

УДК 537.523

Напряжение статического электрического пробоя газа при наличии свободных электронов в разрядном промежутке

У. Юсупалиев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В рамках теории лавинных разрядов определена зависимость напряжения электрического пробоя газа U_b от произведения расстояния d между анодом и катодом и давления p газа при наличии постоянного внешнего ионизатора в разрядном промежутке. Рассмотрен случай, когда пространственный заряд, созданный внешним ионизатором, не искажает электрическое поле в разрядном промежутке. При отсутствии внешнего ионизатора полученная зависимость сводится к известному выражению напряжения пробоя газа (закону Пащенко).

PACS: 52.80.-s

Введение

Обычно для инициирования сильноточного разряда длиной 0,05—0,2 м в газах высокого давления (порядка атмосферного и выше) применяются тонкие металлические проволочки [1, 2]. При электрическом взрыве проволочек наблюдается пауза тока, в течение которой напряжение между электродами резко увеличивается за время порядка наносекунды. Измерение этого напряжения показывает, что его величина недостаточна для электрического пробоя разрядного промежутка. Тем не менее, после паузы тока такой пробой происходит по газу, окружающей проволочку. Этот эффект можно объяснить снижением величины напряжения пробоя при наличии электронов, эмитированных из проволочки во время ее нагрева и разрушения.

Известно, что когда величина напряжения, приложенного к разрядному промежутку, недостаточна для электрического пробоя, то для инициирования разряда используется ультрафиолетовая (УФ) подсветка газа. Она применяется и для получения коротких высоковольтных импульсов напряжения [3]. Так, в работе [4] этот эффект использован для получения коротких (~30 пс) импульсов в CO₂-лазере. Причем авторы этой работы показали, что подобных результатов можно достигнуть и при использовании в качестве источника УФ-излучения искрового разряда. Таким образом, снижение напряжения пробоя сопровождается уменьшением его длительности (количественного описания этого эффекта до сих пор нет).

Возможность снижения напряжения пробоя при наличии внешнего ионизатора рассмотрена в работе [5]. В ней для ионизационного нарастания μ_1 , характеризующего лавинное размножение электронов в разрядном промежутке, получено следующее выражение:

$$\mu_1 = \left(1 + \frac{n_1}{n_0}\right) \gamma \left(e^{\int_0^d \alpha_1 dx} - 1 \right), \quad (1)$$

где n_0 — число электронов, эмитированных катодом;

n_1 — число электронов, создаваемых внешним ионизатором;

γ — коэффициент вторичной эмиссии электронов с поверхности катода;

α_1 — первый коэффициент ионизации Таунсенда при наличии внешнего ионизатора.

При отсутствии внешнего ионизатора ($n_1 = 0$) выражение (1) сводится к известному выражению для ионизационного нарастания μ , т. е.

$$\mu = \gamma \left(e^{\int_0^d \alpha dx} - 1 \right), \quad (2)$$

где α — первый коэффициент ионизации Таунсенда без внешнего ионизатора.

Из сравнения (1) и (2) сделан вывод [5] о том, что $\mu_1 > \mu$ и, соответственно, $U_{b1} < U_b$ (U_{b1} и U_b — напряжения пробоя при наличии внешнего ионизатора и без него). Однако выражения для U_{b1} в зависимости от числа электронов n_1 , создаваемых внешним ионизатором, получено не было.

Целью данной работы является вывод такого выражения при наличии постоянного внешнего ионизатора.

Основная часть

Определим величину напряжения электрического пробоя газа U_{b1} при наличии постоянного внешнего ионизатора между плоскими электрода-

ми на основе теории лавинных разрядов. Для этого рассмотрим случай, когда объемный заряд, возникающий под действием внешнего ионизатора, не искажает однородности электрического поля между анодом и катодом. При этом можно считать, что первый коэффициент ионизации Таунсенда α_1 не зависит от координат, т. е. $\alpha_1 = \text{const}$.

Пусть под действием внешнего ионизатора в единице объема газа межэлектродной области за единицу времени образуются $\frac{dn_1}{dt}$ электронов (пар ион — электрон и положительный ион), а с поверхности катода не происходит испускания фотоэлектронов, и будем считать, что $\frac{dn_1}{dt} = \text{const}$.

Тогда каждый электрон, образованный на расстоянии x от анода, создает в результате размножения в газе $e^{\alpha_1 x}$ электронов. Если пренебречь диффузией электронов, то их число, приходящееся на анод за единицу времени, равно

$$S \int_0^d \left(\frac{dn_1}{dt} \right) e^{\alpha_1 x} dx = \frac{S}{\alpha_1} \left(\frac{dn_1}{dt} \right) e^{\alpha_1 d} - 1,$$

а к моменту t после начала работы внешнего ионизатора ($t = 0$) имеем

$$N(t) = \frac{S}{\alpha_1} \frac{dn_1/dt}{t} e^{\alpha_1 d} - 1,$$

где S — площадь анода.

Одновременно с этим в разрядном промежутке образуется такое же количество ионов, которое, дойдя до катода, выбивает из его поверхности $\gamma N(t)$ вторичных электронов (γ — коэффициент вторичной эмиссии электронов с поверхности катода).

Вторичные электроны также ионизуют газ, и образованные ими ионы, приходя на катод, в результате вторичной электронной эмиссии снова выбивают электроны. Такой процесс размножения повторяется многократно до момента пробоя. Для определения полного тока рассмотрим процесс размножения электронов при эмиссии одного электрона с катода и наличии свободных электронов в разрядном промежутке, созданных внешним ионизатором. Краткое описание процесса размножения электронов приведено в таблице, из которой видно, что сумма размноженных электронов N , приходящихся на анод, за время пробоя $\tau_b = \Delta t k$, равна

$$N = e^{\alpha_1 d} \left(1 + g + g^2 + g^3 + \dots + \frac{S}{\alpha_1} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} e^{\alpha_1 d} - 1 \right), \quad (3)$$

$$\text{где } g = \gamma \left[\left(1 + \frac{S}{\alpha_1} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right];$$

Δt — длительность одного цикла размножения электронов;

k — число циклов размножения.

Из опытных данных следует [5—10], что $\gamma \ll 1$ и, следовательно, $g < 1$. Тогда ряд в скобке выражения (3) представляет собой бесконечную геометрическую прогрессию со знаменателем g и первым членом, равным единице, и поэтому имеем

$$N = \frac{e^{\alpha_1 d}}{1-g} + \frac{S}{\alpha_1} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} e^{\alpha_1 d} - 1.$$

Если число первичных (эмитируемых катодом) электронов равно n_0 , то вследствие ионизации газа электронами (эмитированным электроном и созданными внешним ионизатором) и вторичной электронной эмиссии с катода под действием положительных ионов коэффициент размножения на аноде равен

$$\begin{aligned} \frac{J_1}{J_0} &= \frac{N}{n_0} = \\ &= \frac{e^{\alpha_1 d} + \frac{Sd}{n_0 \alpha_1} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} e^{\alpha_1 d} - 1}{1 - \gamma \left(1 + \frac{Sd}{\alpha_1 d} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} \right) e^{\alpha_1 d} - 1}, \quad (4) \end{aligned}$$

где J_0 — электрический ток, созданный электронами, эмитируемыми катодом;

J_1 — суммарный электрический ток.

Из (4) видно, что со временем величина $\frac{J_1}{J_0}$

растет и к моменту времени τ_b после начала работы внешнего ионизатора знаменатель выражения (4) станет равным нулю

$$1 - \gamma \left(1 + \frac{Sd}{\alpha_1 d} \frac{dn_1/dt}{\tau_b/k} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 = 0, \quad (5)$$

т. е. суммарный ток становится бесконечно большим — происходит пробой газа. Поэтому соотношение (5) представляет собой условие электрического пробоя газа при наличии постоянного внешнего ионизатора. Из выражения (5) видно, что условие пробоя при наличии внешнего ионизатора отличается от известного условия пробоя без ионизатора [5—10] дополнительным безразмерным членом

$$\left(\frac{Sd}{\alpha_1 d} \frac{dn_1/dt}{\Delta t} \right),$$

Краткое описание процессов, происходящих на катоде, аноде и в газе для различных циклов размножения электронов при электрическом пробое

Процессы, происходящие на катоде	Процессы, происходящие в газе между катодом и анодом	Количество электронов, пришедшее на анод за один цикл
1-й цикл Один электрон эмитируется с катода	$e^{\alpha_1 d} - 1$ пар ионов возникает в результате ионизации одним электроном, эмитированным с катода, и $\frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} e^{\alpha_1 d} - 1$ пар ионов возникает под действием внешнего ионизатора	$e^{\alpha_1 d} + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} e^{\alpha_1 d} - 1$
2-й цикл $e^{\alpha_1 d} - 1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} e^{\alpha_1 d} - 1$ ионов приходят на катод, $\gamma \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]$ электронов возникают в результате вторичной электронной эмиссии и уходят с катода	$\gamma \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]$ пар ионов возникает в результате ионизации электронами	$\gamma \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right] e^{\alpha_1 d}$
3-й цикл $\gamma \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]^2 e^{\alpha_1 d}$ ионов приходят на катод, $\gamma^2 \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]^2 e^{\alpha_1 d}$ электронов уходят с катода	$\gamma^2 \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]^2 e^{\alpha_1 d}$ пар ионов возникает в результате ионизации электронами	$\gamma^2 \left[\left(1 + \frac{S dn_1 / dt \Delta t}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 d} - 1 \right]^2 e^{\alpha_1 d}$ и т. д.

где $n_b = Sd dn_1 / dt \Delta t$ — количество электронов, возникающих под действием внешнего ионизатора в объеме Sd между анодом и катодом за один цикл размножения;

$\alpha_1 d$ — число актов размножения, совершаемых электроном на длине промежутка между электродами в электрическом поле при наличии внешнего ионизатора.

Решение уравнения (5) относительно переменной $z = \alpha_1 d$ в зависимости от количества электронов n_b , возникающих за один цикл, позволяет получить формулу для напряжения пробоя U_{b1} , если известна зависимость $\alpha_1 = f(U_{b1})$. В качестве таковой возьмем эмпирическую формулу Таунсенда [5—10]

$$\frac{\alpha_1}{p} = A \exp\left(\frac{-Bpd}{U_{b1}}\right), \quad (6)$$

где A , $1/(\text{м}\cdot\text{Па})$ и B , $\text{В}/(\text{м}\cdot\text{Па})$ — размерные эмпирические постоянные, величины которых для различных газов можно найти в работах [5—10].

Определим теперь условие пробоя путем решения трансцендентного уравнения (5). Результаты численного решения этого уравнения относительно $z_0 = f(n_b)$ для $\gamma = 10^{-2}$ представлены на рис. 1. При известной величине z_0 из (6) для напряжения пробоя U_{b1} получим следующую формулу:

$$U_{b1} = \frac{B pd}{\ln \left[A pd / \ln \left\langle 1 + \frac{1}{\gamma \left(1 + \frac{Sd dn_1 / dt \Delta t}{z_0} \right)} \right\rangle \right]}. \quad (7)$$

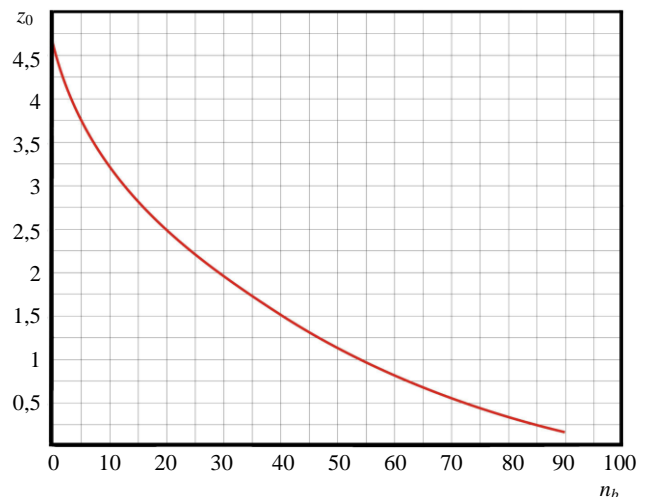


Рис. 1. Зависимость среднего числа электронов z_0 , размноженных одним первичным электроном в пространстве между катодом и анодом, от числа электронов n_b , созданных внешним ионизатором в том же пространстве, удовлетворяющая условию пробоя при $\gamma = 10^{-2}$ (результат численного решения уравнения (5) относительно n_b)

Из (7) видим, что величина U_{b1} , помимо величин (pd), A и B , зависит от количества электронов, возникающих под действием внешнего ионизатора в разрядном объеме Sd между анодом и катодом за время одного цикла размножения электронов. При отсутствии внешнего ионизатора ($dn_v/dt = 0$) выражение (7) сводится к известному выражению напряжения пробоя газа (закону Пашена) [5—10], т. е.

$$U_{b1} = \frac{Bpd}{\ln \left[\frac{Apd}{\ln 1 + 1/\gamma} \right]}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены кривые 1 и 2, построенные по формулам (8) и (7), соответственно, для ксенона при $\gamma = 10^{-2}$ и $n_b = 30$ ($z_0 = 1,25$). Видно, что при таких параметрах величина напряжения пробоя снижается почти в 2 раза. Из (5) и (7) следует, что чем выше интенсивность внешнего ионизатора (больше величина (dn_v/dt)), тем быстрее достигается условие пробоя и меньше величина U_{b1} .

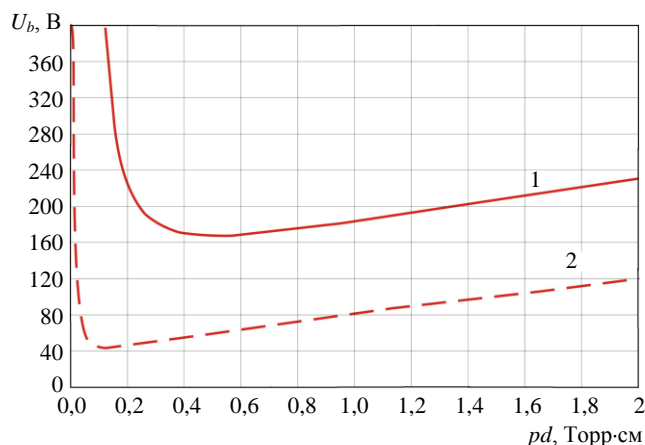


Рис. 2. Зависимость напряжения электрического пробоя U_{b1} в ксеноне от величины pd при двух значениях числа электронов n_b , созданных в разрядном промежутке внешним ионизатором:

1 — $n_b = 0$ (отсутствие ионизатора); 2 — $n_b = 30$

Заключение

Наличие внешнего ионизатора одновременно приводит как к снижению порога напряжения пробоя U_{b1} , так и к сокращению длительности формирования пробоя τ_b . Тем самым становится понятным и экспериментальный факт формирования коротких высоковольтных импульсов напряжения с помощью УФ-подсветки.

Считаем своим долгом выразить благодарность А. А. Рухадзе, А. Ф. Александрову за ценные обсуждения.

Литература

1. Электрический взрыв проводников, Т. 1—2/ Под ред. А. А. Рухадзе и И. С. Шпигеля. — М.: Мир, 1965.
2. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. — М.: Атомиздат, 1976.
3. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Месяц Г. А. Использование некоторых свойств газового разряда для получения высоковольтных наносекундных импульсов// В сб.: Успехи научной фотографии. — М. — Л.: Наука, 1964. Т. 9. С. 142.
4. Kwok H. S., Yablonovitch E.// Appl. Phys. Lett. 1977. № 30 (3). P. 158.
5. Кацков Н. А. Электроника. — М.: ГИТЛ, 1953.
6. Meek J. M., Craggs J. D. Electrical Breakdown of Gases. — Oxford. Clarendon Press, 1953.
7. A. von Engel. Ionized Gases. — Oxford. Clarendon Press, 1955.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
9. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991.
10. Месяц Г. А.// УФН. 2006. №. 176 (10). С. 1069.

Статья поступила в редакцию 8 июля 2008 г.

Voltage of the static electric gas breakdown in free electrons presence into a discharge interval

U. Yusupaliev

Moscow State University, Moscow, Russia

Dependence of an electric gas breakdown voltage from product of the distance d between the anode and the cathode and the gas pressure p in presence of a constant external ionizer in a discharge interval has been defined within the limits of the avalanche discharges theory. Considered is the case, when the spatial charge, created by the external ionizer, does not deform an electric field in the discharge interval. At absence of an external ionizer the received dependence is reduced to the known expression for a voltage of the gas breakdown (Pashen's law).