

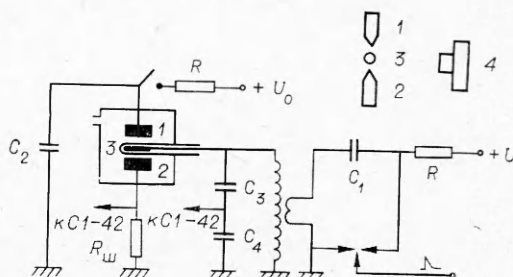
10. Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Снытников В. Н. Измерение скорости диссоциативной рекомбинации в азоте методом оптической интерферометрии. — В кн.: Тезисы докл. Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме. Киев, 1979.
11. Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Посух В. Г. Распределение электрического поля в объемном разряде, контролируемом электронным пучком. — ПМТФ, 1979, № 1.
12. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М., Наука, 1971.
13. Гранштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М., Наука, 1969.
14. Leland W. T. — In: IInd Symposium on Gas Laser Physics. Novosibirsk, 1975. Рус. пер. Леланд В. Т. Короткоимпульсный CO_2 -лазер: связь между параметрами электрического разряда и КПД. — Квант. электроника, 1976, т. 3, № 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ И СТРУКТУРЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В БОЛЬШОМ ПРОМЕЖУТКЕ

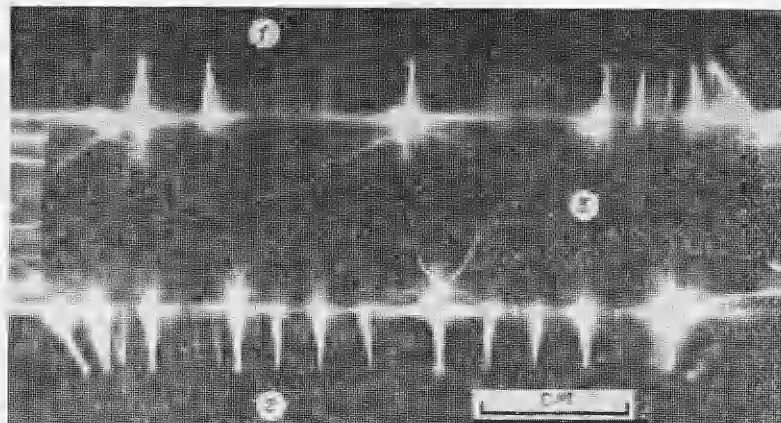
(Ленинград)

Однако природа многоканальной структуры и механизм его развития изучены до настоящего времени недостаточно. Это обстоятельство, а также то, что в [4, 5] БР развивался в большем газовом промежутке и при большей величине и частоте питающего напряжения, послужило основанием для постановки данной работы. В ней исследовалась динамика развития БР, его структура, влияние на его свойства параметров разрядного и питающего контуров, состава газа, а также зависимость времени задержки инициируемого им разряда от напряжения на барьерном электроде.

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1. Внутри камеры, которая могла продуваться аргоном, с зазором 0,8—3 см размещались два плоских основных электрода 1, 2 сечением $4,5 \times 0,8$ см. Концы электродов имели вид клина ($\Rightarrow = 90^\circ$). Между ними находился поджигающий электрод 3 в виде проволоочки $\varnothing 0,15$ см или алюминиевого цилиндра $\varnothing 1$ см, длиной 4,5 см, заключенных в запаивную с одной стороны трубку из кварца с внутренним диаметром соответственно 0,15 и 1 см и толщиной стенки 0,15—0,2 см. Напряжение на него подавалось с повышающего трансформатора, выполненного на трех ферритовых кольцах Ф 1000 с размерами $110 \times 60 \times 15$ мм. Через первичную обмотку ($w = 2$) разряжался конденсатор $C_1 = 0,01$;



Ф и г. 1



Ф и г. 2

0,1 мкФ. Во вторичную обмотку ($w = 20$) трансформировался высокочастотный импульс с частотой соответственно 1,3 и 0,45 МГц, амплитуда его зависела от начального напряжения на C_1 и изменялась от 20 до 60 кВ. БР развивался с поверхности кварцевой трубки 3 на каждый из основных электродов 1, 2 (фиг. 1—3). Клиновидность их предопределяла формирование всех каналов в одной плоскости, что позволило, располагая нормально к ней фотоаппарат 4, сфокусировать на пленке изображения всех каналов. Напряжение U на БР измерялось с помощью емкостного делителя $C_3 = 16$ пФ и $C_4 = 0,015$ пФ (1 : 1000). Для измерения тока I БР и времени задержки инициируемого разряда конденсатора $C_2 = 2200$ пФ использовалось $R_{ш} = 5,1$ Ом, общее для двух разрядных цепей. Напряжение с $R_{ш}$ подавалось на пластины трубки, а с C_4 через линию задержки ($t = 0,3$ мкс) на усилитель осциллографа С1-42.

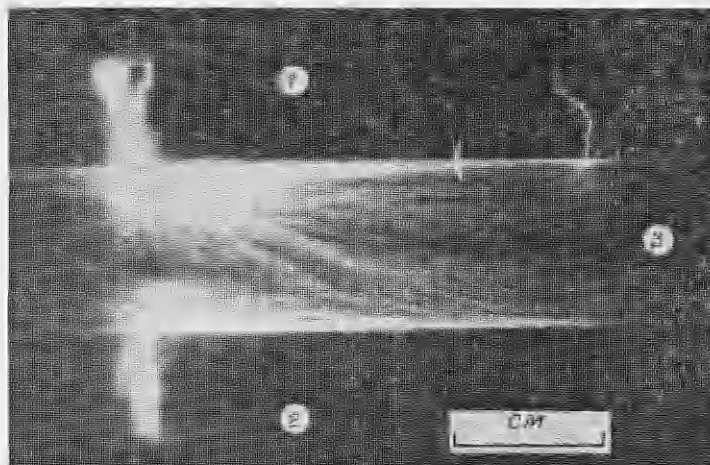
Описание экспериментов. Малые яркости и поперечные размеры каналов БР затрудняют применение СФР-съемки при его исследовании, поэтому его динамика развития получена из сопоставления фотоснимков и осциллограмм I и U для различных экспериментальных условий. Емкость C_2 в этих экспериментах не заряжалась.

Фотографирование свечения БР производилось однократным его экспонированием камерой «Зенит» на пленку изопанхром тип 24 с чувствительностью 5000 ед. ГОСТ (4 на фиг. 1).

На основании фиг. 2 ($C_1 = 0,01$ мкФ, $U = 50$ кВ) можно сказать, что в воздухе начинает развиваться большое число каналов (на некоторых снимках до 20 на сантиметре). Однако число перекрывающих промежутков каналов существенно меньше, и их можно разделить на три типа: диффузные по всей длине, конические с диффузным пятном на диэлектрике и на фоне некоторых из них яркие однородные каналы, оканчивающиеся на диэлектрике фигурой Лихтенберга скользящего разряда (СР). Диффузные каналы возникали, как правило, при напряжениях до 30 кВ и иногда почти сливались на значительной длине электродов. Конические каналы имели место при всех напряжениях до 60 кВ. При $U \geq 30$ кВ для емкости $C = 0,1$ мкФ и $U \geq 40$ кВ для $C = 0,01$ мкФ развивались каналы III типа.

Количество каналов больше зависело от напряжения на барьерном электроде, а их видимый диаметр — от емкости C_1 . Средний интервал между коническими каналами 0,4 см и между каналами III типа 1 см. В аргоне в подобных условиях до конца развивался один канал или два по краям электрода (фиг. 3, $C_1 = 0,01$ мкФ, $U = 50$ кВ).

Осциллограммы тока и напряжения БР в воздухе (фиг. 4, U с задержкой 0,3 мкс) и аргоне были получены для $C = 0,01$ и 0,1 мкФ. Фор-



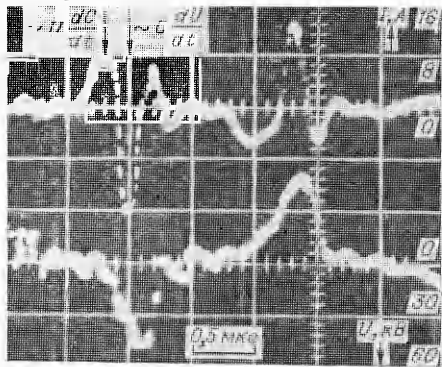
Ф и г. 3

ма I и U указывает на наличие в разрядной цепи двух периодических процессов. Один из них имеет период, зависящий от параметров первичного контура, $T = 0,75$ мкс при $C = 0,01$ мкФ и $T = 2,2$ мкс при $C = 0,1$ мкФ. Затухающие синусоидальные колебания с такими периодами можно наблюдать, когда вторичная обмотка закорачивалась на $R_{ш}$. Вторым процесс связан с развитием БР и последующими затухающими колебаниями с $T = 0,3$ мкс, зависящими от емкости барьера. Причем в случае $C = 0,1$ мкФ БР развивался только во время первого полупериода колебаний в первичном контуре, а в случае $C = 0,1$ мкФ — в течение двух полупериодов. При этом с меньшей емкостью при напряжении до 40 кВ на осциллограммах был только положительный импульс ($\sim U dC/dt$), а с большей емкостью положительный и с интервалом 1,1 мкс отрицательный импульсы при напряжении до 30 кВ. Амплитуды этих импульсов (8 и 6 А на фиг. 4) изменялись пропорционально напряжению на барьерном электроде. С дальнейшим повышением напряжения на осциллограмме появлялись отрицательный импульс тока ($\sim C dU/dt$) при $C = 0,01$ мкФ и отрицательный и положительный импульсы в случае $C = 0,1$ мкФ. Соответственно на снимках появлялись каналы III типа. Амплитуды этих импульсов изменялись быстрее, чем напряжение, и при $U = 50$ кВ составляли 16 и 12 А. Плотность тока в 4—5 таких каналах с суммарной площадью поперечного сечения $5 \cdot 10^{-3}$ см² составляла $3 \cdot 10^3$ А/см², а скорость нарастания тока $> 10^8$ А/с.

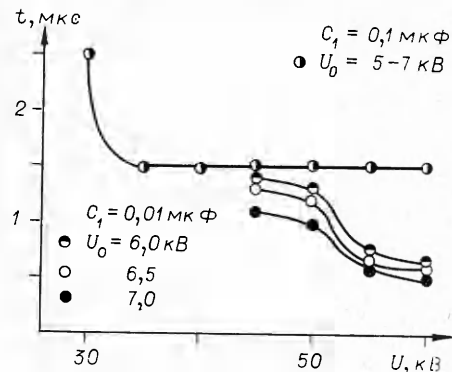
Осциллограммы I и U по форме в воздухе и аргоне были близкими, амплитуды токов изменялись $\sim \sqrt{C_1}$, но при этом в аргоне они были в 2 раза больше, чем в воздухе.

Отсутствие подходящих по электрической прочности материалов с ϵ , значительно превосходящей ϵ кварца, не позволило исследовать влияние удельной емкости барьера на свойства разряда. Влияние же изменения емкости барьера за счет диаметра и длины поджигающего электрода трудно определить, поскольку поле в разрядном промежутке существенно неоднородное. Поэтому можно лишь сказать, что амплитуда тока БР изменяется $\sim \sqrt{C_5}$, а форма практически от нее не зависит.

Эксперименты по определению времени задержки t инициируемого разряда C_2 преследовали две цели: измерить время задержки разряда C_2 в воздухе после подачи импульса поджига на воздушный разрядник в первичной цепи трансформатора (им же запускался и осциллограф) и установить, какая фаза БР ответственна за его инициирование.



Ф и г. 4



Ф и г. 5

Поскольку импульс тока разряда C_2 протекал также через $R_{ш}$, на осциллограмме он накладывался в некоторый момент на ток БР. С увеличением амплитуды напряжения на поджигающем электроде импульс тока разряда C_2 сдвигался на осциллограмме, стремясь к переднему фронту отрицательного импульса тока БР.

Результаты измерения времени задержки инициируемого разряда в зависимости от амплитуды напряжения на поджигающем электроде при различном напряжении на промежутке для двух емкостей $C_1 = 0,01$ и $0,1$ мкФ представлены на фиг. 5, откуда следует, что с ростом амплитуды напряжения на поджигающем электроде время задержки стремится к некоторому минимальному пределу, равному $0,5$ мкс для $C = 0,01$ и $1,5$ мкс для $C = 0,1$ мкФ, и, достигнув его, далее остается постоянным.

Обсуждение результатов. Прежде чем рассматривать полученные результаты, проанализируем специфику пространственного формирования БР в сравнении с обычным искровым разрядом.

Известно, что в разрядном промежутке, образованном металлическими электродами, как правило, развивается один разрядный канал. Это связано с тем, что поверхности проводящих электродов эквипотенциальны, поэтому канал, возникающий первым, понижает разность потенциалов между ними, препятствуя развитию последующих каналов в других точках. В случае БР эквипотенциальность поверхности диэлектрика устанавливается за счет развития по ней СР, но, поскольку его скорость в воздухе невелика $\approx 10^7$ см/с, это будет иметь место только вблизи первых каналов, а на некотором удалении от них начальный потенциал будет сохраняться, и там могут сформироваться каналы, возникшие с задержкой. Поэтому чем больше скорость СР, тем реже каналы, но величина тока в каждом из них возрастает.

Другая особенность БР связана с тем, что последовательно с нелинейным во времени активным сопротивлением имеет место нелинейное емкостное сопротивление промежутка. Действительно, общая емкость промежутка состоит из последовательно включенных емкости диэлектрического барьера и газового промежутка. Диэлектрическая проницаемость кварца в 4 раза выше, чем у газов, а длины использованных газовых промежутков в 3—6 раз больше толщины стенки трубки, поэтому вначале общая емкость определялась емкостью газового промежутка и составляла малую долю емкости барьера. Соответственно подаваемое на электроды напряжение делилось обратно пропорционально емкостям, и в начальный момент практически все падало на газовом промежутке. После его пробоя общая емкость увеличивалась до емкости барьера и все напряжение прикладывалось к диэлектрику.

Поскольку последовательное описание электрической цепи с нелинейными элементами сложно, представим эквивалентную схему разрядного контура в виде генератора, нагруженного на емкость, которая периодически, синхронно с разрядом, изменяется. Заряд, переносимый в такой цепи, $q(t) = C(t) U(t)$, а ток $i(t) = dq/dt = U(t) dC/dt + C(t) dU/dt$. Четкая корреляция между типами каналов на снимках и импульсами тока на осциллограммах и характер зависимости их амплитуды от напряжения позволяют сказать, что первой фазе БР соответствуют диффузные и конические каналы с амплитудой тока в них $\sim U(t) dC/dt$, а второй фазе — каналы с фигурой Лихтенберга СР и амплитудой тока $\sim C(t) dU/dt$.

С учетом изложенного динамику развития БР в воздухе можно представить таким образом. При подаче напряжения на электроды на поверхности диэлектрика возникали поляризационные заряды и из некоторых точек в газе начинали развиваться разрядные каналы. В силу естественного временного разброса в их развитии эквипотенциальность поверхности диэлектрика нарушалась, и возникал СР. В первые моменты при малой напряженности поля в промежутке, а следовательно, и вдоль диэлектрика его скорость была невелика, поэтому развивалось много каналов I и II типа с малой плотностью тока. По мере увеличения проводимости газового промежутка емкость между электродами увеличивалась до емкости барьера, и в течение этой первой фазы БР она заряжалась. С окончанием ее заряда разряд погасал, и емкость всего промежутка уменьшалась до емкости газового промежутка. И, поскольку запасенный заряд, теперь уже избыточный, не мог мгновенно уменьшиться, резко возрастало напряжение на барьере, но теперь оно было уже другой полярности относительно газового промежутка и в противофазе с напряжением на обмотке трансформатора. Поэтому, хотя суммарное напряжение в контуре падало до нуля (см. фиг. 4), скачок напряжения на газовом промежутке приводил к его пробое и возникновению в цепи отрицательного импульса тока, соответствующего второй фазе БР.

Как видно из осциллограммы, длительность второй фазы в 2 раза меньше, а амплитуда тока в 2 раза больше, чем первой, что свидетельствует о равенстве зарядов, перенесенных в цепи за время каждой фазы.

За счет резкого увеличения напряжения возрастала скорость СР, число каналов сокращалось, и весь заряд во второй фазе переносился через несколько каналов III типа. Сокращение длительности импульса тока и числа каналов приводило к значительному увеличению до $3 \cdot 10^3$ А/см² плотности тока и сильному разогреву плазмы. Поэтому в дальнейшем долго сохранялась высокая проводимость каналов, емкость промежутка оставалась неизменной, равной емкости барьера, и в контуре имели место затухающие C , L , R колебания.

В аргоне, судя по качественному сходству осциллограмм I и U , динамика БР аналогична. Увеличение же амплитуды тока и меньшее затухание C , L , R колебаний связаны с возросшей проводимостью каналов разряда, тогда как сокращение их числа объясняется в 2—3 раза большей скоростью СР в аргоне [8].

Изложенные выше представления о двух фазах в развитии БР позволяют понять результаты экспериментов по измерению времени задержки разряда C_2 в воздухе (фиг. 5).

Действительно, поскольку число каналов во второй фазе в 3—4 раза меньше, а амплитуда тока в два раза больше, плотность тока в них в 6—8 раз больше, чем в каналах первой фазы. Поэтому инициирование разряда C_2 осуществляется отрицательным импульсом тока второй фазы, а его передний фронт и есть тот минимальный предел, к которому стремится время задержки с увеличением напряжения на барьерном электроде. Пороговость же этой зависимости определяется характером зависимости амплитуды импульса тока $\sim C(t) dU/dt$ от напряжения. Нужно учесть, что

в задержку входит не только время первой фазы БР, но и время развития пробоя воздушного разрядника после подачи на него запускающего импульса.

Полученные в работе экспериментальные результаты позволили установить, что многоканальность структуры БР связана с естественным временным разбросом возникновения разрядных каналов в различных точках поверхности электродов и условиями развития СР по диэлектрическому барьеру. Чем меньше разброс и скорость СР, тем слабее конкуренция между каналами, тем более однородным будет разряд, переходя в пределе в объемный.

Динамика БР определяется изменением в процессе разряда емкости между электродами, состоящей из емкости барьера и емкости газового промежутка. Амплитуда импульсов тока БР зависит от напряжения на электродах и величины емкости барьера.

Значительная плотность тока в каналах и крутизна переднего фронта импульсов позволяют с его помощью синхронно инициировать большое число автономных разрядов и формировать сильноточные многоканальные разряды.

Автор выражает благодарность В. И. Баюнову и М. И. Демидову за помощь при проведении экспериментов, а И. В. Подмошенскому, В. Я. Александрову и Е. А. Зобову за полезные обсуждения.

Поступила 14 II 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов Ю. В., Емельянов Ю. М., Семиохин И. А. Современные проблемы физической химии. Т. 2. М., изд. МГУ, 1968.
2. Павловская Е. Н., Подмошенский И. В., Яковлева А. В. Излучение барьерного разряда с конденсаторной керамикой. — ЖПС, 1974, т. 20, вып. 3.
3. Виноградов В. Ю., Павловская Е. Н., Подмошенский И. В., Яковлева А. В. Излучение барьерного разряда в азоте и его смесях с гелием. — ЖПС, 1976, т. 25, вып. 4.
4. Александров В. Я., Белошеев В. П. Установка для импульсного фотолиза с протяженным коллективным источником ВУФ-излучения. — ЖПС, 1977, т. 26, вып. 2.
5. Белошеев В. П. Авт. свид. № 641569. Бюл. изобр., 1979, № 1.
6. Белошеев В. П. Формирование многоканального искрового разряда в воздухе. — ЖТФ, 1979, т. 49, вып. 10.
7. Белошеев В. П. Сравнительное исследование одно- и двухканального разряда как источника света. — ЖПС, 1980, т. 32, вып. 3.
8. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. Н., Костоусов В. Д. Исследование длинной скользящей искры. — ПМТФ, 1980, № 1.

УДК 533.95; 538.4; 537.523

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ У ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА В ПОТОКЕ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

В. А. Шувалов

(Днепропетровск)

В работе [1] предложена методика создания около тел в потоке разреженной плазмы путем вдува нейтрального газа с поверхности с последующей ионизацией его электронным ударом искусственных плазменных образований. Понимание взаимосвязи между структурой плазменных образований у поверхности тел и функционированием различных систем представляет значительный интерес.

В данной работе приведены результаты исследования влияния потенциала поверхности тела на форму и структуру плазменных образований, генерируемых около металлического тела в потоке частично ионизованного азота.