

## ОБ ИМПУЛЬСНОМ ВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ В ПРОМЕЖУТКЕ ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ

В. А. Веймер, К. Ф. Куду

Установившейся формой ВЧ разряда на частоте 20 Мгц в разрядном промежутке острие-плоскость является, как известно, факельный разряд. Этот вид разряда развивается из ВЧ вспышки [1, 2]. Особый интерес для выяснения механизма образования высокочастотной вспышки, а также следующего за ней образования факельного разряда, представляет исследование этих явлений в импульсном ВЧ режиме. Суть метода заключается в том, что, подвергая разрядный промежуток действию ВЧ радиоимпульсов высокого напряжения, можно, варьируя в широких пределах длительность импульсов, получать различные фазы развития ВЧ разряда. Ниже приводятся предварительные результаты, полученные предложенным методом.

### Экспериментальная установка

В качестве источника ВЧ колебаний был применен генератор, позволяющий получить колебания в диапазоне частот от 6 до 24 Мгц. В данной работе была использована частота 20 Мгц. Импульсный модулятор для генератора был собран на лампе 6П13С и управлялся импульсным генератором Г5-6А, который мог работать как в периодическом режиме, так и в режиме одиночного запуска. На выходе установка позволяла получать прямоугольные радиоимпульсы амплитудой  $U = 0 \div 15$  кв, длительностью от 5 мксек до 50 мсек с фронтами нарастания и спада менее 3 мксек.

Разрядный промежуток состоял из острия в виде платиновой проволоки диаметром  $d = 1,5$  мм с полусферически обработанным концом и латунного диска диаметром 150 мм на расстоянии 50 мм над острием (см. рис. 1). ВЧ напряжение подводилось от генератора к острию через согласующие контуры (на рис. 1 не показаны) и повышающий контур, состоящий из катушки L и паразитной емкости между острием и «землей». ВЧ напряжение

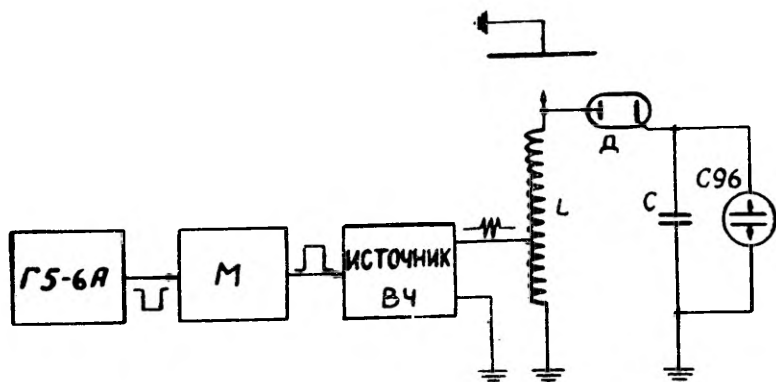


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. Г5-6А — генератор импульсов, М — модулятор, L — катушка повышающего контура, С — измерительный конденсатор, Д — измерительный диод, С-96 — статический вольтметр.

на острие измерялось осциллоскопом ЭО-58М, который был калиброван диодным вольтметром, состоящим из диода марки АГ 1006, статического вольтметра С 96 и конденсатора емкостью в 470 пф. Калибровка производилась в непрерывном режиме. Форма разряда наблюдалась визуально и фотографировалась зеркальной камерой «Зенит-3м» с объективом «Юпитер» светосилы 1 : 1,5.

### Результаты наблюдений

Были измерены пороговые напряжения возникновения ВЧ разряда при различных длительностях радиоимпульсов в интервале от 5 мксек до непрерывного ВЧ сигнала. С точностью до 5% отличия в пороговых напряжениях не наблюдалось. В непрерывном режиме пороговое напряжение оказалось равным 6,8 кв.

В то же время, как показали опыты, форма возникающего разряда сильно зависит как от длительности, так и от амплитуды радиоимпульса.

Была исследована последовательность фаз развития ВЧ вспышек в зависимости от длительности радиоимпульса при их постоянной (7 кв) амплитуде (рис. 2—11).

Для сравнения на рис. 2—11 приведены фазы ВЧ вспышек при одинаковом увеличении (около 4×). Для более детального анализа начальных стадий развития ВЧ вспышек виды разряда при более коротких (5 мксек, 8 мксек и 10 мксек) радиоимпульсах даны при большем увеличении (около 12×) (рис. 2, 3а, 4а)



Рис. 2. ВЧ вспышка  $\tau = 5$  мксек. Увелич. 4х.



Рис. 2а. ВЧ вспышка  $\tau = 5$  мксек. Увелич. 12х.



Рис. 3. ВЧ вспышка  $\tau = 8$  мксек. Увелич. 4х.

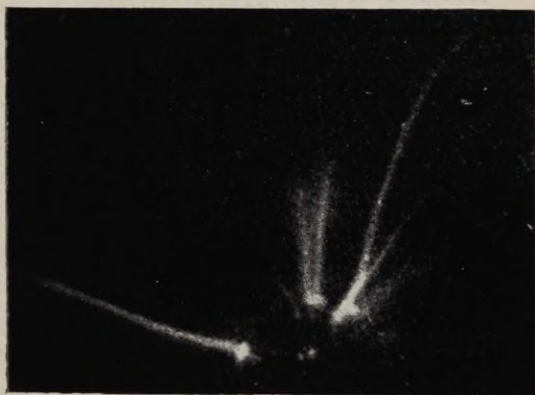


Рис. 3а. ВЧ вспышка  $\tau = 8$  мксек. Увелич. 12х



Рис. 4. ВЧ вспышка  $\tau = 10$  мксек. Увелич. 4х

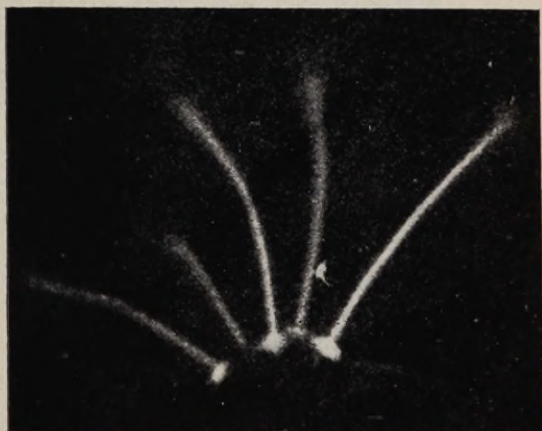


Рис. 4а. ВЧ вспышка  $\tau = 10$  мксек. Увелич. 12х.



Р и с. 5. ВЧ вспышка  $\tau=15$  мксек.  
Увелич. 4 х.



Р и с. 6. ВЧ вспышка  $\tau=20$  мксек.  
Увелич. 4 х.



Р и с. 7. ВЧ вспышка  $\tau=100$  мксек.  
Увелич. 4 х.



Рис. 8. ВЧ вспышка  $\tau=1$  мсек, Увелич. 4 х.



Рис. 9. ВЧ вспышка  $\tau=5$  мсек, Увелич. 4 х.

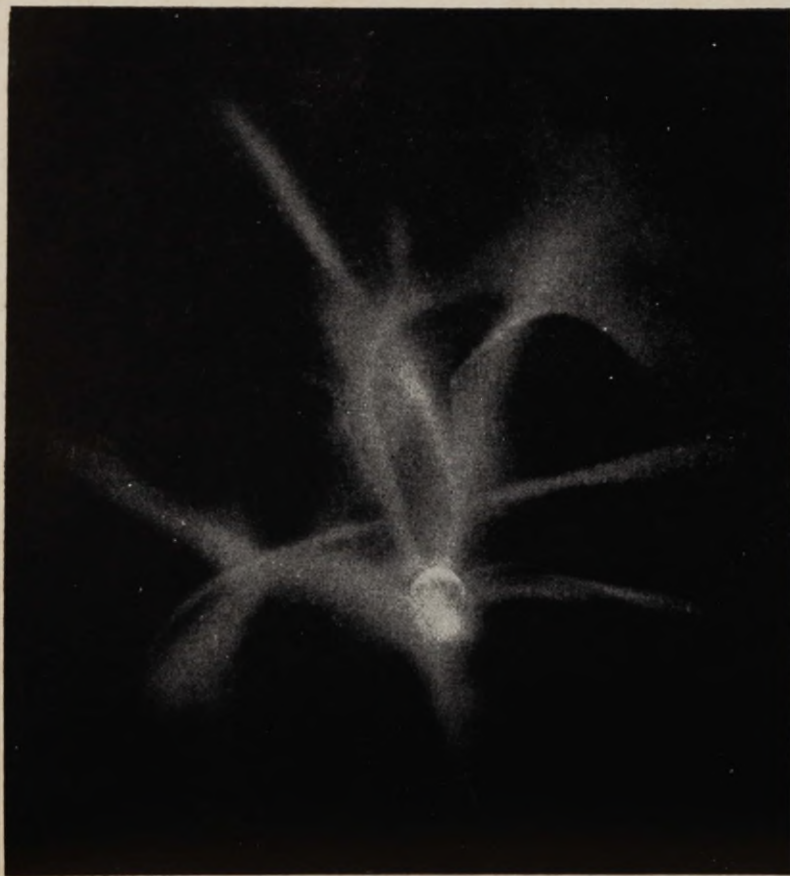


Рис. 10. ВЧ вспышка  $\tau=10$  мсек. Увелич. 4 х.



Рис. 11. ВЧ вспышка  $\tau=50$  мсек. Увелич. 4 х.

При длительности радиоимпульса  $\tau=5$  мксек разряд представлял собой тонкие, снизу слегка утолщенные нитевидные каналы (рис. 2а), которые распространялись вверх перпендикулярно к поверхности острия. Около поверхности острия наблюдались слабо светящиеся, туманные образования, а у основания каналов относительно сильно светящиеся пятна, которые являются, по всей видимости, зародышами электродного пятна. Цвет каналов, а также остальных образований был бледно-голубой.

При  $\tau=8$  мксек (рис. 3а) наблюдается уже значительное развитие отдельных каналов и в некоторых случаях даже разветвление. На основании каждого канала отчетливо видно электродное пятно, яркость которого значительно больше остальных частей вспышки. Несмотря на значительное удлинение каналов вспышки, заметного увеличения их числа не происходит, а первоначально возникшие зародыши каналов (слабые туманные образования на рис. 2а) не развиваются дальше и исчезают.

Интересно также отметить, что при  $\tau=5$  мксек боковых каналов не наблюдалось, хотя и тут уже было заметно веерообразное расхождение концов каналов.

При длительности импульса  $\tau=10$  мксек (рис. 4а) наблюдалось заметное усиление яркости стволов каналов и приэлектродного пятна. Очертания каналов становились четче; туманные, расплывчатые образования у электродов исчезли. Развитие в длину отдельных каналов было почти одинаковым. Однако тут появилась одна существенная деталь. Если ранее концы каналов были заостренными, резкими, то теперь на концах каналов, обращенных вверх от острия, образовались слабо светящиеся расширения, в которых наблюдаются еле заметные разветвления каналов.

При длительности ВЧ вспышки  $\tau=15$  мксек (рис. 5) появляются боковые каналы, направление которых перпендикулярно оси острия. Боковые каналы значительно длиннее вертикальных.

С увеличением длительности импульсов до  $\tau=20$  мксек (рис. 6) происходит заметное увеличение яркости каналов, которые теперь становятся сине-фиолетовыми. Ярче становятся также приэлектродные пятна, приобретая почти белый (с голубоватым оттенком) цвет. При этих условиях голубоватые расширения на концах, обращенных вверх каналов, становятся хорошо видными невооруженным глазом; в них также отчетливо просматриваются контрастные начала разветвлений каналов.

Почти каждой вспышке соответствует появление боковых (одного или нескольких) каналов. Интересно, что на концах боковых каналов расширений нет, нет также разветвлений. Длина этих каналов возрастает до 10—15 мм, их концы часто загибаются вниз.

При длительности импульса  $\tau=100$  мксек (рис. 7) происходит дальнейшее увеличение интенсивности каналов. Боковые каналы удлиняются значительно (до 2 раз), в то время как верти-

кальные каналы лишь на 10—20%. Однако теперь на месте первоначальных расширений видны интенсивные разветвления каналов, окруженные голубоватым ореолом. Цвет каналов становится красноватым, значительно увеличивается размер и интенсивность электродных пятен, которые по-прежнему голубовато-белые. Начинает просматриваться темное пространство между электродным пятном и основанием канала.

При  $\tau = 200$  мксек во вспышке видны каналы двух типов: одни длинные мало разветвленные, другие короче и более разветвлены. Длинные каналы более широкие с нечеткими расплывчатыми краями. В середине каналов просматривается более яркое ядро, которое при  $\tau = 500$  мксек становится еще более ярким и легче наблюдаемым. Окружающая ядро канала диффузная относительно слабо светящаяся область имеет фиолетовую окраску.

С увеличением длительности радиоимпульса до 1 мсек (рис. 7) вокруг острия на расстоянии  $1 \div 1,5$  мм каналы вспышки окрашиваются в оранжевый цвет. Толщина каналов у основания примерно  $1/3 d$ , дальше каналы утончаются до  $1/4 - 1/5 d$ . Интересно появление в некоторых вспышках ярких образований, похожих на капли (рис. 8 справа), на концах относительно более толстых и интенсивных каналов. Из этих образований выходит под разными углами одно или более ответвлений, значительно более слабых, чем первоначальный канал. «Капли» наблюдались на расстоянии не более  $2 - 3 d$  от острия (примерно таким же было расстояние до расширений). Похожие на «капли» образования можно видеть также на рис. 7 (слева, около острия) и на рис. 9 (справа на расстоянии около  $2d$  от острия). «Капель» не наблюдалось в ВЧ вспышках короче 50 мксек.

На рис. 9 видна вспышка при  $\tau = 5$  мсек. Как видно из фотографии, происходит дальнейшее размывание границ каналов, из них начинают появляться диффузные выбросы. Почти все острие покрыто электродным пятном. Вокруг электродного пятна оранжево-желтое зарево, которое простирается на большое расстояние. Яркость вспышки выросла настолько, что при наблюдении через телескопическую лупу ослепляет, что делает трудным наблюдение ее деталей визуально.

При  $\tau = 10$  мсек (рис. 10) \* происходит дальнейшее стирание граней каналов, причем диффузные части отдельных каналов перекрываются, образуя над острием почти сплошное светящееся облако. Хотя пока это облако неправильной, случайной формы, в нем все-таки угадываются линии ядер бывших каналов. Однако

---

\* Для более детального выделения внутренней структуры вспышки фото на рис. 10 и 11 имеют меньшую контрастность, чем остальные фотографии. Вследствие этого на рис. 10 и 11 почти не виден общий, слабо светящийся фон в окрестности вспышки, т. е. в действительности диффузные образования вспышки простираются в разрядное пространство на несколько большее расстояние, чем это видно на фотографиях.

при  $\tau = 50$  мсек (рис. 11) уже образуется язычек факела правильной овальной формы; и, хотя по краям его все еще видны отдельные каналы, центральная часть образует над острием сплошное однородное светящееся облако плазмы. При этом вся верхняя и часть боковой поверхности острия покрыты ярким электродным пятном.

Влияние увеличения амплитуды ВЧ импульсов выражается в том, что при больших амплитудах наблюдаются при той же длительности радиоимпульса более поздние стадии развития ВЧ вспышки. Так форма вспышки при  $\tau = 10$  мсек и  $U_{\text{н}} = 10$  кв была похожа на вспышку при  $\tau = 20$  мсек и  $U_{\text{н}} = 7$  кв. Одновременно происходило увеличение размеров и яркости вспышки. Особенно сильно сказывается влияние перенапряжения (по отношению к пороговому) при очень коротких импульсах ( $\tau = 5 - 10$  мсек). При этих длинах импульсов не каждый ВЧ радиоимпульс сопровождался ВЧ вспышкой. Перенапряжение сильно увеличивало количество возникающих вспышек.

Однако при увеличении длительности радиоимпульса ( $\tau$  порядка миллисекунд) вспышки при повышенном напряжении по своей фазе развития мало отличались от таковых при более низких напряжениях, хотя были более интенсивными и больше по размерам. Образование факела, так же как и при напряжении 7 кв, происходило при длительностях импульсов порядка нескольких десятков миллисекунд.

### Выводы

1. Не было отмечено зависимости порогового напряжения ВЧ вспышки от длительности возбуждающего вспышку радиоимпульса.
2. Развитие ВЧ вспышки начинается из приэлектродной области с появлением тонких слабосветящихся каналов, которые усиливаются, удлиняются и разветвляются с увеличением длительности ВЧ радиоимпульса.
3. Переход из ВЧ вспышки в факельный разряд происходит постепенно с увеличением длительности ВЧ радиоимпульса посредством образования диффузных оболочек вокруг каналов ВЧ вспышек и последующего их объединения в пламя факела. Образование факела при условиях данной работы наблюдалось при длительностях ВЧ радиоимпульсов порядка нескольких десятков миллисекунд.
4. При постоянной длительности радиоимпульса фаза развития ВЧ вспышки зависит от амплитуды ВЧ радиоимпульса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. Куду, О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960.
2. А. А. Кузовников, Исследование ВЧ разряда в диапазоне от 1,5 до 15 Мгц. Автореферат, М., МГУ. 1955.

Поступила 5/VIII 1968 г.

## KÕRGSAGEDUSLIKUST (KS) IMPULSSLAHENDUSEST ÕHUS TERAVIK-PLAAT LAHENDUSVAHEMIKUS

V. Veimer, K. Kudu

### Resümee

Uuriti kõrgsageduslahendust õhus teravik-plaat lahendusvahe-  
mikus, mis oli ergutatud 20 MHz kandevasagedusega raadioimpuls-  
sidega kestusega 5—50000  $\mu$ S.

Saadi kõrgsagedussälvatuse erinevate arengufaaside fotod.  
Uuriti KS-sälvatuse sõltuvust raadioimpulsi amplituudist impulsi  
konstantsel kestusel. Amplituudi suurendamine mõjutab KS-sälv-  
vatuse arengut, kiirendades hilisemate faaside saamist lühematel  
KS-raadioimpulsside pikkustel.

## HF IMPULSE DISCHARGE IN OPEN-AIR POINT-TO-PLANE DISCHARGE GAP

V. Veimer, K. Kudu

### Summary

The authors studied the hf discharge in an open-air point-to-  
plane discharge gap. The voltage of 20 m.c. was modulated by a  
rectangular wave with the duration of 5 to 50 000 microseconds. In  
this way it was possible to cut off the discharge in different phases  
of development. The photos of those phases are herewith presented.  
When the voltage was increased the later phases of discharge  
could develop during the shorter impulses.