

04;12

## Исследование предпробойных токов, протекающих в псевдоискровых разрядниках

© В.Д. Бочков, А.В. Колесников, Ю.Д. Королев, В.Г. Работкин, О.Б. Франц, И.А. Шемякин

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 22 января 1996 г.)

Рассмотрены токи, протекающие в предпробойной стадии в псевдоискровом коммутаторе с узлом поджига на основе стационарного тлеющего разряда. Дано объяснение механизму действия блокирующих электродов. Представлена конструкция электродов, позволяющая существенно повысить напряжение статического пробоя прибора.

### Введение

В последнее время интенсивно исследуется и развивается новый тип газоразрядных приборов низкого давления, так называемые псевдоискровые разрядники [1–3]. Высокая стабильность запуска и возможность пропускать килоамперные импульсы тока как положительной, так и отрицательной полярности позволяют рассматривать эти приборы как реальную альтернативу водородным тиратронам. Однако в настоящее время практически не существует завершенных промышленных образцов разрядников. Одна из главных проблем, с которой сталкиваются экспериментаторы, работающие с псевдоискровыми разрядниками, состоит в увеличении напряжения статического пробоя, что также определяет и возможность работы разрядника с высокой частотой следования импульсов. Для решения данной задачи в ряде случаев применяют блокирующие электроды, на которые подается положительный либо отрицательный потенциал от вспомогательного источника питания [1,2].

Цель настоящей работы состояла в исследовании влияния предпробойных токов на пробивное напряжение разрядника, исследовании механизма действия блокирующих электродов и поиске конструктивных решений, позволяющих максимально повысить напряжение статического пробоя.

### Схема эксперимента

Упрощенная схема системы электродов и электрическая цепь показаны на рис. 1. Электроды были помещены в керамическом цилиндре с внутренним диаметром 86 мм. Основные электроды *C* и *D* представляли собой полости, сообщающиеся через отверстие на оси разряда. Длина зазора в основном промежутке составляла 4 мм и диаметры осевых отверстий в электродах *B*, *C* и *D* также были 4 мм. Конструкция разрядника была разборной, что позволяло использовать электроды различной конфигурации. В качестве рабочего газа использовался воздух при давлениях  $p = 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$  Торр.

Узел инициирования разряда в основном промежутке был основан на использовании вспомогательного тлеющего разряда, который зажигался в системе электродов *AB* под действием напряжения  $+V_1$ . В исходном состоянии электрод *B*, как видно из рис. 1, является положительным по отношению к заземленному электроду *C*. При подаче пускового импульса  $-V_T$  электрод *B* приобретает отрицательный потенциал, в результате чего электроны из вспомогательного разряда инжектируются в полость *C* и в основной зазор и происходит запуск разрядника. Более детально работа разрядника описана в [4–6].

На боковых стенках катодной полости *C* было расположено 12 отверстий диаметром 3 мм, через которые осуществлялось действие блокирующего электрода *E*. В ряде случаев боковые отверстия в *C* закрывались, что сводило действие блокирующего потенциала к нулю. В других экспериментах эффективность блокировки повышалась путем введения в полость электрода *C* зондов, соединенных с *E*. Обычно на блокирующий электрод *E* подается положительный потенциал от дополнительного источника питания [1,2]. Применяемая нами система запуска позволяет использовать для этой цели положительный потенциал  $V_B$ , т.е. напряжение горения тлеющего разряда.

Токи в предпробойной стадии измерялись с помощью приборов  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ . Поскольку при наличии случайного пробоя через приборы мог протекать большой ток, то они были защищены высокочастотными диодами. При малом падении напряжения на приборе диод практически не пропускает ток, хотя и включен в прямом направлении, а в случае увеличения тока диод начинает шунтировать измерительный прибор.

### Результаты и обсуждение

В [7] был подробно рассмотрен механизм зажигания разряда. Из представленной модели следовало, что необходимым условием развития пробоя является наличие в основном зазоре *CD* значительного предпробойного тока  $i_{pb}$  (рис. 1). Причинами возникновения последнего могут

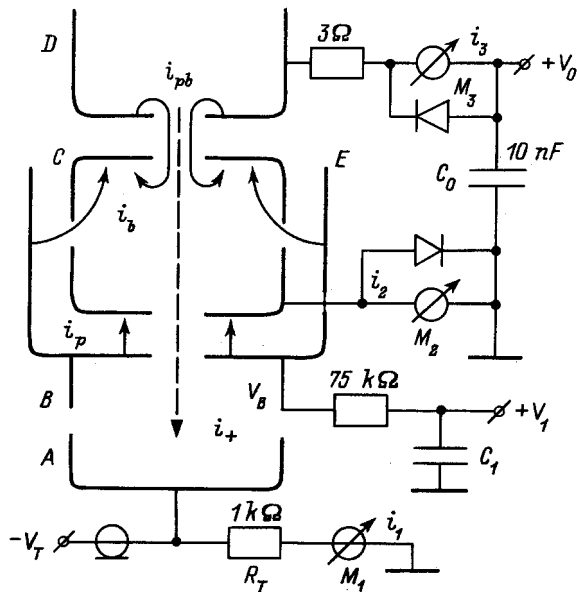


Рис. 1. Упрощенное изображение разрядника и схема измерения токов.

быть как автоэлектронная эмиссия с поверхности катода  $C$ , так и фотоэмиссия на катоде, происходящая вследствие облучения основного промежутка  $CD$  от разряда в триггерной полости  $AB$  и от паразитных по поверхности диэлектрических стенок разрядника. Слабый ток эмиссии усиливается за счет эффектов полого катода  $C$  и полого анода  $D$ , что приводит к статическому пробое. Ток  $i_{pb}$  регистрируется в нашей системе измерений прибором  $M_3$  ( $i_3 = i_{pb}$ ). Отметим, что при принудительном инициировании разряда из триггерной камеры в основной зазор поступает поток электронов, достаточный для инициирования разряда при напряжении  $V_0 < V_{br}$ , где  $V_{br}$  — напряжение статического пробоя [7].

В предпробной стадии вдоль оси разряда распространяется пучок ионов (ток  $i_+$ ). Данный ток является составной частью тока  $i_{pb}$  и прямо не влияет на величину последнего, однако косвенно он может воздействовать на него. Подробнее мы остановимся на описании этого эффекта ниже. Величина  $i_+$  может быть измерена прибором  $M_1$  в том случае, если отсутствует тлеющий разряд в триггерной камере.

В случае если в триггерной камере горит тлеющий разряд, в промежутке  $BC$  протекает ток  $i_p$ . Данный ток мы назвали паразитным. Он может возникнуть за счет подсветки промежутка  $BC$  от тлеющего разряда. Кроме того, полый электрод  $B$  является анодом по отношению к электроду  $C$ . Следовательно, из полости  $B$  может также извлекаться поток ионов и этот ток является составной частью  $i_p$ . Увеличение паразитного тока в принципе может привести к росту  $i_{pb}$ . Это возможно вследствие возрастания как фотоионизации внутри полого катода  $C$ , так и фотоэмиссии с его внутренней поверхности. Ток  $i_p$  измерялся прибором  $M_2$  в случае, если анодное напряжение  $V_0$  равнялось нулю.

На рис. 1 показан также блокирующий ток  $i_b$ . Формально он, так же как и ток  $i_p$ , протекает между электродами  $B$  и  $C$ . Однако мы выделили его отдельно. Дело в том, что блокирующий потенциал  $V_B$  протекает в полость через боковые отверстия в электроде  $C$ , поэтому ток  $i_b$  замыкается на внутреннюю стенку полости. Иными словами, этот ток переносится зарядами, рожденными внутри полости. Как будет ясно из дальнейшего, именно этот факт обуславливает влияние  $V_B$  на пробивное напряжение. Отметим также, что потенциал  $V_B$  может проникать в полость  $C$  через центральное отверстие и эффект блокировки будет иметь место в этом случае. Этому благоприятствует ионный пучок, который создает своеобразный проводящий мост вдоль оси разрядника. Однако обычные конструкции разрядников имеют достаточно большую толщину дна электрода  $C$ , поэтому влияние  $V_B$  через центральное отверстие не столь существенно. С учетом сказанного можно записать для тока

$$i_2 = i_{pb} - i_+ + i_b = i_p.$$

На рис. 2 представлены зависимости пробивного напряжения разрядника от давления для разных конструкций электродов при наличии и отсутствии разряда в триггерной камере. Кривая 1 соответствует случаю, когда разряд в триггерной камере отсутствует и боковые отверстия в электроде  $C$  закрыты. Точки  $A$  и  $B$  заземлены.

Тот же самый случай, но при горении разряда в триггерной камере, представлен кривой 2. Видно, что напряжение пробоя уменьшается. Если теперь отверстия в электроде  $C$  присутствуют и в полости  $AB$  горит разряд,

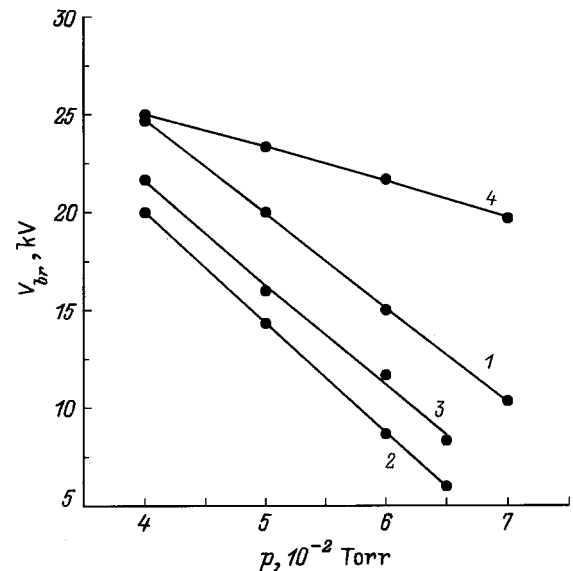


Рис. 2. Зависимость напряжения статического пробоя от давления. 1 — тлеющий разряд между электродами  $AB$  отсутствует; 2 — тлеющий разряд включен, отверстия на боковых стенках  $C$  закрыты; 3 — тлеющий разряд включен, отверстия на боковых стенках  $C$  открыты; 4 — тлеющий разряд включен, в полость  $C$  введены зонды.

Таблица 1.

$p = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}, V_0 = 0$									
Затрудненный разряд								Аномальный разряд	
$V_B, \text{V}$	450	460	500	560	590	670	725	330	350
$i_1, \text{mA}$	0.1	0.2	0.4	0.8	1.0	2.0	3.0	9.6	14
$i_p = i_2, \mu\text{A}$	4	6	8	13	15	23	30	5	6

$p = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}, V_0 = 0$									
$V_B, \text{V}$	355	365	390	420	430	440	295	320	330
$i_1, \text{mA}$	0.1	0.2	0.4	0.8	1.4	1.8	3.7	8.4	14
$i_p = i_2, \mu\text{A}$	3	4	5	6	7.5	8	2	3	5

Таблица 2.

$p = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$								
$V_0, \text{kV}$		0	5	10	15	18	20	24
$V_B = 0$	$i_2, \mu\text{A}$	0	0	0	0	1	2	3
$i_p = 0$	$i_3, \mu\text{A}$	0	0	0	0	1	2	3
$V_B = 340 \text{ V}$	$i_2, \mu\text{A}$	5	5.5	6	8	12	15	Пробой
$i_p = 5 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	1	2	4	7	10	
$V_B = 520 \text{ V}$	$i_2, \mu\text{A}$	9	10	12.5	17	22	26	
$i_p = 9 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	1.5	4	8	13	17	
$V_B = 600 \text{ V}$	$i_2, \mu\text{A}$	15	17	22	28	35	41	
$i_p = 15 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	3	7	14	20	26	

$p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$									
$V_0, \text{kV}$		0	8	10	12	14	16	18	20
$V_B = 0$	$i_2, \mu\text{A}$	0	0	0	0	1	2	3	5
$i_p = 0$	$i_3, \mu\text{A}$	0	0	0	0	1	2	3	5
$V_B = 600 \text{ V}$	$i_2, \mu\text{A}$	4	8	14	22	37	Пробой		
$i_p = 15 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	4	10	18	33			

Таблица 3.

$p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}, V_{br} > 16 \text{ kV}$							
$V_B = 320 \text{ V}$	$V_0, \text{kV}$	0	8	10	12	14	16
$i_1 = 6 \text{ mA}$	$i_2, \mu\text{A}$	4	4.5	4.5	5	8	15
$i_p = 4 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	0.2	0.2	0.8	2.5	8
	$i_b = i_2 - i_3 - i_p$	0	0.3	0.3	0.2	1.5	3
$V_B = 400 \text{ V}$	$V_0, \text{kV}$	0	8	10	12	14	16
$i_1 = 0.2 \text{ mA}$	$i_2, \mu\text{A}$	4	4.5	5	5.5	7	11
$i_p = 4 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	0.3	0.5	0.8	1.5	4
	$i_b = i_2 - i_3 - i_p$	0	0.2	0.5	0.7	1.5	3
$V_B = 490 \text{ V}$	$V_0, \text{kV}$	0	8	10	12	14	16
$i_1 = 1 \text{ mA}$	$i_2, \mu\text{A}$	7	8	9	10	11	16
$i_p = 7 \mu\text{A}$	$i_3, \mu\text{A}$	0	1	1.2	1.5	2	5
	$i_b = i_2 - i_3 - i_p$	0	0	0.8	1.5	2	4

то напряжение пробоя вновь повышается (кривая 3). Таким образом, мы видим эффект действия блокирующего потенциала.

Прокомментируем теперь представленные результаты на основе данных по измерению предпробойных токов. В табл. 1 первые две строки демонстрируют вольт-амперную характеристику разряда в триггерной камере, а третья строка дает ток  $i_p$ . Заметим, что разряд в триггерной камере может гореть в режиме затрудненного разряда и в режиме аномального тлеющего разряда. Более детально эти режимы описаны в работах [5,6]. Паразитный ток, как видно из табл. 1, сильно зависит от напряжения  $V_B$  и слабо зависит от типа разряда в узле поджига. По своей природе это самостоятельный ток с незначительным ионизационным усилением.

Результаты измерения тока ионного пучка  $i_+$  показали, что в геометрии электродов, приведенных на рис. 1, он пропорционален  $i_3$ , мало по абсолютной величине и составляет  $i_+ \lesssim 0.1i_3$ .

В табл. 2 показаны результаты измерения предпробойного тока  $i_3$  и тока  $i_2 = i_3 - i_+ + i_p$  при закрытых боковых отверстиях в электроде  $C$ . Видно, что при отсутствии разряда в триггерной камере предпробойный ток начинает регистрироваться лишь при напряжениях, близких к напряжению статического пробоя. Зажигание разряда приводит к облучению основного промежутка, и предпробойный ток резко возрастает, что и приводит к снижению напряжения статического пробоя. Хотя источник излучения удален от зазора  $CD$ , но предпробойный ток при напряжении на аноде свыше 15 кВ превышает паразитный ток. По своей природе предпробойный ток представляет собой самостоятельный разряд с ионизационным усилением. Ионизационное усиление имеет место благодаря эффекту катодной полости вблизи центрального отверстия электрода  $C$ .

Рассмотрим теперь действие блокирующего электрода. Эти результаты представлены в табл. 3. Боковые отверстия в электроде  $C$  открыты. Видно, что предпробойный ток  $i_3$  значительно уменьшился, а напряжение статического пробоя возросло, что явилось следствием появления блокирующего тока  $i_b$ , который мы вычисляли из соотношения  $i_b \approx i_2 - i_3 - i_p$ .

Таким образом, механизм действия блокирующего электрода состоит в том, что на него протекает ток электронов из полости  $C$ . В результате происходит подавление эффекта полого катода и предпробойный ток в основном зазоре не усиливается. Подчеркнем еще раз, что роль блокирующего электрода — это не просто перераспределение тока  $i_{br}$  между анодом  $D$  и электродом  $E$ , а это подавление предпробойного тока. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что для повышения напряжения статического пробоя необходимо использовать конструкции вспомогательных электродов, позволяющие наиболее эффективно отсасывать заряды из полости основного катода.

На рис. 2 представлены результаты измерений  $V_{br}$  в конструкции, где блокирующие электроды введены

непосредственно в полость  $C$  через боковые отверстия (кривая 4). Хотя здесь горит разряд в триггерной камере, но пробивное напряжение благодаря действию эффекта блокировки оказывается выше, чем для холодного пробоя (кривая 1).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 95-02-03504а).

## Список литературы

- [1] Frank K., Boggash E., Christiansen J. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 2. P. 317–323.
- [2] Mechttersheimer G., Kohler R., Lasser T., Meyer R. // J. Phys. E. 1986. Vol. 19. P. 466–470.
- [3] Gundersen M.A. // Physics and Applications of Pseudosparks. Plenum Press. New York, 1990. P. 331–341.
- [4] Klimenko K.A., Kolesnikov A.V., Korolev Yu.D. et al. // XX Inter. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Contributed papers. Pisa, 1991. P. 492–493.
- [5] Klimenko K.A., Kozyrev A.V., Korolev Yu.D. et al. // XV Inter. Symp. on Discharge and Electr. Insulation in Vacuum. Darmstadt (Germany), 1992. P. 467–469.
- [6] Клименко К.А., Королев Ю.Д., Работкин В.Г. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 19. С. 74–80.
- [7] Клименко К.А., Колесников А.В., Королев Ю.Д. и др. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. № 10. С. 1256–1262.