

04;12

ИСКРОВОЙ ПРОБОЙ ВОЗДУХА НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

© В.В.Ахмадеев, Л.М.Васильяк, С.В.Костюченко,
Н.Н.Кудрявцев, Г.А.Куркин

Московский физико-технический институт,
141700 Долгопрудный, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 9 марта 1995 г.)

Приведены результаты экспериментов по искровому пробую промежутков от 1 до 10 мм в воздухе при атмосферном давлении импульсами амплитудой 18 кВ, длительностью 25 и 70 нс. Определены энерговыход, динамика вкладываемой мощности, изменение сопротивления искрового канала. Показано, что для создания высокопроводящего искрового канала необходим энерговыход ~ 10 мДж/мм. Приведен спектральный состав излучения искрового канала.

Введение

Использование искрового разряда имеет широкий диапазон приложений. Примером могут служить сильноточные коммутаторы и обострители в импульсной технике, импульсные источники УФ излучения [1,2]. Для повышения эффективности устройств, основанных на искровом разряде, необходимы данные о коммутационных характеристиках искры, данные по энерговыходу в искровой канал и спектральному составу излучения.

В настоящее время лучше исследованы коммутационные характеристики искры: время задержки пробоя, спад напряжения на искровом промежутке и рост проводимости искрового канала. Изменение сопротивления искрового канала можно оценить либо по формулам Теплера или Ромпе-Вайцеля, либо использовать теорию Брагинского [1]. При этом согласие расчетных и экспериментальных коммутационных кривых обусловлено чаще всего эмпирическим подбором неопределенных в теории коэффициентов.

Развитие импульсной техники сделало возможным исследование импульсного пробоя наносекундной длительности при сильном перенапряжении. Такой пробой характерен тем, что время развития разряда становится соизмеримо с временами протекания элементарных процессов в плазме и длительностью пробивающего импульса [3]. Измерения коммутационных характеристик импульсного пробоя совместно с

наблюдением динамики развития канала [4-6] показывают, что спад сопротивления канала обусловлен одновременно несколькими факторами (рост проводимости за счет роста концентрации и температуры электронов, а также гидродинамическое расширение газа), что еще раз подтверждает приблизительность применяемых для расчетов моделей. Энерговклад в искровой канал и излучение из него при импульсном пробое исследованы недостаточно.

В настоящей работе представлены результаты экспериментально-го исследования искрового пробоя воздуха при атмосферном давлении высоковольтными импульсами наносекундной длительности. Цель работы — получение количественных данных по энерговкладу и мощности, выделившейся в искровом канале, исследование коммутационных характеристик искрового пробоя, определение спектрального состава излучения из искрового канала.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Генератор импульсного напряжения 1 (ГИН) вырабатывал высоковольтные импульсы. В работе использовались два генератора: ГИН 1 с амплитудой импульса 1 с амплитудой импульса $U_0 = 18$ кВ, длительностью переднего фронта $t_f = 8$ нс, длительностью импульса на полувысоте $t_{0.5} = 25$ нс и частотой следования импульсов $f = 85$ Гц и ГИН 2 с параметрами импульса $U_0 = 18$ кВ, $t_f = 30$ нс, $t_{0.5} = 65-70$ нс, $f = 2.4$ кГц. Полярность импульсов могла быть положительная и отрицательная.

От генератора импульсы по передающей линии 2 (коаксиальный кабель РК50-11-11 и РК50-24-13) подавались на разрядное устройство 3, которое состояло из двух цилиндрических электродов (3.1, 3.2) (длиной 15 мм, диаметром 6 мм, рабочие торцевые поверхности скруглены с радиусом 3 мм), искрового промежутка между электродами и металлического цилиндрического экрана диаметром 50 мм. Экран был соединен с оплетками подводящего и отводящего кабелей и окружал искровой промежуток и электроды. Межэлектродное расстояние изменялось в пределах 0-15 мм с точностью ± 0.05 мм.

Импульс, прошедший через искровой промежуток, передавался по отводящему кабелю 4 и поглощался в согласованной резистивной нагрузке 5, активное сопротивление которой было равно волновому сопротивлению кабеля $Z = 50$ Ом. Согласование нагрузки с линией про-

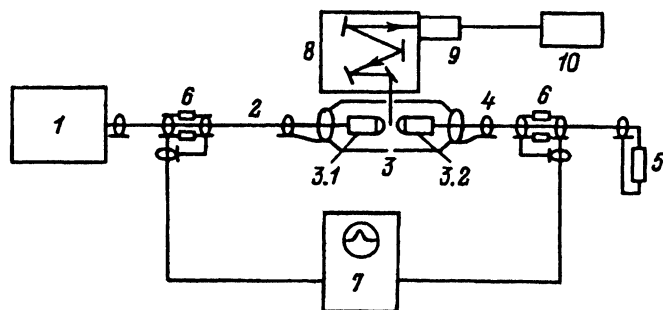


Рис. 1. Схема установки.

верялось по отсутствию отражений тестовых импульсов. При исследовании пробоя с короткозамкнутым электродом электрод 3.2 соединялся с экраном.

Регистрация импульсов тока в передающих линиях производилась широкополосными шунтами обратного тока b , собранными из параллельно соединенных безындуктивных резисторов ТВО-0.25 номиналом 3 Ом в количестве 20 шт. Шунты включались в разрыв оплетки кабеля. Сигналы с шунтов подавались на осциллограф 7 "Tektronix-519", полоса 1 ГГц.

Шунтами обратного тока регистрировались импульсы тока: идущий к разрядному промежутку I_1 , отраженный от искрового промежутка I_2 и прошедший через искровой промежуток I_3 . Длина подводящего кабеля l и расположение шунта на нем выбирались таким образом, чтобы падающий и отраженный импульсы тока были разнесены по времени и не накладывались друг на друга при регистрации их одним осциллографом. Для этого при работе с ГИН 1 шунт на передающей линии находился на расстоянии 7 м от искрового промежутка и при работе с ГИН 2 — на расстоянии 42 м.

Калибровка шунтов осуществлялась по следующей методике. Передающая линия отсоединялась от нагрузки и генератора и заряжалась постоянным напряжением до 7–12 кВ. Напряжение в линии контролировалось электростатическим вольтметром С-196. На конце линии замыкалась на землю наносекундным разрядником РГЛ-2. Бегущий по линии импульс разрядки регистрировался системой диагностики, использованной в последующих экспериментах.

Погрешности при измерении амплитуд электрических сигналов с токовых шунтов составляли 10%, при измерении временных интервалов не превышали 5% от величины горизонтальной развертки осциллографа (20 нс/дел для ГИН 1 и 100 нс/дел для ГИН 2).

Спектр излучения из искрового канала регистрировался в диапазоне длин волн 200–400 нм монохроматором МДР-23 8 и фотоэлектронным умножителем ФЭУ-100 9. Сигнал с ФЭУ через интегрирующую пепочку с временем интегрирования 0.1 с подавался на цифровой вольтметр 10. Калибровка оптического тракта производилась эталонным источником излучения — дейтериевой лампой ДДС-30.

Погрешность измерения относительных интенсивностей спектра излучения искрового разряда составляла 20%.

Методика измерений

Обработывая осциллограммы сигналов I_1 , I_2 , I_3 по методике [7] и используя теорию передающих линий [8], вычислялись следующие параметры: энергозвлад в искровой канал W_s ; напряжение на искровом промежутке $U_s(t)$; сопротивление искрового канала $R_s(t)$; мощность, выделяющаяся в канале, $P_s(t)$. Из теории длинных линий известно, что ток I и напряжение U в кабеле связаны соотношением $U = I \cdot Z$, а мощность $P = I^2 \cdot Z$, где $Z = 50$ Ом — волновое сопротивление кабеля [8]. Энергию импульса произвольной формы можно найти путем интегрирования мощности $W = \int I^2(t) \cdot Z \cdot dt$.

Энергозвлад в искровой канал W_s находился по методике, предложенной в [7], как разность между энергией исходного импульса W_1 и энергиями отраженного W_2 и прошедшего W_3 импульсов

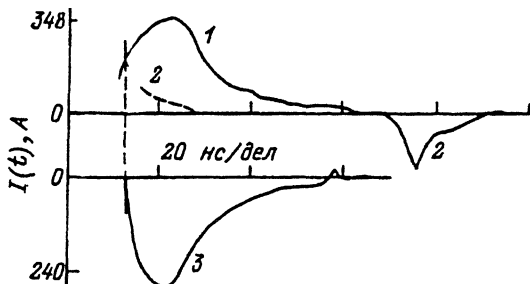


Рис. 2. Характерный вид осциллограмм тока для пробоя от ГИН 1 промежутка с $d = 3$ мм.

1 — импульс тока от генератора; 2 — импульс тока, отраженный от разрядного промежутка; 3 — импульс тока, прошедший через разрядный промежуток.

$W_s = W_1 - W_2 - W_3$. Для данных по энерговыкладу в искровой канал погрешность составляла 15%.

Падение напряжения на искре U_s определялось как разность напряжений на электродах $U_s = U_h - U_3$. Напряжение на высоковольтном электроде 3.1 искрового промежутка U_h находилось согласно теории передающих линий [8] путем синхронизированного сложения напряжения U_1 импульса, идущего к промежутку, и напряжения U_2 импульса, отраженного от промежутка. Для определения U_h фронты падающего и отраженного импульсов совмещались (рис. 2), при этом до начала пробоя напряжение на промежутке было равно удвоенному значению напряжения в падающем импульсе. Напряжение на электроде 3.2 равно напряжению U_3 в линии 4 либо равно нулю в случае, когда электрод 3.2 замкнут на экран. Считается, что импульс напряжения на втором электроде возникает в тот момент времени, когда произойдет пробой промежутка и через него начнет протекать значительный ток. Данный момент определяется по началу спада тока в отраженном импульсе, соответственно начало прошедшего импульса привязываем к этому моменту (рис. 2).

Падением напряжения на индуктивности разрядной системы пренебрегалось. Сопротивление искрового канала R_s , вычислялось из данных по напряжению на искровом промежутке и измеренного прошедшего тока $R_s(t) = U_s(t)/I_s(t)$.

Из-за ограниченной точности совмещения осциллограмм при расчете $U_s(t)$ и $R_s(t)$ погрешность определения этих величин для пробоя от ГИН 1 увеличивалась от 10% в начальный момент времени ($t < 8$ нс) до 80% при $t > 15$ нс. Для ГИН 2 соответственно 10% при $t < 16$ нс и 80% при $t > 28$ нс.

Мощность P_s , выделявшаяся в искровом канале, определялась как $P_s(t) = U_s(t) \cdot I_s(t)$ с погрешностью 20%.

Экспериментальные результаты

Данные по энерговыкладу в искровой канал $W_s(d)$ представлены на рис. 3, где d — расстояние между электродами. Измерения проведены для обоих типов генератора.

Для ГИН 1 пробой исследовался с электродами из латуни и нержавеющей стали. Из рис. 3,а видно, что энерговыклад не зависит от материала электродов и полярности импульса напряжения. Энерговыклад $W_s(d)$ линейно растет при увеличении зазора от 1 до 5 мм и при $d = 6$ мм достигает максимальной величины $W \approx 50$ мДж. При дальнейшем увеличении зазора наблюдается уменьшение энерговыклада в

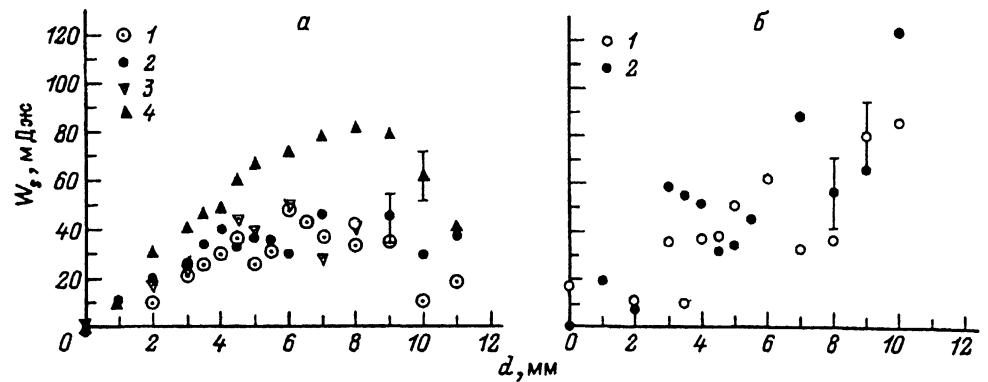


Рис. 3. Энерговклад W_s в искровой канал в зависимости от величины разрядного промежутка d .

a — ГИН 1: 1 — положительная полярность, 2 — отрицательная полярность (латунные электроды), 3 — электроды из нержавеющей стали, 4 — пробой при коротком замыкании; *b* — ГИН 2: 1 — положительная полярность, 2 — отрицательная полярность.

искровой промежутком. При пробое, когда электрод 3.2 был короткозамкнут на экран, линейный рост сохранялся до $d = 8$ мм.

При переходе на ГИН 2 в исследованном диапазоне величин зазора энерговклад постоянно растет с увеличением длины искрового промежутка и при $d = 10$ мм достигает величины $W \approx 100$ мДж. На участке линейного роста энерговклада зависимость $W_s(d)$ для ГИН 1 совпадает с энерговкладом для ГИН 2 в пределах погрешностей эксперимента.

Из зависимостей $W_s(d)$ можно сделать следующие выводы. Совпадение $W_s(d)$ для разных импульсов напряжения показывает, что, несмотря на различие в длительности фронтов и общей длительности

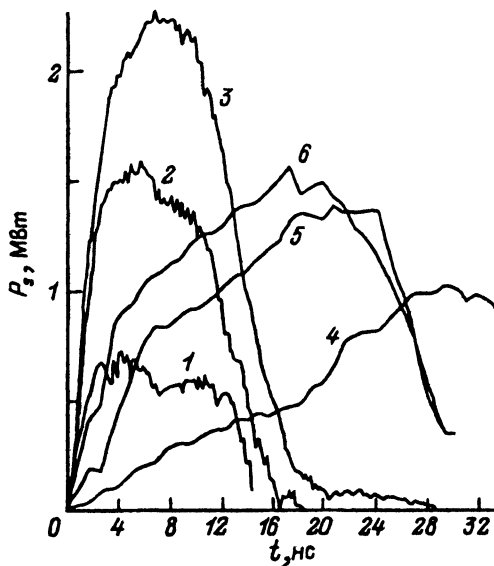


Рис. 4. Мощность P_s , вкладываемая в искровой канал, в зависимости от времени после пробоя разрядного промежутка с кабеля на кабель.

1-3 — $d = 1, 3.5, 5$ мм, импульс положительной полярности от ГИН 1; 4-6 — $d = 1, 3.5, 5$ мм, импульс положительной полярности от ГИН 2.

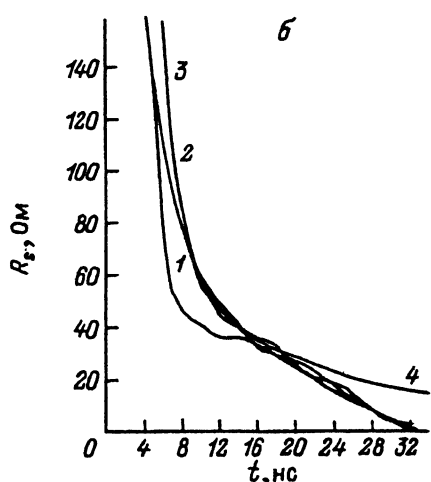
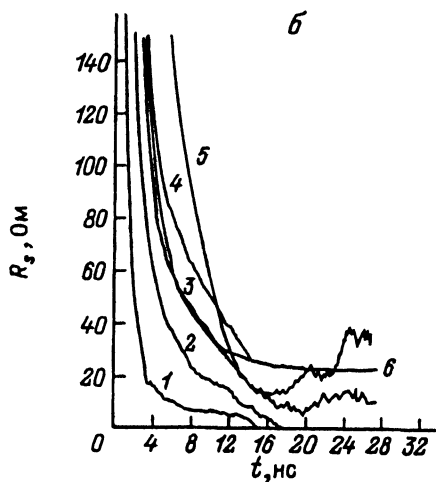
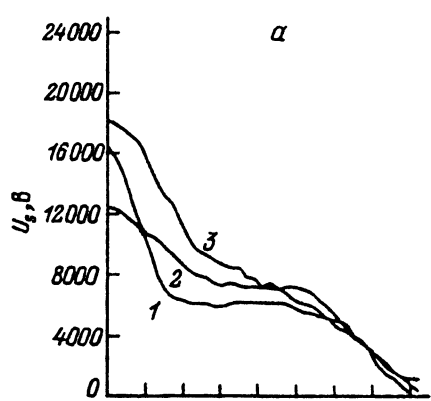
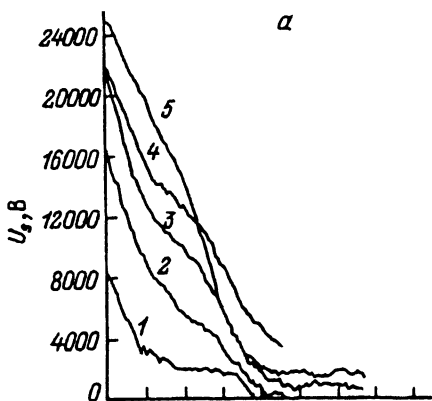


Рис. 5. Напряжение U_s (а) и спад сопротивления R_s (б) на искровом промежутке при пробое с кабеля на кабель импульсом положительной полярности от ГИН 1.

d , мм: 1 — 1, 2 — 3.5, 3 — 5, 4 — 6, 5 — 7, 6 — 5 (расчет по формуле Ромпе-Вайцеля).

Рис. 6. Напряжение U_s (а) и спад сопротивления R_s (б) на искровом промежутке при пробое с кабеля на кабель импульсом положительной полярности от ГИН 2.

d , мм: 1 — 3.5, 2 — 5, 3 — 7, 4 — 5 (расчет по формуле Ромпе-Вайцеля).

импульсов, для создания в промежутке высокопроводящего искрового канала при заданных параметрах разрядного устройства требуется затратить одинаковое количество энергии. Из линейности $W_s(d)$ можно определить необходимое количество энергии как $w_L \sim 10 \text{ мДж/мм}$, где w_L — величина погонной энергии, поглощенной искровым каналом. Если оценить удельный энерговклад, используя значения для диаметра искрового канала из [4] $D \sim 1-2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, получим величину $300-1300 \text{ Дж/см}^3$, что согласуется с работой [4], где удельный энерговклад был 500 Дж/см^3 .

То, что канал при поглощении данного количества энергии становится высокопроводящим, видно из сравнения мощности, выделившейся в канале (рис. 4), и коммутационных кривых (рис. 5, 6). Вклад энергии происходит за время формирования искрового канала, т. е. за вре-

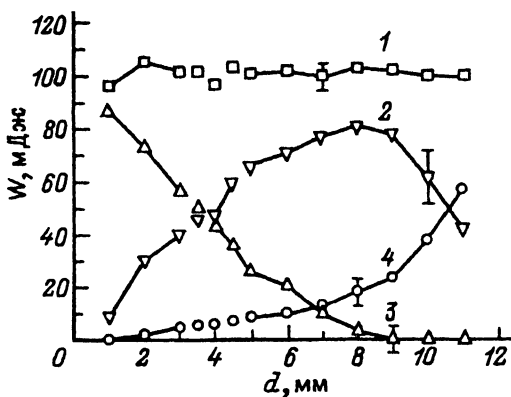


Рис. 7. Распределение энергии W в импульсах при пробое разрядного промежутка от ГИН 1 на короткозамкнутый электрод.

1 — W_1 , 2 — W_3 , 3 — W_s , 4 — W_2 .

мя коммутации. Максимальный вклад энергии происходит, когда сопротивление искрового канала сравнимо с волновым сопротивлением подводящей линии $Z = 50 \text{ Ом}$. При уменьшении сопротивления канала в него меньше вкладывается энергия и электрический импульс проходит в отводящий кабель 4 без заметного поглощения.

Уменьшение энерговклада для ГИН 1 при $d > 6 \text{ мм}$ происходит вследствие уменьшения напряженности поля в промежутке и увеличения времени задержки пробоя так, что все большая часть энергии падающего импульса отражается от промежутка. Энергии оставшейся части импульса не хватает на создание высокопроводящего канала. При коротком замыкании электрода 3.2 происходит удвоение величины прошедшего тока через искровой канал, эффективность вклада энергии растет и поэтому имеются условия для создания высокопроводящего канала для промежутков $d > 5 \text{ мм}$.

Распределение относительных величин энергий отраженного w_2 и прошедшего w_3 импульсов, а также поглощенной искровым каналом w_s энергии для ГИН 1 ($W_1 = 90 \text{ мДж}$) и ГИН 2 ($W_1 = 300 \text{ мДж}$) в максимуме поглощения энергии искрой следующее: $w_2 = 23\%$, $w_3 = 33\%$, $w_s = 44\%$ и $w_2 = 6\%$, $w_3 = 69\%$, $w_s = 25\%$ соответственно. Распределение энергии в импульсах при пробое короткозамкнутого промежутка для ГИН 1 показано на рис. 7. Видно, что в максимуме поглощения энергии искрой $w_2 = 18\%$, $w_3 = 2\%$, $w_s = 80\%$. Из вышеприведенных зависимостей следует, что в случае создания устройств, требующих максимального вклада энергии в искровой канал, необходимо использовать пробой на короткозамкнутый электрод или использовать несколько последовательно включенных искровых промежутков. Когда данный тип искры используется как обостряющее или коммутирующее устройство, то энергия исходного импульса должна быть много больше, чем $W = (10 \text{ мДж/мм} \cdot d \text{ мм})$, для того чтобы можно было пренебречь поглощением энергии в канале.

Спад напряжения на искровом промежутке после пробоя для различных длин разрядного промежутка показан на рис. 5,а и 6,а. Меньшая длительность фронта импульса от ГИН 1 приводит к тому, что при равном искровом промежутке значение начального напряжения пробоя для ГИН 1 выше, чем для ГИН 2. Так как в обоих случаях энерговклад одинаков, то можно сказать, что энерговклад при пробое искрового промежутка в наших условиях не зависит или слабо зависит от перенапряжения.

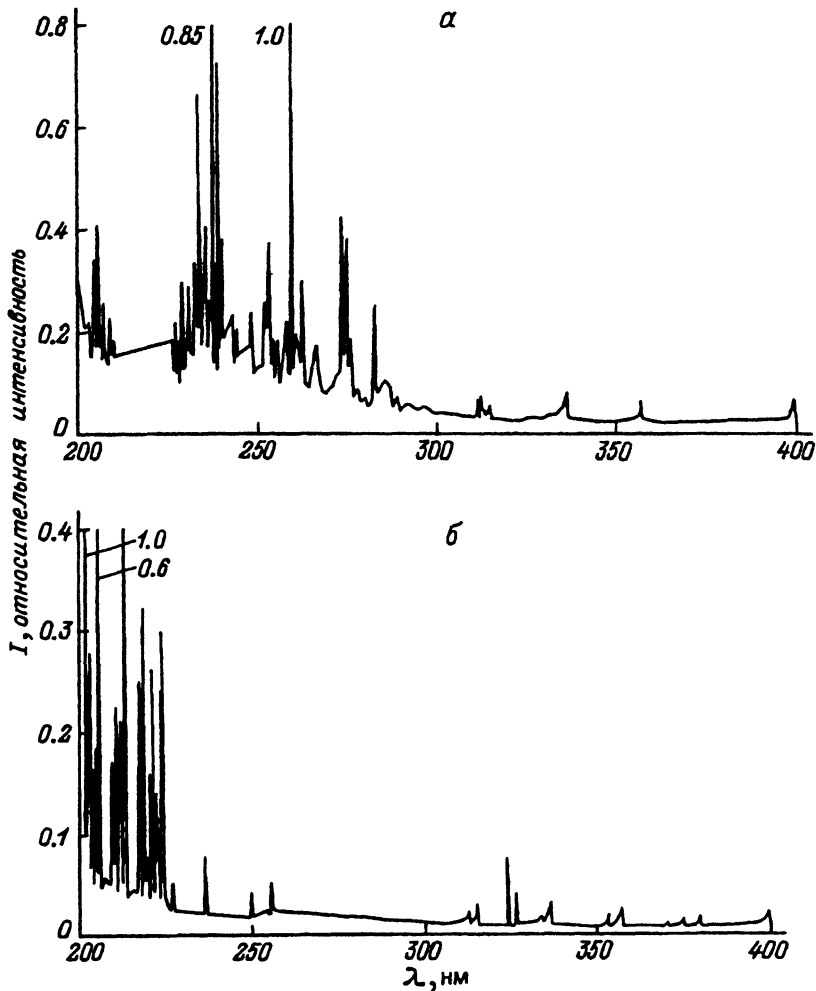


Рис. 8. Спектральный состав излучения из искрового канала при пробое с кабеля на кабель импульсом положительной полярности от ГИН 1.

а — электроды из нержавеющей стали $d = 3.5$ мм, б — латунные электроды $d = 5$ мм.

Время коммутации меньше для ГИН 1, так как пробой происходит при большем перенапряжении на промежутке. При пробое промежутка от ГИН 1 время коммутации лежит в диапазоне 14–16 нс, для ГИН 2 время коммутации варьируется в пределах 28–32 нс.

На рис. 5, б и 6, б показано изменение сопротивления искрового канала от времени. При пробое импульсом от ГИН 1 уменьшение сопротивления происходит быстрее, чем для ГИН 2, но для ГИН 2 сопротивление спадает до меньших величин (порядка единиц Ом), чем для ГИН 1 ($R > 10$ Ом). Разница в конечном сопротивлении канала искры объясняется, по-видимому, различной длительностью пробойного импульса напряжения. При более длинном импульсе (ГИН 2) искровой канал разогревается лучше, что определяет меньшее конечное сопротивление канала искры.

Было произведено сравнение экспериментальных кривых для сопротивления искрового канала $R(t)$ с зависимостями, рассчитанными по формуле Ромпе-Вайцеля,

$$R(i, t) = \frac{d\sqrt{p}}{\sqrt{2a \int_0^t I_3^2 dt}},$$

где p — давление (атм), a — эмпирический коэффициент ($(\text{атм} \cdot \text{см}^2)/\text{В}^2 \cdot \text{с}$).

Хорошее совпадение наблюдается в первые 8 нс после начала пробоя импульсами обеих полярностей от ГИН 1 и импульсом положительной полярности от ГИН 2 для $a \approx 0.35 (\text{атм} \cdot \text{см}^2)/\text{В}^2 \cdot \text{с}$, при отрицательной полярности от ГИН 2 $a \approx 0.7 (\text{атм} \cdot \text{см}^2)/\text{В}^2 \cdot \text{с}$. Для $t > 8$ нс различие может быть объяснено как большими погрешностями эксперимента, так и тем, что более пологий участок коммутационной кривой лучше аппроксимируется формулой Теплера [6].

Относительный спектральный состав излучения искрового канала в области 200–400 нм для электродов из латуни и нержавеющей стали показан на рис. 8. Спектр снимался при работе с ГИН 1.

Наблюдается значительное различие в спектре излучения искрового канала для двух типов электродов. Спектр с латунными электродами имеет набор сильных тонких линий в диапазоне 200–230 нм. Для электрода из нержавеющей стали наблюдается ряд сильных тонких линий в диапазоне 230–280 нм. Для обоих спектров характерно плавное увеличение интенсивности континуума в сторону меньших длин волн. В спектре присутствуют также линии и полосы, характерные для азота и кислорода. Различие в спектральных характеристиках излучения искрового канала связано, по всей видимости, со свечением продуктов эрозии материала электродов.

Закключение

В результате экспериментального исследования искрового пробоя воздуха при атмосферном давлении получены данные по энерговыкладу в искровой канал, динамике вкладываемой мощности, построены коммутационные кривые и спектр излучения из искрового канала. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Энерговклад в искровой канал растет линейно с увеличением зазора между электродами: для пробоя импульсом $t_{0.5} = 25$ нс линейность энерговыклада наблюдается для промежутков от 1 до 5 мм, для импульса $t_{0.5} = 65$ нс линейность соблюдалась от 1 до 10 мм. Энерговклад не зависит от полярности импульса и материала электродов и слабо зависит от перенапряжения на искровом промежутке.

2. На участке линейного роста энерговыклада погонная величина энерговыклада совпадает для обоих типов ГИН. Это объясняется тем, что основная доля диссипируемой энергии идет на образование высокопроводящего искрового канала. При этом погонная энергия, необходимая для этого, постоянна и составляет величину ~ 10 мДж/мм.

3. Для начального момента искрового пробоя $t < 8$ –10 нс изменение сопротивления канала хорошо описывается формулой Ромпе-Вайцеля с эмпирическим коэффициентом $a \approx 0.35 (\text{атм} \cdot \text{см}^2)/\text{В}^2 \cdot \text{с}$.

4. Спектральный состав излучения искрового наносекундного разряда определяется в основном свечением продуктов эрозии материала электродов. Излучение разряда имеет высокую интенсивность в УФ диапазоне.

Список литературы

- [1] Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1979. 176 с.
 - [2] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
 - [3] Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. // УФН. 1972. Т. 107. № 2. С. 201–228.
 - [4] Козырев А.В., Королев Ю.Д., Тинчурин К.А. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 8. С. 1003–1007.
 - [5] Кремнев В.В., Новаковский М.В., Поталицын Ю.Ф. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 10. С. 1285–1290.
 - [6] Басов Г.Ф., Кремнев В.В., Месяц Г.А. и др. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 24. С. 1000–1003.
 - [7] Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Кириллин А.В. и др. // ТВТ. 1975. Т. 13. № 1. С. 40–44.
 - [8] Льюис И., Уэлс Ф. Миллимикросекундная импульсная техника. М.: ИЛ, 1956.
-