

О законе подобия в пикосекундном газовом разряде

Г. А. Месяц

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Институт электрофизики Уральского отд. РАН, Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 6 сентября 2005 г.

После переработки 21 ноября 2005 г.

В статье показывается однозначная зависимость между произведением давления газа p на время формирования разряда τ от приведенной напряженности электрического поля E/p для воздуха и аргона в пикосекундном диапазоне времен τ . Ранее эта зависимость была установлена для наносекундного диапазона. Имеющиеся экспериментальные данные удовлетворительно объясняются в рамках теории многоэлектронного инициирования импульсного газового разряда, предложенного автором ранее.

PACS: 52.80.—s

В физике газового разряда существуют комбинации величин, которые описывают то или иное свойство этого разряда в широком диапазоне условий. Важность такой группировки была высказана Пашеном и Таунсендом, которые отметили, что произведение напряженности электрического поля E на длину свободного пробега электрона λ выражает энергию, полученную электроном на длине свободного пробега, а произведение давления p на длину зазора d пропорционально числу молекул между электродами. Значит, если $E\lambda$ или E/p и pd поддерживать постоянными, то фиксируется размножение электронов в зазоре. Эти и другие комбинации параметров можно получить, изучая поведение так называемых подобных разрядов.

К таким комбинациям, кроме упомянутых E/p и pd , относятся также α/p , pt , j/p^2 и т.д. Здесь t – время, α – коэффициент ударной ионизации, j – плотность тока разряда. Указанные выше комбинации называются параметрами подобия. Такие величины как потенциал U , ток i и температура T в разряде, а также скорости дрейфа электронов и ионов, являются самостоятельными параметрами подобия. Указанные параметры подобия широко используются для характеристики электрических разрядов в газах. Если существуют однозначные связи между этими параметрами в разряде, то говорят, что в разряде соблюдается закон подобия.

Эти законы соблюдаются не всегда, а только в тех случаях, если в разряде имеет место определенный набор элементарных процессов. Такие процессы называют разрешенными. Процессы, приводящие к нарушению законов подобия, принято называть запрещенными. Невыполнение законов подобия в разряде само по себе говорит о том, что в разряде сущест-

венную роль играют какие-либо запрещенные процессы. К разрешенным процессам относятся: ионизация при однократных столкновениях; прилипание и отрыв электронов, дрейф и диффузия электронов и ионов; рекомбинация между положительными и отрицательными ионами; вторичная электронная эмиссия за счет бомбардировки ионами, атомами и фотонами. Типичными запрещенными процессами являются автоэлектронная, термоэлектронная и взрывная эмиссии электронов. Одним из самых известных законов подобия в стационарном газовом разряде является закон Пашена. Это однозначная зависимость между напряжением U , при котором происходит пробой, и произведением pd .

В импульсном разряде важнейшей характеристикой является зависимость между $p\tau$ и E/p [1]. В [2] было экспериментально показано, что для многих газов существует однозначная зависимость между $p\tau$ и E/p , где τ – время формирования разряда вплоть до наносекундного диапазона для таких газов, как воздух, азот, кислород, аргон, гелий, фреон и элегаз. Ранее в [3] было показано соблюдение этого закона, как полагал автор, для стримерного разряда в атмосферном воздухе. Однако условия эксперимента в [3] не обеспечивали реализацию стримерного разряда, так как число начальных электронов было более чем 10^4 . Этот закон соблюдался именно только при большом числе электронов, инициирующих разряд, когда катод подсвечивался ультрафиолетовыми лучами. Если число инициирующих электронов было мало, то этот закон переставал быть справедливым, а величина τ возрастала почти на порядок [1]. Эти два типа разрядов были названы разрядами с многоэлектронным и одноэлектронным инициированием [1].

Объяснение причины соблюдения закона подобия в импульсном разряде с многоэлектронным инициированием заключается в следующем [4]. Большое число инициирующих электронов одновременно участвуют в ионизационном размножении и приводят к росту тока до тех пор, пока не начнется резкий рост тока из-за уменьшения сопротивления в газоразрядном промежутке. Импульс напряжения для реализации разряда поступает к исследуемому промежутку по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением Z . Если импульс имеет строго прямоугольную форму, то время формирования разряда τ в наносекундном диапазоне определяется из формулы, предложенной нами [4, 1] для случая однородного поля:

$$N_0 \frac{ev_e}{d} \exp\left(\int_0^t \alpha v_e dt\right) = i(t), \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $i(t)$ – ток разряда, N_0 – число инициирующих электронов в промежутке, α – коэффициент ударной ионизации, v_e – скорость дрейфа электронов, d – длина промежутка между катодом и анодом.

Формула (1) описывает ионизационное размножение электронов. В ней не учтено прилипание электронов, а также считалось, что начальных ионизирующих электронов так много ($N_0 > 10^4$), что учитывать долю статистического запаздывания в общем времени запаздывания не нужно. В этом случае время запаздывания разряда будет равно только времени формирования разряда τ .

Теперь перейдем к определению времени формирования разряда τ . В нашем случае это время достижения током разряда определенной величины i_0 , например, 10% от амплитудного, $i_0 = U_0/Z$, где U_0 – амплитуда напряжения. Тогда время формирования разряда, согласно формуле (1), определится из соотношения

$$p\tau = \ln(i_0 d / e N_0 v_e) / (\alpha/p) v_e. \quad (2)$$

Величины α/p и v_e являются функцией E/p . Поэтому формулу (2) можно записать в общем виде так:

$$p\tau = F(E/p). \quad (3)$$

Это теоретическое обоснование закона подобия, который, как было показано экспериментально [2], справедлив в наносекундном диапазоне времени.

В связи с прогрессом развития техники высоковольтных пикосекундных импульсов [5] возникает вопрос – справедлив ли закон подобия для пикосекундного диапазона? На рис.1 показана полученная

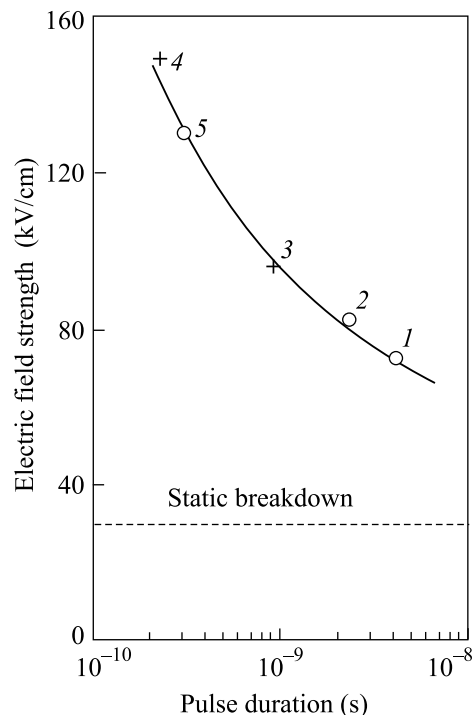


Рис.1. Зависимость пробивной напряженности электрического поля от длительности импульса напряжения: 1, 2, 5 – СВЧ импульсы диапазона частот 38 ГГц; 3, 4 – униполярные импульсы напряжения без СВЧ заполнения

нами зависимость напряженности импульсного пробоя атмосферного воздуха от длительности импульса при временах до 200 пс. Причем приведены экспериментальные точки как для видеоимпульсов, так и для радиоимпульсов с частотой 38 ГГц. Здесь же приведена кривая $E(\tau)$ для воздуха при $p = 760$ торр, взятая из работы [2], в которой подтверждается справедливость закона подобия для воздуха в наносекундном диапазоне. Как видно, время пробоя для радио- и видеоимпульсов совпадает. Это объясняется тем, что за время длительности импульса умещается всего несколько периодов СВЧ колебаний, так как длительность периода равна 28 пс. Описание аппаратуры, при помощи которой были получены эксперименты, даны в работе [5]. Амплитуда напряжения видеоимпульса составляла 150 нс, а длительность фронта около 100 пс. Промежуток между медными электродами подсвечивался ультрафиолетом от искры в обостряющем промежутке.

Вторым доказательством справедливости закона подобия для пикосекундных разрядов являются данные работы [6]. В ней исследовались зависимости времени τ от давления аргона при $p = 0.5 \div 600$ торр и было показано, что зависимость $\tau(p)$ имеет минимум при $p_m \approx 100$ торр, равный $\tau = 250$ пс.

Покажем, что факт наличия этого минимума полностью соответствует, согласно нашей теории [4], закону подобия. Для аргона в широком диапазоне E/p имеет место зависимость [7]

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp \left[-\frac{B}{(E/p)^{1/2}} \right], \quad (4)$$

где $A = 33 (\text{см} \cdot \text{торр})^{-1}$, $B = 22.7 \text{ В}^{1/2} \cdot (\text{см} \cdot \text{торр})^{1/2}$.

Скорость дрейфа электронов запишем в общем виде:

$$v_e = m(E/p)^n, \quad (5)$$

где m и n – параметры, зависящие от сорта газа и диапазона величин E/p . Тогда, подставляя (4) и (5) в (2) и полагая, что числитель слабо зависит от E/p ,

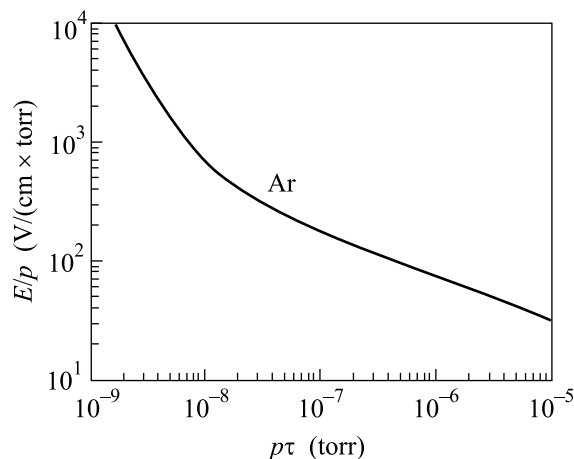


Рис.2. Экспериментальная зависимость E/p от $p\tau$ для пробоя в аргоне [2]

так как находится под логарифмом, найдем минимум из соотношения $d\tau/dp = 0$. При этом получим для

давления, при котором время τ будет минимальным,

$$p_m = E/B^2. \quad (6)$$

Из этой формулы следует, что в точке минимума $(E/p)_m = B^2 = 515 \text{ В} \cdot (\text{см} \cdot \text{торр})^{-1}$. На рис.2 приведена экспериментальная зависимость величины E/p от $p\tau$ для аргона, полученная в [2] для наносекундного диапазона времени. Из этой зависимости следует, что при $(E/p)_m = 515 \text{ В} \cdot (\text{см} \cdot \text{торр})^{-1}$ величина $(p\tau)_m = 2 \cdot 10^{-8} \text{ торр} \cdot \text{с}$. Экспериментальное значение, полученное в [6], составляет $(p\tau)_m = 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ торр} \cdot \text{с}$. Учитывая не строгую прямоугольность фронта импульса в [6], совпадение теоретической величины $(p\tau)_m$, согласно закону подобия, и экспериментальной, полученной в [6], можно считать удовлетворительным. Это подтверждает вывод о том, что закон подобия для газового разряда справедлив при временах $\tau \ll 10^{-9} \text{ с}$, то есть для пикосекундного диапазона.

1. Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов*, М.: Наука, 1991.
2. P. Felsenthal and J. M. Proud, *Phys. Rev.* **139**, N 6A (1965).
3. R. C. Fletcher, *Phys. Rev.* **76**, 1501 (1949).
4. Г. А. Месяц, *Исследования по генерированию мощных наносекундных импульсов*, докторская дисс., Томский политехнический институт, 1966.
5. Г. А. Месяц, М. И. Яландин, *УФН* **175**, 225 (2005).
6. H. Krompholz, L. L. Hatfield, A. Neuber et al., *Subnanosecond Breakdown in Argon at High Overvoltages*, Proc. XVth Intern. Pulsed Power Conf., June 13–17, Monterey, 2005.
7. В. Х. Доходов, В. А. Жуков, *ЖТФ* **51**, 1858 (1981).