

10. Nicklasson G. A., Granqvist C. G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite films // J. Appl. Phys. – 1984. – V. 55. – № 9. – P. 3382–3410.
11. Frait Z., Mackfaden H. Ferromagnetic resonance in metals. Frequency dependence // Phys. Rev. – 1965. – V. 139. – № 4A. – P. 1173–1180.
12. Физические величины. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Статья поступила в редакцию 26.11.2004

Николай Ильич Юрасов родился в 1943 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1974 г. Московский инженерно-физический институт. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области физики конденсированного состояния: магнитных и кинетических явлений, интерференционных эффектов, квантовой гравитации и устойчивости тяжелых ядер.



N.I. Yurasov (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966 and Moscow Institute for Engineering and Physics in 1974. Ph.D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 publications in the field of condense matter physics (magnetic and kinetic phenomena), interference effects, quantum gravitation and hard atomic nuclew stability.

УДК 621.431.37+621.59

А. И. Лошкарев, В. В. Онуфриев

## ЗАЖИГАНИЕ ОБРАТНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА В БАРИЕВОМ ТЕРМОЭМИССИОННОМ ДИОДЕ

*Проведено экспериментальное исследование напряжения зажигания обратного дугового разряда в парах бария. Полученные результаты показали увеличение напряжения зажигания до 1800... 2320 В при температурах анода 850... 1050 К и находятся в хорошем согласии с разработанной аналитической моделью зажигания обратного дугового разряда.*

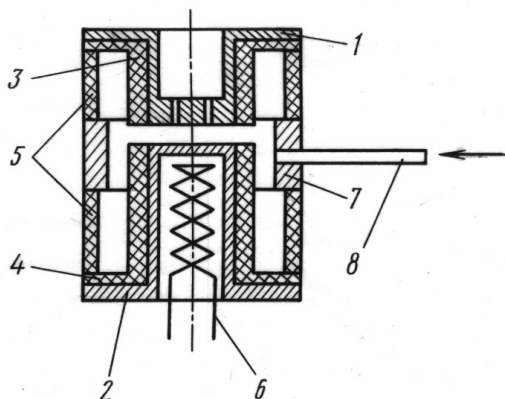
В работе [1] приведены результаты исследований потенциальных возможностей газотрона с цезиевым наполнением. Показано, что напряжение зажигания обратного дугового разряда составляет  $U_{\text{зж}}^{\text{обр}} = 1000 \dots 1200$  В при температурах анода  $T_A = 600 \dots 700$  К. Для обеспечения достаточной эмиссионной способности катода ( $j_R = 1$  А/см<sup>2</sup> при  $T_K = 1400 \dots 1800$  К) давление пара цезия в межэлектродном зазоре (МЭЗ) должно составлять не менее 0,03... 0,04 торр. Это, в свою

очередь, ограничивает увеличение напряжения зажигания обратного дугового разряда, которое монотонно возрастает при снижении давления пара. Следует ожидать, что использование в качестве наполнителя МЭЗ бария, который имеет повышенные по сравнению с цезием потенциал ионизации и адсорбционную способность на поверхности электродов, приведет к снижению рабочего давления пара в МЭЗ, что позволит увеличить не только напряжение зажигания обратного дугового разряда, но и температуру анода и обеспечит более благоприятные условия теплоотвода с поверхности анода излучением.

В этой связи было предпринято изучение электрической прочности МЭЗ газотрона с бариевым наполнением.

**Экспериментальная модель и методика измерений.** Для экспериментального исследования процессов зажигания обратного дугового разряда использовалась модель диода, показанная на рис. 1. Материал диэлектрических элементов — алюминитрид бора АБН-1, в качестве уплотнений по поверхности корпуса и электродов использованы танталовая фольга толщиной  $\delta = 50$  мкм и синтетическая слюда.

Диод содержит аксиально расположенные электроды: анод 1 и катод 2 (электрод, снабженный нагревателем 6), окруженные с боковых поверхностей изолирующими втулками 3, 4 из АБН-1. В торце анода выполнено пять отверстий диаметром 0,5 мм для откачки пара бария из МЭЗ и его предварительного вакуумирования в процессе подготовки эксперимента. Электроды размещены в корпусе 5, выполненном из АБН-1 и состоящем из двух колец, которые разделены металлическим кольцом 7 с трубкой 8 для подачи пара бария в МЭЗ из резервуара, и опираются на изолирующие кольца, выполненные также из АБН-1. Модель располагается между фланцами, изготовленными из стали Х18Н10Т, и стягивается шпильками, причем для компенсации температурных напряжений шпильки подпружинены. Диаметр электродов



**Рис. 1. Высоковольтный термоэмиссионный диод с бариевым наполнением:**

1, 2 — электроды; 3, 4 — втулки-изоляторы; 5 — корпус; 6 — спираль; 7 — кольцо; 8 — трубка подачи пара

тродов — 16 мм, величина межэлектродного зазора в процессе экспериментов 3,5 мм. При проведении эксперимента осуществлялась непрерывная прокачка пара бария через МЭЗ: подача пара из резервуара в МЭЗ по трубке 8 и откачка через отверстия в торце анода 1.

С целью предотвращения “холодных” точек модель имела независимые нагреватели, коаксиально расположенные снаружи корпуса между фланцами, и нагреватель паропровода, соединяемого с анодным фланцем. Измерение температур проводилось с помощью термопар ВР5/ВР20 для электродов и ХА/ХК для термостата.

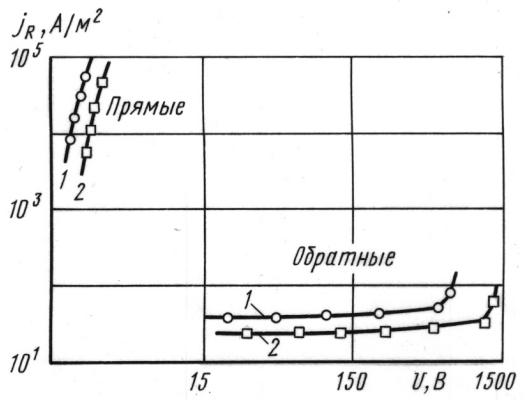
В процессе исследований испытаны диоды со следующим парами электродов (катод указан первым): молибден–молибден, молибден–нержавеющая сталь. Давление пара бария изменялось в пределах 0,1...3 Па, температура анода — в пределах  $T_A = 830 \dots 1050$  К, температура катода — в пределах  $T_K = 1250 \dots 1800$  К.

Схема измерения приведена в работе [1, рис. 2]. Для регистрации вольтамперных характеристик (ВАХ) диода при приложении прямого и обратного напряжений использовались регулируемые источники постоянного тока (для прямой ветви ВАХ  $U = 0 \dots 20$  В, для обратной ветви ВАХ  $U = 0 \dots 2500$  В). Для прямой ветви ВАХ активной нагрузкой служил резистор с сопротивлением  $R = 15$  Ом мощностью 75 Вт, для обратной ветви ВАХ — лампы ТКГ1000 и ТКГ2000 суммарной мощностью 2...12 кВт, которые воспринимали напряжение цепи при зажигании обратного дугового разряда в МЭЗ диода. Регистрация ВАХ статическим методом проводилась с использованием высокоточных вольтметров и амперметров на базе приборов типа М253 класса точности 0,5 с зеркальной шкалой, сигналы токов и напряжений снимались с калиброванных шунтов.

**Результаты экспериментального исследования.** Экспериментальная ВАХ газотрона с бариевым наполнением повторяет вид ВАХ газотрона с цезиевым наполнением во всех квадрантах. Как и ожидалось, напряжение зажигания обратного дугового разряда возросло до  $U_{\text{заж}}^{\text{обр}} = 1800 \dots 2300$  В при температуре анода  $T_A = 863$  К. На обратной ветви ВАХ наблюдается участок плотного тлеющего разряда, заканчивающийся точкой, в которой происходит зажигание обратного дугового разряда (рис. 2).

Зависимость  $U_{\text{заж}}^{\text{обр}}(p_{\text{Ва}}, T_A)$  напряжения зажигания обратного дугового разряда от теплофизических параметров газотрона имеет большую крутизну по сравнению с аналогичной зависимостью для цезиевого газотрона (рис. 3). Исследования показали, что, как и в случае цезиевого наполнения МЭЗ, температура “горячего” катода не влияет на величину напряжения зажигания обратного дугового разряда.

**Рис. 2.** Экспериментальные ВАХ диода с бариевым наполнением при  $T_A = 870$  К:  
 1 —  $U_{\text{зак}}^{\text{обр}} = 871$  В,  $p_{\text{Ва}} = 0,1$  Па; 2 —  $U_{\text{зак}}^{\text{обр}} = 1297$  В,  $p_{\text{Ва}} = 0,06$  Па

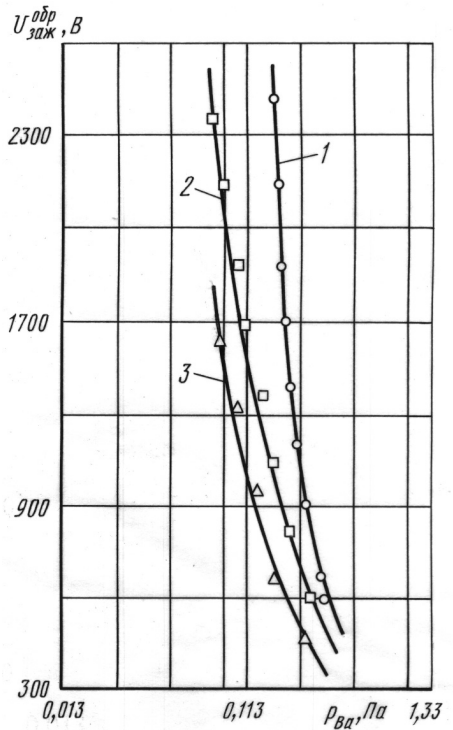


**Сопоставление теории и экспериментальных данных.** Для расчета температуры термализованных электронов цезиевой плазмы в работе [1] использовалось соотношение (15), полученное в предположении, что в ионизации преобладающими являются ступенчатые процессы, начиная с первого метастабильного уровня 1,44 В.

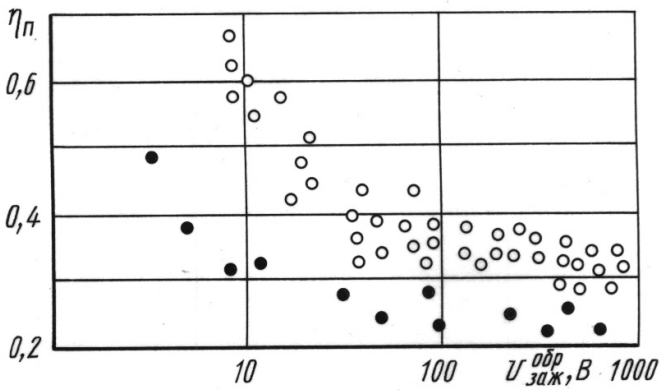
Поскольку ионизация определяется энергичными электронами, соответствующими “хвосту” функции распределения электронов и возникающими при вторичной эмиссии на катоде, то условия, приводящие к ступенчатой ионизации, выполняются гораздо лучше [2], чем в бариевой плазме.

Учитывая более высокий потенциал ионизации бария ( $\varphi_{\text{ион}} = 5,21$  В) по сравнению с потенциалом ионизации цезия ( $\varphi_{\text{ион}} = 3,89$  В), а также характер и распределение низколежащих энергетических уровней и дополнительный выход резонансного излучения из разреженной плазмы, можно предположить, что ионизация атомов бария происходит, в основном, за счет прямых столкновений электронов с атомами [3].

В этой связи при расчете электронной температуры по зависимости (15) из работы [1] в левой части использовалось выражение для ско-



**Рис. 3.** Напряжение  $U_{\text{пр}}$  обратного дугового пробоя бариевого диода при  $\Delta_{\text{МЭЗ}} = 2,5$  мм,  $T_A = 856(1)$ , 870 (2), 892 (3) К (анод — молибден)



**Рис. 4. Зависимость коэффициента использования энергии электронов пучка  $\eta_p$  от напряжения зажигания обратного дугового разряда:**  
 ○ — цезиевое наполнение, ● — бариевое наполнение

рости прямой ионизации в бариевой плазме [4]:

$$an_{Ba} \frac{600}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2kT_e}{e\varphi_{ион}} \right)^{3/2} \left( 1 + \frac{e\varphi_{ион}}{2kT_e} \right) \exp \left( -\frac{e\varphi_{ион}}{kT_e} \right) = \left( \frac{\pi}{d_3} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R_3} \right)^2,$$

где  $T_e$  — температура электронов плазмы;  $\varphi_{ион}$  — потенциал ионизации бария;  $a$  — сечение ионизации бария [4];  $n_{Ba}$  — концентрация атомов бария;  $k$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона;  $d_3$  и  $R_3$  — экстраполированные размеры межэлектродного зазора и радиуса электродов.

Сопоставление теории и результатов, полученных в экспериментах с бариевым газотроном, проводилось по коэффициенту использования энергии пучка  $\eta_p$  [1]. На рис. 4. показаны результаты обработки экспериментальных данных по зависимостям, полученным в работе [1]. Видно, что для бариевого газотрона изменение коэффициента  $\eta_p(U_{заж}^{обр})$  при различных параметрах описывается достаточно стабильной зависимостью, т.е. в данном случае представленная теория имеет прогностическую ценность.

Уменьшение коэффициента использования энергии пучка  $\eta_p(U_{заж}^{обр})$  для бариевой плазмы по сравнению с коэффициентом для цезиевой плазмы наиболее заметно в диапазоне напряжений зажигания обратного дугового разряда  $U_{заж}^{обр}$  от 10 В и более и составляет 1,43... 1,52, что примерно соответствует обратному соотношению их потенциалов ионизации.

Таким образом, можно считать, что достижимая величина  $U_{заж}^{обр}$  для бариевого диода составит 2300... 2500 В при температурах анода 850... 900 К, что превышает аналогичные параметры для цезиевого газотрона в 1,5... 2 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лошкарёв А. И., Онуфриев В. В. Зажигание обратного дугового разряда в цезиевом термоэмиссионном диоде // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 2003. – № 2. – С. 90–102.
2. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. – М.: Наука, 1971. – 543 с.
4. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. – М.: Мир, 1976. – 496 с.

Статья поступила в редакцию 27.09.2004

Анатолий Иванович Лошкарёв родился в 1932 г., окончил в 1955 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1961 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 160 научных работ в области преобразования видов энергии, физики плазмы и физической электроники, математической физики и математического моделирования.

A.I. Loshkaryov (b. 1932) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1955 and Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov in 1961. D. Sc. (Eng.), professor of “Computing Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 160 publications in the field of conversion of kinds of energy, physics of plasma and physical electronics, mathematical physics and mathematical simulation.

Валерий Валентинович Онуфриев родился в 1956 г., окончил в 1979 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области плазменных преобразователей тока, космических энергетических систем и электроракетных двигательных установок.

V.V. Onufriev (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of plasma current transducers, space power systems and electric and rocket propulsion units.