

скорость ионного звука. Вероятно, достаточно позднее формирование сверхзвукового плазменного потока, не связанного с убегающими электронами, обусловлено газокинетическим ускорением под действием электронного давления в области разряда у поверхности диэлектрика в результате разогрева плазмы в разряде.

По виду ВАХ сделан вывод о близости по величине ионной и электронной температур в плазме разряда.

Литература

1. Baginski T. A., Thomas K. A. A Robust One-Shot Switch for High-Power Pulse Applications // IEEE Trans. Power Elec. 2009. V. 24. №. 1. P.253-259.
2. Coaker B. M., Xu N. S., Jones F. J., Latham R. V. High-speed imaging of the pulsed-field flashover of an alumina ceramic in vacuum // IEEE Trans. Dielect. Elec. Ins. 1995. V2, Issue 2, P. 210-217.
3. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969, -291 с.
4. Ершов А. П. Метод электрических зондов Ленгмюра. М.: Физический факультет МГУ, 2007, -26 с.
5. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968, -286 с.
6. Чан П., Талбот Л., Турьян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. М.: Мир, 1978, -202 с.

Предельные возможности газового разрядника по времени коммутации при искровом поджиге

*А.Н. Долгов, С.Г. Давыдов, А.А. Козлов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов
Москва, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», ул. Суцневская 22
vniia@vniia.ru*

Проанализированы результаты многочисленных экспериментов с малогабаритными газовыми разрядниками с искровым и оптическим поджигом. Показаны возможности достижения времени коммутации в пикосекундном диапазоне.

Top shortening of commutation time in gas spark gap. A.N.Dolgov, S.G.Davydov, A.A.Kozlov, V.O.Revazov, R.Kh.Yakubov. Resultes of numerous experiments with small scale spark gaps operated by electrical or optical energy impulses are analyzed. Possibilities to achieve commutation times of picosecond range are demonstrated.

Принципиальные конструкции малогабаритных разрядников с искровым поджигом и оптическим управлением, используемые в настоящее время в вакуумном исполнении [1,2] (низкого давления газа), представлены на рис.1 и рис.2. При проведении экспериментов диэлектрические оболочки разрядников откачивались до требуемого давления остаточных газов. Анод каждого из разрядников находится под постоянным напряжением 4 кВ. Для инициирования процесса коммутации **ИР** на поджигающий электрод подается положительный относительно катода (катод заземлен) импульс напряжения амплитудой 3,5 кВ и крутизной $(1-2) \cdot 10^9$ В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы и плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод-анод, т.к. промежуток закорачивается – происходит коммутация прибора [3]. Для инициирования процесса коммутации **РОУ** на поверхности катода фокусируется импульс оптического излучения энергией несколько миллиджоулей и длительностью ~ 10 нс (на полувысоте), что повышает в пятне фокусировки интенсивность излучения до $\sim 10^9$ Дж/см². Образующаяся плазма закорачивает промежуток катод-анод [4].

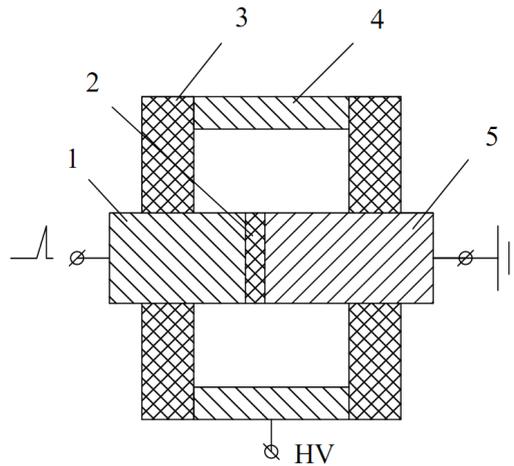


Рис.1. Конструкция искрового разрядника (ИР): 1 – поджигающий электрод, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – диэлектрическая оболочка, 4 – анод, 5 – катод.

Физические процессы, приводящие к коммутации **ИР** и **РОУ** во многом, если не в основном, аналогичны. Причина этого обстоятельства в том, что близки по своим параметрам источники плазмы в **ИР** и **РОУ**. Плотность потока энергии в катодном пятне искрового разряда достигает (не усредненная по катодному пятну, а взятая для отдельного центра взрывной эмиссии электронов) $\sim 10^9$ Вт/см², т.е. близка к интенсивности оптического излучения в пятне фокусировки (стоит отметить – при скромных габаритах современного источника излучения, вполне сравнимых с размерами импульсного источника высокого напряжения для **ИР**), которое также как и центры взрывной эмиссии располагается на катоде. Результаты выполненных исследований показали, что параметры образующейся в обоих случаях плазмы действительно идентичны.

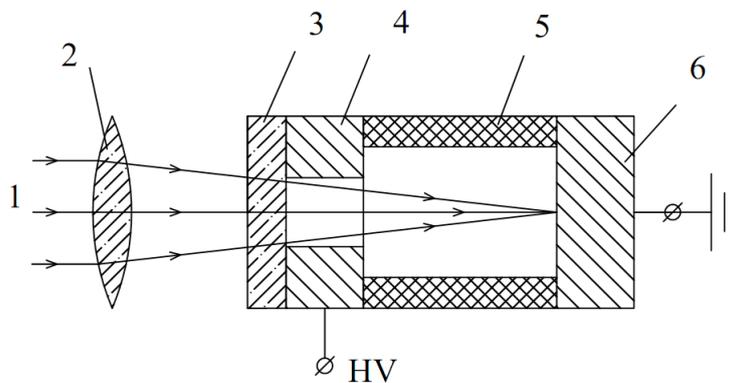


Рис.2. Конструкция разрядника с оптическим управлением (РОУ): 1 – пучок излучения, 2 – фокусирующая линза, 3 – оптически прозрачное окно, 4 – анод, 5 – диэлектрическая оболочка, 6 – катод.

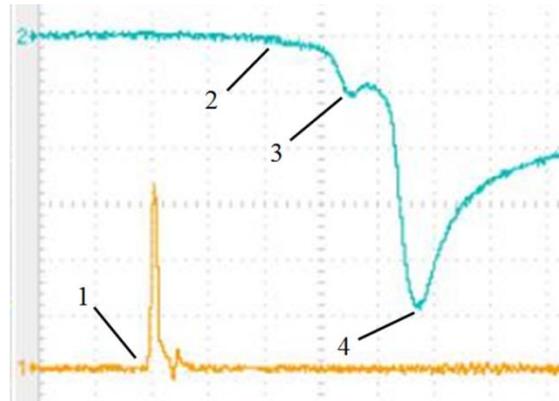


Рис.3. Характерные осциллограммы процесса коммутации тока в вакуумном РОУ с указанием выделенных точек на осциллограмме: 1 – старт лазерного импульса; 2 – момент появления в разрядной цепи тока, заметного по величине при сравнении с амплитудным значением; 3 – особенность на осциллограмме: а) излом, б) всплеск; 4 – момент достижения максимума тока в контуре. Луч №1 (желтый) – интенсивность лазерного излучения, луч №2(зеленый) – сила тока в разряде. Развертка – 50 нс/дел.

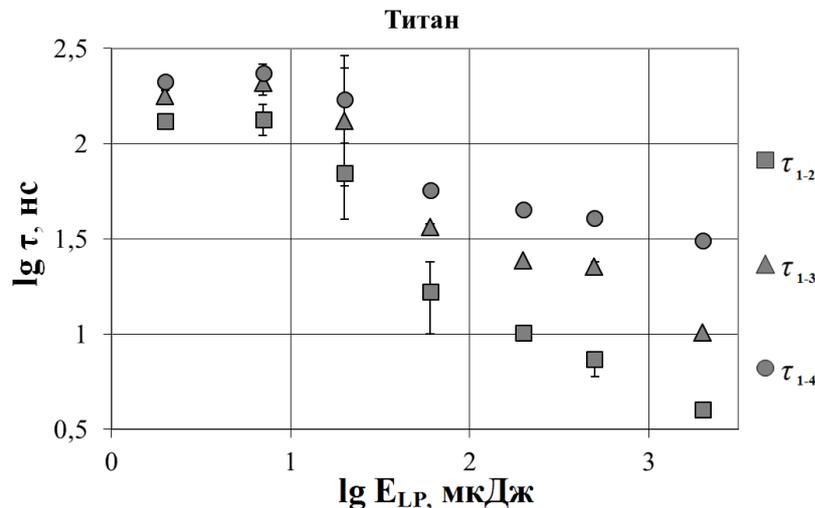


Рис.4. Зависимость временных параметров процесса коммутации тока в вакуумном РОУ от энергии управляющего импульса излучения. Указан материал катода.

По результатам измерений временных параметров процесса коммутации разрядного промежутка в вакуумном РОУ (рис.3) при различной энергии импульса управляющего излучения E_{LP} и неизменной длительности импульса излучения и площади пятна фокусировки оптического луча, были построены графики зависимости продолжительности соответствующих временных интервалов τ_{1-2} , τ_{1-3} , τ_{1-4} от величины E_{LP} (рис.4). Отметим, что зависимости $\tau_{1-2}(E_{LP})$, $\tau_{1-3}(E_{LP})$, $\tau_{1-4}(E_{LP})$ имеют практически идентичный вид. При относительно малых E_{LP} в диапазоне 2-20 мкДж (что соответствует интенсивности излучения в пятне фокусировки $q=3 \times 10^6 - 3 \times 10^7 \text{ Вт/см}^2$) временные интервалы τ_{1-2} , τ_{1-3} , τ_{1-4} меняются сравнительно слабо или даже в пределах случайной погрешности остаются неизменными. С ростом E_{LP} выше некоторого порогового значения длительность указанных временных интервалов начинает достаточно быстро сокращаться. Однако рост E_{LP} выше примерно 10 мДж ($q \approx 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ и выше) будет означать значительное увеличение габаритов источника излучения, с одной стороны. А с другой – при столь высоком уровне интенсивности излучения для уменьшения времени коммутации предпочтительнее будет использовать взамен разрядника низкого давления (вакуумного) разрядник высокого давления с использованием эффекта оптического пробоя газа.

С ростом давления наблюдается ускорение процесса коммутации, т.е. роста проводимости в межэлектродном промежутке РОУ (рис.5).

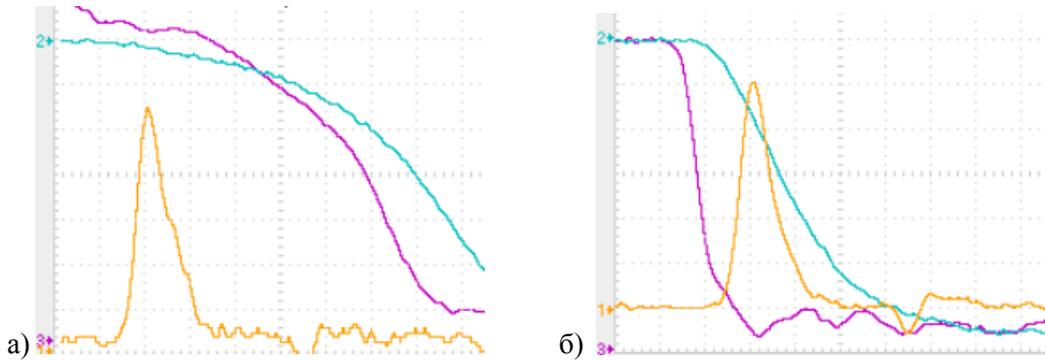


Рис.5. Давление остаточного газа: а) примерно 10^{-2} Па, б) примерно 10^0 Па; интенсивность излучения – 3×10^9 Вт/см², расстояние между электродами – 3 мм. Зарядное напряжение – 150 В, амплитуда тока – 2,8 А. Луч №1 (желтый) – интенсивность излучения, луч №2 (зеленый) – ток в разряде, луч №3 (розовый) – напряжение на разрядном промежутке. Развертка – 5 нс/дел.

При $P \approx 10^{-2}$ Па получаем $\tau_{1,2} \approx 35$ нс. При $P \approx 10^0$ Па получаем $\tau_{1,2} \approx 10$ нс. При $P \approx 10^5$ Па можно ожидать $\tau_{1,2} \approx 0,3$ нс. В этом случае разрядник можно будет без использования эффекта оптической искры применить для получения управляемых электрических импульсов пикосекундного диапазона.

Исследования зависимости временных параметров ИР от различных параметров проводились с использованием макета разрядника в варианте с двойным катодом (рис.6). Результаты проведенных исследований отражены на рис.7.

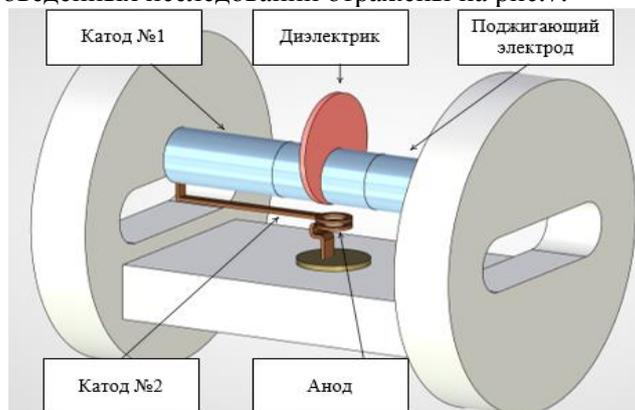


Рис.6. Изображение макета ИР в варианте с двойным катодом.

Наблюдается два типа развития разряда: быстрый для расстояния 2,5 мм от узла поджига до промежутка катод №2-анод, и медленный для расстояний от узла поджига до указанного промежутка в интервале значений 4 - 68 мм. Время задержки возникновения дугового разряда для разряда быстрого типа при давлениях остаточного газа $P > 10^{-3}$ Па обнаруживает зависимость от давления. При промежутке катод №2-анод равном 2 мм и расстоянии от данного промежутка до узла поджига 2,5 мм при давлении остаточного газа $P \approx 10^{-2}$ Па время образования проводящей среды (время задержки возникновения дугового разряда) составляет $\tau \approx 150$ нс, при давлении $P \approx 10^0$ Па - $\tau \approx 60$ нс. Если предположить, основываясь на результатах экспериментов, что $\tau = f(\lg P)$ – линейная функция, то при $P \approx 10^5$ Па можно ожидать $\tau \approx 4$ нс. В разряднике без двойного катода (рис.1) при расстоянии катод-анод равном 1 мм

проводящая среда формируется примерно за 15 нс (при давлении $P \leq 10^0$ Па). С увеличением энергетики можно ожидать перехода в область величин времени задержки, т.е. времени формирования проводящей среды, менее 1 нс. В этом случае разрядник можно будет использовать в качестве обострителя переднего фронта импульса напряжения.

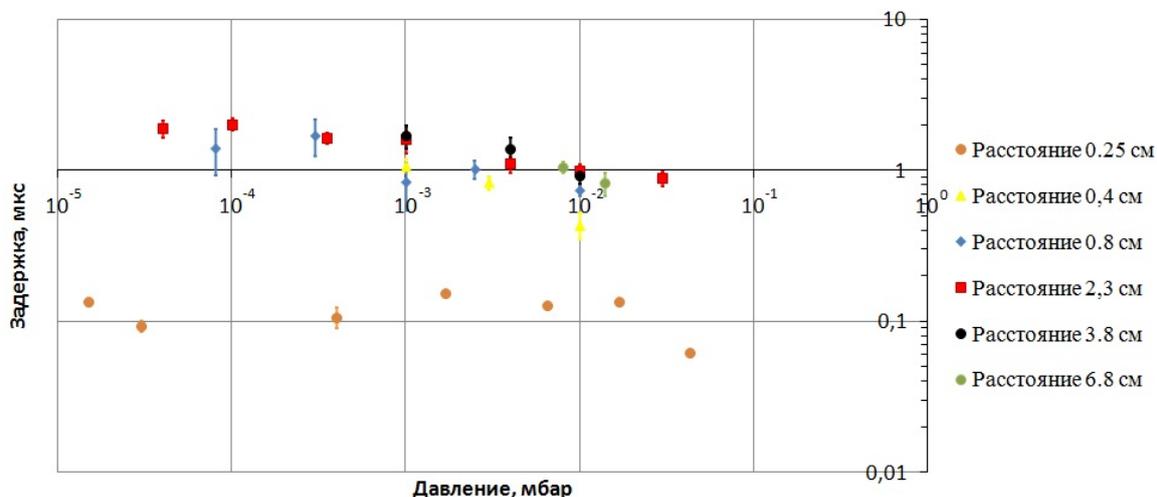


Рис.7. Зависимость задержки возникновения дугового разряда в ИР от давления остаточных газов при различных расстояниях от узла поджига до основного разрядного промежутка. Расстояние между катодом №2 и анодом равно 2 мм.

Энергетика поджига ИР в ранее проведенных экспериментах составляла $\sim 0,01$ мДж. Чтобы увеличить энергетику до уровня ~ 1 мДж (соответствующего уровню энергетики РОУ) надо увеличить коммутируемую разрядником емкость, обеспечивающую начальную стадию разряда, т.е. его возникновение, от $\sim 10^{-11}$ Ф (емкость системы электродов в узле поджига, разделенных диэлектрической шайбой) до $\sim 10^{-9}$ Ф. При вполне достижимой индуктивности $L \sim 10^{-7}$ Гн длительность импульса тока тогда составит примерно $T/2 = \pi(LC)^{1/2} \approx 30$ нс. Придется использовать двухступенчатую схему (иначе не хватит энергетики цепи, выдающей поджигающий импульс, или придется существенно увеличивать ее габариты): емкость $\sim 10^{-9}$ Ф, заряженная, например, до 3,5 кВ, коммутируется вакуумным разрядником первой ступени и разряжается через узел поджига разрядника высокого давления второй ступени.

Дальнейшие исследования покажут, возможно ли осуществить коммутацию искрового разрядника с временем задержки пикосекундного диапазона по предлагаемой схеме.

Литература

1. Асюнин В.И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2014.Т.2. № 6. С.605.
2. Каторов А.С., Ревазов В.О., Селезнев В.П., Ядровский А.И. Миниатюрный быстродействующий импульсный разрядник с оптическим управлением. – Технологии ЭМС – 2018. – Т. 66. – № 3. – С. 35–42.
3. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. // ПТЭ. 2004. №3. С. 94.
4. Xiaopo Mao, Zhenghao He, Xinya Xu, Ying Wang, Wenfang Fan, Huazhong Lin, Siqi Song, and Yuqing Wang. Research on the Time-Delay Characteristics of the Laser-Triggered Vacuum Switch. IEEE Transactions on plasma science, vol. 43, no. 6, June 2015.