

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. А. Генкин, Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц,  
В. Г. Работкин, А. П. Хузеев, Исследование кон-  
тракции несамостоятельного объемного разряда,  
инициируемого электронным пучком, *ТВТ*, 1982,  
том 20, выпуск 1, 1–5

Использование Общероссийского математического портала Math-  
Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользова-  
тельским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.91

11 декабря 2024 г., 10:02:47



# ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

1982

МОСКВА

Журнал основан в 1963 году

Выходит 6 раз в год

УДК 537.521

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРАКЦИИ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*Генкин С. А., Королев Ю. Д., Месяц Г. А.,  
Работкин В. Г., Хузеев А. П.*

Исследуется переход объемного разряда в искровой. Разряд инициируется в азоте при давлении 13,3 кПа пучком быстрых электронов. Показано, что контракция инициируется в результате возникновения катодных пятен и прорастания из них высокопроводящих каналов. При токе, меньшем некоторого значения, пятно функционирует неустойчиво. Измерена скорость движения канала.

Исследования перехода несамостоятельного объемного разряда в искровой, выполненные в последнее время, показали, что инициирующим фактором при таком переходе является возникновение катодных пятен, из которых затем прорастают искровые каналы [1—6]. Таким образом, длительность объемного горения складывается из времени формирования пятен и времени переключения промежутка каналом.

Представляют интерес определение условий возникновения катодного пятна и измерение токов, необходимых для устойчивого функционирования пятна, и скоростей распространения каналов. Результаты таких измерений применительно к объемному разряду, инициируемому электронным пучком, представлены в данной работе.

**Аппаратура и методика.** Эксперименты проводились на установке, которая схематично показана на рис. 1. Разряд зажигался в азоте технической чистоты при давлении 13,3 кПа и отношениях напряженности электрического поля к давлению  $E/p = 0,021—0,135$  В/см·Па. Инициирование разряда осуществлялось пучком электронов длительностью  $10^{-7}$  с с плотностью тока  $3 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> и максимальной энергией 200 кэВ. Пучок от ускорителя электронов вводился в межэлектродный промежуток через окно диаметром 6 см, закрытое фольгой и заземленной металлической сеткой. Катодом служил латунный диск диаметром 10 см. Межэлектродное расстояние составляло  $d = (3—3,5)$  см. Энергия к разряду подводилась от емкости  $C$ , заряженной до отрицательного напряжения  $-U$ . Сопротив-

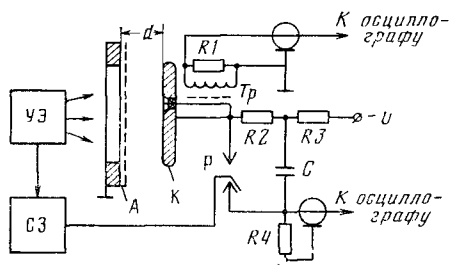


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ление  $R_2$  служило для ограничения тока при искровом пробое, но было намного меньше сопротивления плазмы объемного разряда. Ток через промежутки осциллографировался на шунте  $R_4$ . При изменении отношения  $E/p$  в пределах 0,06—0,098 В/см·Па время запаздывания искрового пробоя изменялось от единиц миллисекунд до десятков микросекунд. Для более низких  $E/p$  искровой пробой не наблюдался. Типичные удельные энергии, вводимые в разряд на объемной стадии и рассчитанные по осциллограм-

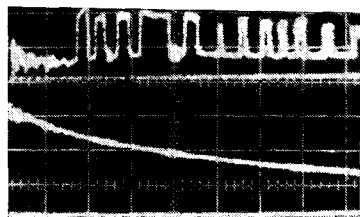


Рис. 2

Рис. 2. Осциллограмма тока через штырь (верхний луч) и общего тока разряда (нижний луч) при  $U=1,2$  кВ,  $d=3,5$  см. Развертка  $\tau=2,5$  мкс/дел, масштаб тока для верхнего луча 0,05 А/дел, для нижнего — 5 А/дел

Рис. 3. Осциллограмма тока ФЭУ (верхний луч) и тока через штырь (нижний луч; 0,05 А/дел) при  $d=3,5$  см,  $\tau=1$  мкс/дел для значений напряжения: а — 1,5 кВ; б — 1,3; в — 1,0

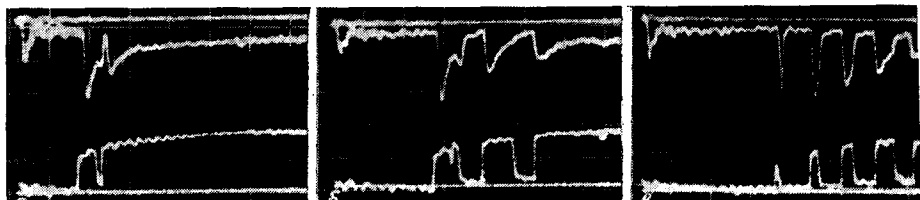


Рис. 3 (а, б, в)

мам тока при условии, что поперечный размер плазмы принимался равным диаметру катода, составляли  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>·Па.

Чтобы измерить ток разряда через катодное пятно и развивающийся канал, применялся секционированный катод и специальная электрическая схема (рис. 1). В диске высверливалось отверстие диаметром 3,5 мм, в которое заподлицо с поверхностью катода встроен штырь диаметром 0,2 или 0,8 мм. Ток через штырь регистрировался отдельно от общего тока разряда с применением пояса Роговского ( $Tr$ ), позволяющего воспроизводить фронты длительностью  $10^{-7}$  с. Спад вершины при воспроизведении прямоугольного импульса составлял 25% на 100 мкс. Чувствительность пояса 0,25 В/А. Измеренные времена запаздывания пробоя для сплошного и секционированного катодов при механической полировке поверхности различались не более чем на 20%, причем каналы развивались одновременно как со штыря, так и с других участков электрода. Чтобы предотвратить появление катодных пятен на основном электроде, применялась тренировка его поверхности аномальным тлеющим разрядом. Это позволило исследовать контракцию при распространении в промежутке одиночного канала со штыря.

Для исследования динамики прорастания канала проводилось фотографирование межэлектродного зазора с применением метода оборванного разряда. Обрыв разряда осуществлялся закорачиванием конденсаторной батареи через управляемый разрядник  $P$ . Импульс управления синхронизирован с импульсом тока пучка электронов. Время подачи импульса изменялось с помощью схемы задержки.

Регистрация интенсивности свечения прикатодной плазмы во времени проводилась с применением фотоумножителя в сочетании с осциллографом С8-2. Изображение катода проецировалось на плоскость диафрагмы, за которой располагался фотоумножитель. Диафрагма вырезала изображение заданного участка поверхности катода (как правило, поверхности штыря). Методика позволяла регистрировать как интегральное свечение, так и свечение на отдельных спектральных переходах. В последнем случае диа-

фрагма располагалась в плоскости входной щели монохроматора МДР-3, а фотумножитель устанавливался на выходе монохроматора.

**Результаты и обсуждение. Возникновение катодных пятен.** Как отмечалось, для условий данных экспериментов при низких значениях отношения  $E/p$  переход от объемного разряда к искровому не наблюдается. Типичная осциллограмма тока разряда со штыря и полного тока разряда для такого режима горения показана на рис. 2. Полный ток со временем спадает в соответствии с рекомбинационным распадом плазмы объемного разряда. Точно такой же характер имеет и ток со штыря в течение первых

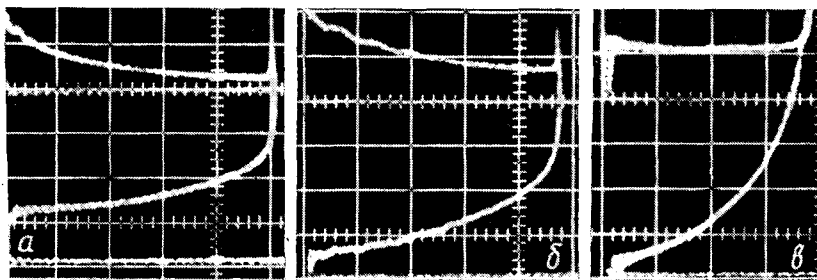


Рис. 4. Осциллограммы тока разряда (верхний луч) и тока через штырь (нижний луч) при  $d=3$  см: а —  $U=3,4$  кВ;  $\tau=25$  мкс/дел; масштаб для верхнего луча 25 А/дел; для нижнего — 0,4 А/дел; б — 4; 10; 25; 1; в — 5,3; 2,5; 50; 2

нескольких микросекунд, однако в дальнейшем на осциллограмме регистрируются хаотические пульсации. Естественно связать подобные пульсации тока с зажиганием, функционированием и «погасанием» катодного пятна [7, 8]. Выполненные эксперименты подтверждают эту связь.

На рис. 3 представлены осциллограммы интенсивности свечения на торце штыря и осциллограммы тока через штырь. Видно, что в момент всплеска тока наблюдается также всплеск интенсивности свечения. Характерно, что при наблюдении участков, вблизи катода, расположенных на расстоянии (1—1,5) мм от штыря, имеет место противоположный эффект: каждому всплеску тока соответствует спад свечения, регистрируемого фотумножителем. Это означает, что при формировании катодного пятна происходит стягивание части тока объемного разряда на пятно. Прямым доказательством зажигания пятна на кончике штыря является наличие в спектре свечения прикатодной плазмы линий атомов и ионов материала электрода. Например, при регистрации осциллограмм свечения на переходах Al I 555,75 нм, Al II 620,1 нм и др. обнаружено, что моменты выбросов тока и выбросов в осциллограммах свечения на указанных спектральных переходах совпадают. Увеличение напряжения, приложенного к промежутку, и соответственно плотности тока объемного разряда приводит к уменьшению времени возникновения пятна (рис. 3). При токе на штырь (0,5—0,6) А пятно возникает одновременно с инжекцией пучка (рис. 4) и горит устойчиво (пульсации тока отсутствуют). Именно в этом случае и наблюдается прорастание высокопроводящих каналов. Таким образом, минимальные токи, необходимые для поддержания катодного пятна, составляли в данных экспериментах (0,5—0,6) А.

Механизм иницирования катодных пятен в объемных разрядах чаще всего связывается со взрывом микровыступов в сильном электрическом поле прикатодного слоя либо с зарядкой диэлектрических загрязнений и пленок на катоде ионным током и последующим пробоем пленки [9]. В соответствии с результатами [6] плотность тока объемного разряда в рассматриваемых условиях недостаточна для обеспечения напряженности электрического поля  $E \sim 10^6$  В/см, необходимой для микровзрыва катодной поверхности. Поэтому второй механизм является более вероятным. На это указывает также эффект устранения катодных пятен при тренировке поверхности в аномальном тлеющем разряде. Оценку напряженности полей,

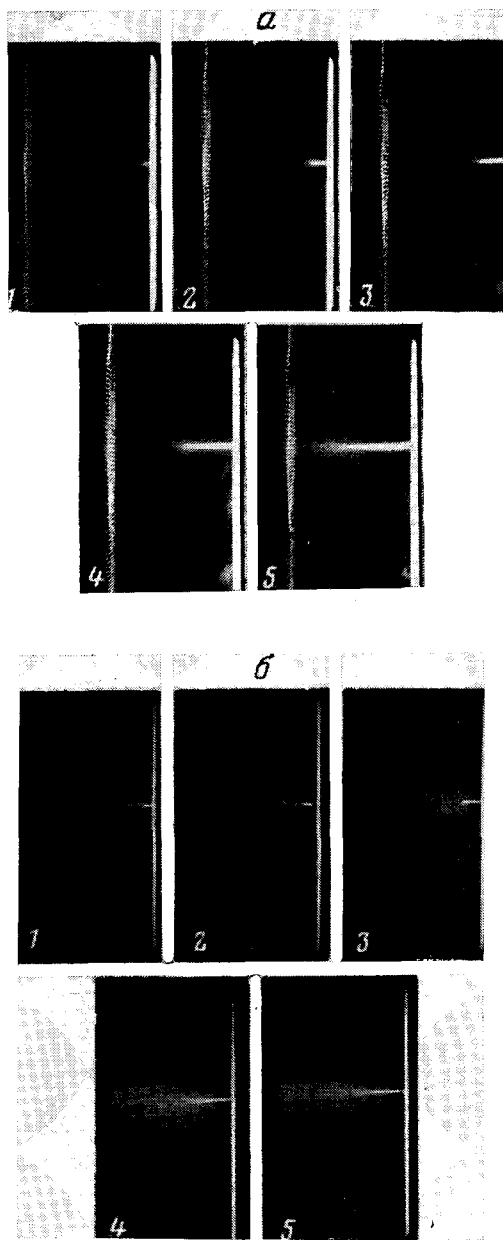


Рис. 5. Фотографии свечения газоразрядного промежутка для различных моментов времени горения разряда при  $d=3$  см: *a* —  $U=3,4$  кВ (10; 32; 65; 95; 115 мкс, 1–5 соответственно); *б* — 5,3 (3,4; 4,6; 6; 7,5; 8,5 мкс)

которая достигается при заряде пленки, можно провести по формуле  $E=jt/\epsilon\epsilon_0$ , где  $j$  — плотность тока разряда;  $t$  — время до появления первого всплеска тока;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость пленки. Если принять  $\epsilon=2$ , то для условий рис. 2, 3 напряженность электрического поля превышает  $10^7$  В/см, что соответствует напряженностям пробоя тонких пленок.

**Прорастание каналов.** Типичные осциллограммы тока разряда и тока в канале для различных напряженностей электрического поля показаны на рис. 4. Видно, что на фоне спада общего тока разряда, обусловленного рекомбинационным распадом плазмы, происходит рост тока через отдельный канал. Соответствующие фотографии свечения промежутка, отражающие динамику развития пробоя во времени, представлены на рис. 5. На

основе обработки подобных фотографий построены зависимости длины канала от времени (рис. 6).

Скорость прорастания канала резко увеличивается с возрастанием напряженности электрического поля, а также по мере роста длины канала.

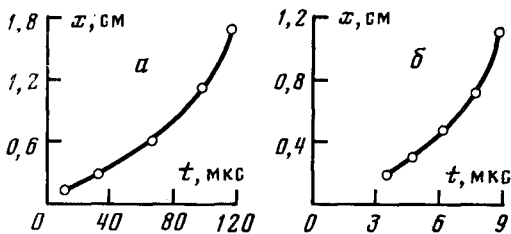


Рис. 6. Зависимость длины канала от времени при  $d=3$  см: а —  $U=3,4$  кВ; б —  $5,3$

Например,  $v=10^4$  см/с для длины  $x=0,3$  см при  $E/p=0,085$  В/см·Па, а при  $E/p=0,132$  В/см·Па  $v=9 \cdot 10^4$  см/с. Зависимость  $v(x)$  также связана с увеличением напряженности электрического поля перед головкой продвигающегося канала, поскольку проводимость объемного разряда намного ниже, чем проводимость плазмы в канале.

Институт сильноточной  
электроники СО АН СССР

Поступила в редакцию  
10.IX.1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков Ю. И., Королев Ю. Д., Месля Г. А. Импульсный разряд в газе в условиях интенсивной ионизации электронами.— УФН, 1978, т. 126, вып. 3, с. 451.
2. Королев Ю. Д., Работкин В. Г., Филонов А. Г. Кольцевая структура катодных пятен в несамостоятельном тлеющем разряде в азоте.— ТВТ, 1979, т. 17, № 1, с. 221.
3. Персианцев И. Г., Письменный В. Д., Полушкин В. М. и др. Ионизационная неустойчивость, развивающаяся из приэлектродных областей при несамостоятельном разряде в газах, используемых в  $\text{CO}_2$ -лазерах.— В кн.: Тезисы докладов III Всес. симпоз. по сильноточной импульсной электронике, Томск, 1978, с. 260.
4. Бабичев В. Н., Голубев С. А., Ковалев А. С. и др. Прикатодная область несамостоятельного разряда в потоке азота.— Физика плазмы, 1980, т. 6, вып. 1, с. 195.
5. Гуревич Д. Б., Канатенко М. А., Подмошенский И. В. Развитие пробоя в несамостоятельном объемном разряде с внешней фотопионизацией.— Физика плазмы, 1979, т. 5, вып. 6, с. 1359.
6. Королев Ю. Д., Месля Г. А., Пономарев В. В. Условия возникновения взрывной эмиссии в объемных разрядах высокого давления.— ПМТФ, 1979, № 6, с. 25.
7. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.
8. Jenkins J., Jones T. B. Glow-arc transition in current-stabilized electrical discharges.— J. Appl. Phys., 1957, в. 28, N 6, p. 663.
9. Месля Г. А. О взрывных процессах на катоде в газовом разряде.— Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, вып. 19, с. 885.