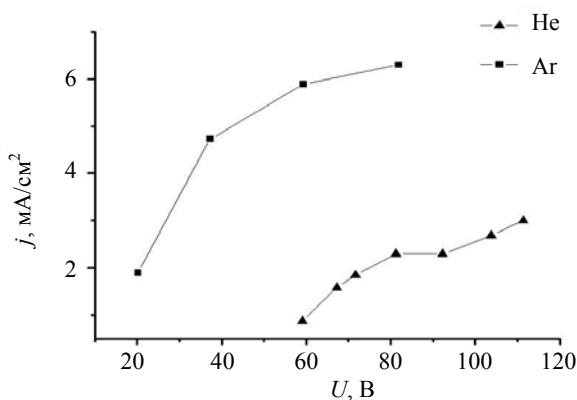


Рис. 8. ВАХ разряда, нормированные на единицу площади термокатода

На рис. 9 представлена зависимость плотности тока разряда от давления Ar для анодного напряжения 80 В и температуры катода  $850^\circ\text{C}$ .

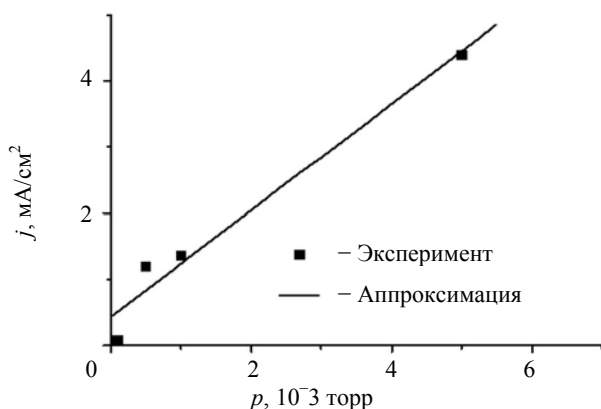


Рис. 9. Зависимость плотности тока разряда от давления Ar

Зависимость близка к линейной. Рост плотности тока с увеличением давления среды объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов в газе, увеличением числа ионизационных столкновений и снижением экранировки объемным зарядом.

На рис. 10 представлена зависимость плотности тока разряда от температуры ТК в Ar при давлении  $1 \cdot 10^{-3}$  торр, анодном напряжении 35 В и индукции магнитного поля 80 мТл.

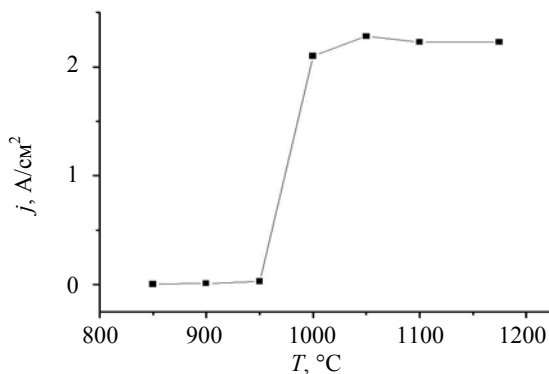


Рис. 10. Зависимость плотности тока разряда от температуры катода

Видно, что в диапазоне 950–1000 °С происходит резкое увеличение плотности тока разряда, что, по-видимому, связано с более эффективным протеканием реакции термической диссоциации окисла ВаО.

### Заключение

Проведены исследования источника ионизации на основе самостоятельного разряда низкого давления с оксидным термокатодом Ø37 мм, изготовленным в ФГУП «Исток» г. Фрязино.

Исследованы эмиссионные характеристики термокатада в режиме вакуумного диода в диапазоне анодных напряжений 0–500 В при давлении остаточного газа  $5 \cdot 10^{-7}$  торр.

Исследован самостоятельный разряд в Ag и He в диапазоне давлений  $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  торр, температур катода 800–1200 °С, анодных напряжений 0–120 В и индукции внешнего продольного магнитного поля 0–80 мТл. Показано, что максимальная плотность

тока разряда 2–3 А/см<sup>2</sup> достигается при температурах катода более 1000 °С.

Результаты измерения тока на корпус камеры и фотографической регистрации свечения разряда показали, что электроны с катода при давлениях  $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  торр обеспечивают ионизацию газа на расстояниях не менее 1,5 м от источника.

Авторы благодарны к.ф.-м.н. В. В. Горохову и д.ф.-м.н. В. И. Карелину за обсуждение работы и полезные замечания.

### Литература

1. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2009. ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров, 2010.
2. Незлин М. В. Динамика пучков в плазме. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Rev. Sci. Instrum. Vol. 62, N 12. 1991.
4. Киселев А. Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. М.: Изд-во МФТИ, 2002.