

03;04;10

Особенности формирования начальной стадии субнаносекундного импульсного электрического пробоя газовых промежутков высокого давления

© С.Н. Иванов, Е.А. Литвинов, В.Г. Шпак

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: stivan@iep.uran.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2006 г.

Экспериментально и теоретически исследованы предпробойная и начальная стадии коммутации перенапряженных газовых промежутков высокого давления под действием высоковольтных импульсов напряжения субнаносекундной длительности. Пробой наблюдался как ярко светящаяся вспышка, практически однородно заполняющая межэлектродный промежуток за время порядка 100 ps. При интерпретации экспериментально наблюдаемых явлений учитывались разогрев электронов за счет соударения с молекулами газа и ионизация газа электронным ударом. Расчеты показали, что ионизация газа осуществляется „горячими“ электронами и носит ступенчатый характер или характер вспышки, что хорошо коррелирует с экспериментом. Характерное время процесса ионизации 10–20 ps. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что на газовых коммутаторах высокого давления можно получать импульсы напряжения с фронтами в несколько десятков пикосекунд.

PACS: 51.50.+v

Введение. Изучение механизмов инициирования импульсного электрического пробоя при давлениях газа в десятки атмосфер представляет особый интерес для понимания физики газового разряда и его возможных практических применений. В работе [1] отмечено, что наиболее короткие фронты при генерировании высоковольтных импульсов напряжения получены именно на газовых коммутаторах высокого давления. Несмотря на то что разрядники высокого давления широко используются в электрофизической аппаратуре, исследование закономерностей формирования импульсного электрического пробоя в газах в субнаносекундном диапазоне заметно отстает от практического

применения. В Институте электрофизики УрО РАН за последние 15 лет разработана и успешно эксплуатируется серия субнаносекундных генераторов напряжения РАДАН [2]. С использованием этих генераторов нами проведены эксперименты по регистрации свечения, сопровождающего предпробойную и начальную стадии коммутации газовых промежутков (азот, 30–40 atm) под действием ультракоротких импульсов напряжения. Предложены модели развития пробоя на начальной стадии (в первые несколько сотен ps) его развития. Сделаны оценки перспектив использования газовых коммутаторов высокого давления при генерировании высоковольтных импульсов с пикосекундными фронтами.

Эксперимент. Эксперименты проводились на установке [3,4], созданной на базе малогабаритного генератора импульсов напряжения РАДАН-303 [5], позволяющей проводить синхронную регистрацию субнаносекундных импульсов высокого напряжения, прикладываемых к газовому промежутку, с электронно-оптической хронографией свечения, сопровождающего предпробойные и пробойные процессы в промежутке. Высокоскоростная электронно-оптическая хронография [6] в настоящее время является единственным методом, позволяющим определить область зарождения пробоя внутри разрядного промежутка и динамику ее развития.

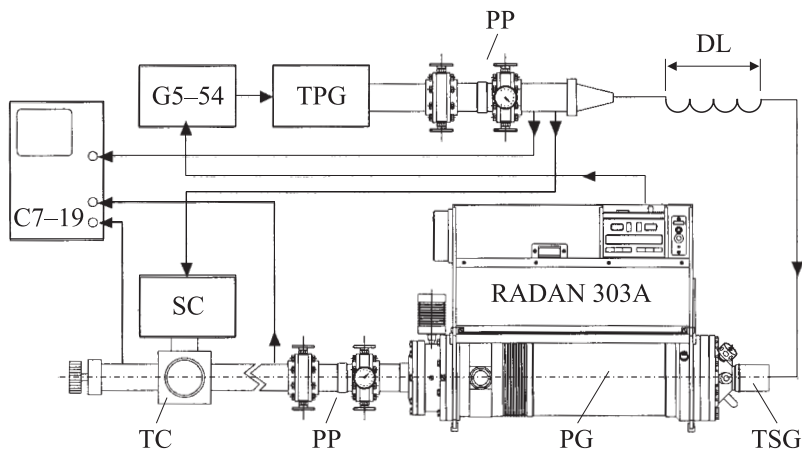


Рис. 1. Блок-схема экспериментального комплекса. TPG — генератор высоковольтных запускающих импульсов; DL — высоковольтная линия задержки 50 ns; SC — электронно-оптическая камера „АГАТ-СФ3М“, G5-54 — генератор Г5-54.

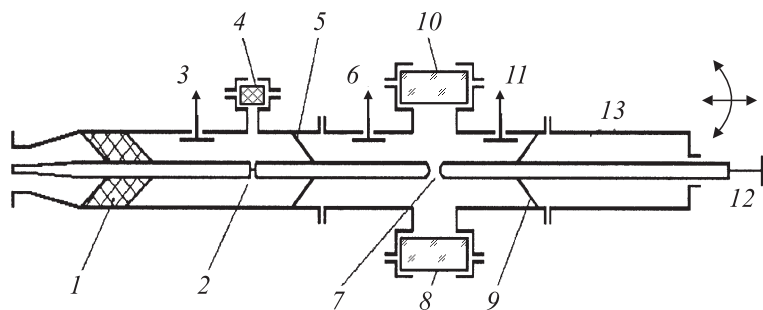


Рис. 2. Испытательная камера: 1 — входной изолятор; 2 — обостряющий зазор; 3, 6 и 11 — емкостные делители; 4 — окно диаметром 10 мм (оргстекло); 5, 9 — поддерживающие изоляторы; 7 — тестовый газовый зазор; 8, 10 — окна диаметром 20 мм (стекло); 12 — механизм перемещения электрода; 13 — 50-Ω коаксиальная линия.

Основой экспериментальной установки (рис. 1) является импульсный генератор (РГ) РАДАН-303А, оборудованный электрически управляемым трехэлектродным разрядником с искажением поля (ТSG). Как было показано в работе [7], такой ТSG обеспечивает точность включения РГ до 200 пс. На выходе РГ установлен обостритель импульсов (РР) с обостряющим и срезающим азотными разрядниками высокого давления [8]. Полученный субнаносекундный импульс подается в испытательную камеру (ТС) с газоразрядным промежутком (давление газа до 100 атм). Специально разработанная схема прецизионной синхронизации [9,10] не только обеспечивает субнаносекундную синхронизацию РГ и измерительной аппаратуры (скоростной осциллограф С7-19, электронно-оптическая камера „АГАТ-СФЗМ“), но и позволяет стабилизировать выходное напряжение наносекундной ступени РГ на уровне долей процента, а следовательно, и жестко зафиксировать амплитуду импульсного напряжения на пробойном промежутке, что очень важно для правильной интерпретации экспериментальных результатов.

Испытательная камера (рис. 2) представляет отрезок 50-Ω коаксиальной газонаполненной линии с дополнительным обостряющим и исследуемым газоразрядными промежутками, выполненными в виде разрывов центрального электрода. Дополнительный обостряющий зазор фиксирован. Плавная регулировка межэлектродного расстояния исследуемого промежутка (позиция 7, рис. 2) осуществляется без разгерметизации

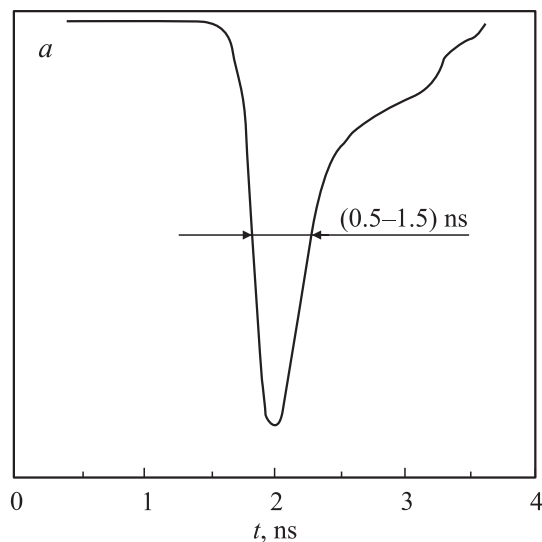


Рис. 3. Импульс высокого напряжения (*a*); конфигурация электродов и карта эквипотенциалей электрического поля в разрядном промежутке, Z — ось симметрии системы катод–анод (С–А) (*b*); развернутая во времени фотография свечения, сопровождающего пробой газового промежутка шириной $d = 1.42$ mm при давлении 40 atm (*c*).

корпуса. Герметичный узел регулировки зазора (позиция 12, рис. 2) обеспечивает точность установки зазора 0.05 mm. Камера согласована по волновому сопротивлению с коаксиальной линией, имеющей длину, достаточную для обеспечения временной развязки наблюдаемых разрядных процессов от влияния отражений на короткозамкнутом конце системы. Напряжение на промежутках регистрируется с помощью широкополосных емкостных делителей, встроенных в коаксиальный тракт камеры.

В качестве исследуемого газа был выбран технический азот, как наиболее часто используемый в разрядниках высокого давления газ. Давление газа менялось в пределах 30–40 atm. На газоразрядный промежуток подавался импульс высокого напряжения (рис. 3, *a*) с фронтом 300–400 ps по уровням 0.1–0.9 и шириной на полувысоте 0.5–1.5 ns. При этом скорость нарастания напряжения на фронте

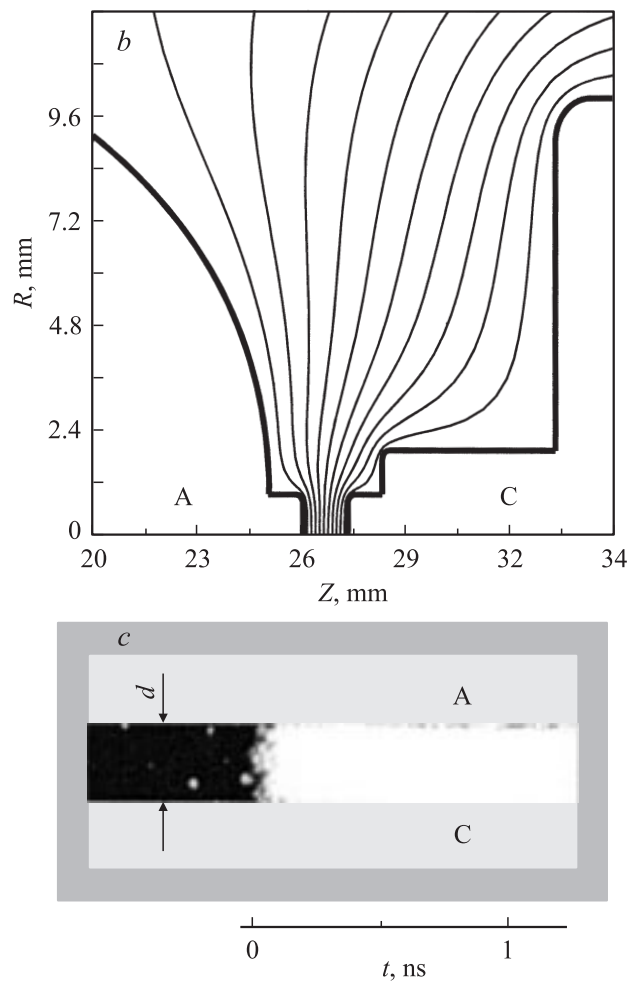


Рис. 3 (продолжение).

импульса составляла $(4-5) \cdot 10^{14}$ V/s. Измерения проводились осциллографом С7-19, переходная характеристика которого ограничена на уровне 300 ps кабельной линией задержки.

Конфигурация электродов разрядного промежутка и распределение электрического поля в газовом зазоре показаны на рис. 3, *b*. Пробой газового промежутка происходил у края выступающих с поверхности катода и анода цилиндрических выступов диаметром 2 мм. Эти выступы предназначены для пространственной привязки канала пробоя к зоне глубины резкости электронно-оптической камеры „АГАТ-СФЗМ“, которую мы использовали для фотографирования свечения, сопровождающего предпробойные и пробойные процессы в газовом промежутке. Электроды были выполнены из меди. Измерения проводились только после тренировки поверхности электродов несколькими сотнями импульсов высокого напряжения. Для расчета распределения электрического поля использовалась интерактивная программа для расчета электронных пушек SAM [11]. Радиус кромки катода принимался равным 0.2 мм. Расчетное значение нормальной компоненты электрического поля (рассчитанное по амплитуде импульса) на плоскости наиболее выступающей части катода менялось в пределах $E_1 = 0.9\text{--}1.4\text{ MV/cm}$, у кромки катода — $E_2 = 1.7\text{--}2.4\text{ MV/cm}$.

На рис. 3, *c* представлена типичная фотография свечения, сопровождающего пробой газа, развернутая во времени в направлении, параллельном плоскости электродов. Яркое свечение быстро ($< 100\text{ ps}$) заполняет весь межэлектродный промежуток. Эффективная скорость перекрытия промежутка свечением превышает $1.4 \cdot 10^9\text{ cm/s}$. При этом в деталях рассмотреть на фотографиях самую начальную стадию формирования пробоя (в первые 100 ps) не удастся, поскольку ее длительность становится соизмеримой с временным разрешением электронно-оптической камеры.

Модель начальной стадии пробоя. Для интерпретации экспериментальных данных была принята следующая модель. Электроны интенсивно греются благодаря частым столкновениям с нейтралами. „Горячие“ электроны ионизуют газ. Энергетические потери электронов состоят из упругих столкновений с нейтралами и потерь на ионизацию. Оценки показали, что энергетические потери за счет упругих столкновений малы из-за большой разницы масс электронов и молекул газа, поэтому ими можно пренебречь. В этом случае ситуация описывается следующей системой уравнений:

$$3/2 \partial T_e / \partial t = e E u_e - \dot{w}_i, \quad (1)$$

$$\partial n_e / \partial t = (n_0 - n_e) t_i^{-1}. \quad (2)$$

Слагаемые справа, соответствующие ионизации, определяются интегралами:

$$\dot{w}_i = \langle s_i v_e w_e f_e \rangle_e, \quad (3)$$

$$t_i^{-1} = \langle s_i v_e f_e \rangle_e, \quad (4)$$

где s_i — сечение ионизации [12]. Функция распределения электронов по скоростям f_e , по которой происходит усреднение, принята максвелловской, поскольку упругие столкновения обладают наименьшим временем релаксации [12]. Первое слагаемое справа в уравнении (1), ответственное за джоулев разогрев электронов, содержит дрейфовую скорость u_e , которую мы определяем соотношением

$$u_e = aE/p + u_{e0} \quad (5)$$

(p — давление, $a = 2.5 \cdot 10^5 \text{ Torr} \cdot \text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$, $u_{e0} = 2 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$) в соответствии с данными, приведенными в [13]. Расчет проводился для следующих данных: концентрация газа $n_0 = 4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, напряженность электрического поля в промежутке $E = 2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$, продолжительность фронта роста напряжения $t_f = 0.3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$. Форма импульса напряжения аппроксимировалась полусинусоидой. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 4, *a, b*.

На этих графиках по оси абсцисс отложено безразмерное время Z_{n0} (время, отнесенное к длительности фронта импульса напряжения). По оси ординат (рис. 4, *a*) отложена безразмерная температура электронов Z_{n1} (температура электронов, отнесенная к потенциалу ионизации молекул газа). Видно, что вначале температура быстро растет благодаря джоулеву разогреву, затем в силу вступают потери на ионизацию и кривая приобретает более пологий характер. На рис. 4, *b* по оси ординат отложена безразмерная концентрация заряженных компонент Z_{n2} (концентрация электронов и ионов, отнесенная к первоначальной концентрации газа). В первые 100 ps (33% от длительности фронта нарастания напряжения на промежутке) ионизация практически отсутствует, потом за время примерно 10–20 ps (3–7% от длительности фронта нарастания напряжения на промежутке) происходит резкая ионизация газа, носящая характер вспышки. Температура электронов в этот момент достигает 0.3–0.35 от потенциала ионизации, т.е. ионизация газа осуществляется „горячими“ электронами. Эту вспышку света мы наблюдали и в эксперименте, что позволяет говорить об адекватности выбранной модели. Мы не просчитывали ионизацию выше 10–15%, поскольку пришлось

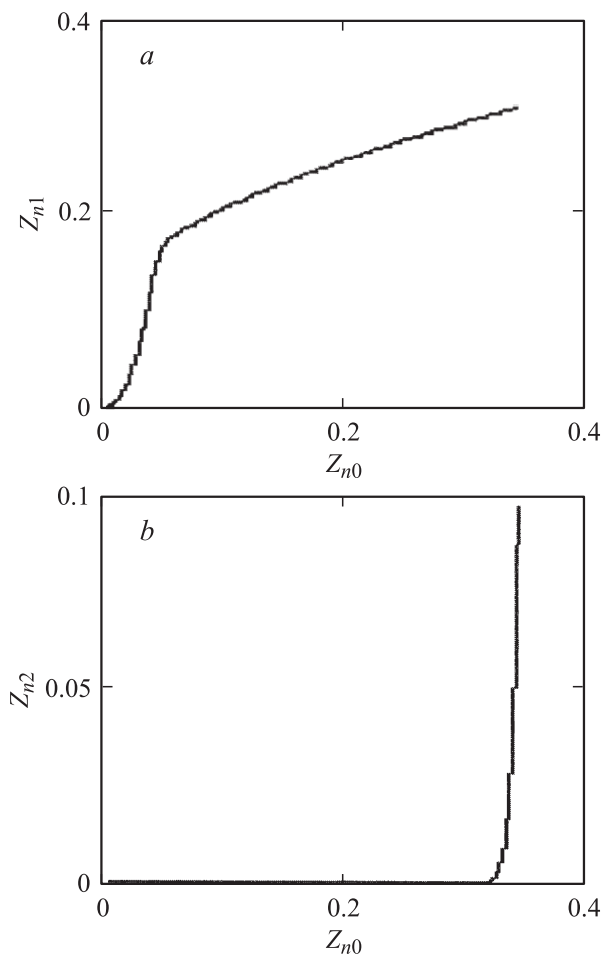


Рис. 4. Результаты расчетов нормированных температуры электронов (а) и концентрации заряженных частиц (б).

бы учитывать кулоновские взаимодействия, что существенно усложнило бы задачу. Однако, по нашему мнению, характер вспышки сохранится. Мы также не ставили перед собой задачу учесть координатную зависимость процесса ионизации. При том давлении и напряженности электрического поля, при которых проводился эксперимент, процесс ионизации

настолько форсирован, что практически однороден в межэлектродном промежутке.

Выводы. Результаты экспериментов по импульсному электрическому пробою перенапряженных (1.7–2.4 MV/cm) газовых промежутков высокого давления (30–40 atm) показали, что динамика развития пробы на начальной стадии настолько кратковременна, что использованная аппаратура регистрации не позволяла разрешать какие-либо неоднородности в пространстве и во времени. Пробой наблюдался как ярко светящаяся вспышка, практически однородно заполняющая межэлектродный промежуток за время порядка 100 ps. При интерпретации экспериментально наблюдаемых явлений учитывался разогрев электронов за счет соударения с молекулами газа и ионизация газа электронным ударом. Расчеты показали, что температура электронов достигает 0.3–0.35 от потенциала ионизации. В начале (до 0.2 от потенциала ионизации) температура определяется джоулевым разогревом, затем рост температуры замедляется за счет потерь на ударную ионизацию. Рост концентрации заряженных компонентов (образование электронов и ионов) носит ступенчатый характер, или характер вспышки (длительностью 10–20 ps) с характерным временем запаздывания по отношению к началу процесса порядка 100 ps. Такая корреляция с экспериментальными данными позволяет говорить об адекватности выбранной модели. Проведенные оценки позволяют сделать вывод о том, что на газовых коммутаторах высокого давления можно получать высоковольтные импульсы напряжения с фронтами в несколько десятков пикосекунд. Можно надеяться, что дальнейшие исследования в этом направлении позволят провести дополнительную оптимизацию параметров и создать новые сверхбыстрые перенапряженные газовые коммутаторы высокого давления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-02-16477).

Авторы благодарят чл.-корр. РАН М.И. Яланина и к.т.н. С.А. Шунайлова за помощь и полезные советы.

Список литературы

- [1] Мезяц Г.А. Эктоны. Ч. 3. Эктоны в электрофизических устройствах. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 262 с.
- [2] Яланин М.И., Шнак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.

- [3] *Иванов С.Н., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.* и др. // ПТЭ. 2000. № 5. С. 51–55.
- [4] *Ivanov S.N., Shpak V.G., Shunailov S.A.* et al. // Proc. XIII Int. Symp. on Gas Discharges and their Applications. Glasgow, GB, 2000. P. 497–500.
- [5] *Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* и др. // ПТЭ. 1993. № 1. С. 149–155.
- [6] *Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д.* Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. 272 с.
- [7] *Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R.* et al. // Proc. of the 10th IEEE Int. Pulsed Power Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 1995. P. 666.
- [8] *Mesyats G.A., Shpak V.G., Shunailov S.A.* et al. // SPIE Int. Sump.: Intense Microwave Pulses. Los Angeles, CA, 1994. V. 2154. P. 262.
- [9] *Иванов С.Н., Шунайлов С.А.* // ПТЭ. 2000. № 3. С. 72–75.
- [10] *Ivanov S.N., Shpak V.G., Shunailov S.A.* et al. // Proc. of the 12th Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2000. P. 250–254.
- [11] *Тицнов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.* SAM-Интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Новосибирск: Препр. ИЯФ СО АН СССР № 89, 1989. 66 с.
- [12] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 593 с.
- [13] *Рёттер Г.* Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. 390 с.