

М.И. Ломаев

Определение энерговвода в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 26.06.2001 г.

Приведен расчет падения напряжения, мощности и энергии возбуждения в эксилампах с барьерным разрядом. Для проверки корректности расчета данных параметров проведены измерения энерговклада в газоразрядную плазму с использованием общепринятых способов – калориметрического и по вольт-кулоновской характеристике разряда, а также посредством интегрирования рассчитанной мощности возбуждения. Полученные результаты хорошо совпадают, что свидетельствует о корректности расчета указанных параметров возбуждения в эксилампах с барьерным разрядом.

Введение

Определение мощностных и энергетических характеристик воздействия на исследуемый объект традиционно значимо при исследовании различных газоразрядных устройств. Особенностью разрядов, протекание тока в которых ограничено слоями диэлектрика (в том числе барьерных разрядов), с точки зрения определения данных параметров является емкостно-резистивный характер нагрузки – в данном случае разрядной ячейки. Определение энерговклада при этом может быть осуществлено различными способами: а) по вольт-амперной мощности в первичной цепи трансформатора источника питания с учетом потерь на нем; б) калориметрическим способом – по перепаду температур в водяной рубашке охлаждения разрядной ячейки; в) по вольт-кулоновской характеристике разряда в соответствии с электрической теорией озонаторов; г) по измеренным эффективным значениям величин тока и напряжения через разрядную ячейку с учетом их фазового смещения [1–3]. Способ «а», по-видимому, может рассматриваться как оценочный. Способ «б» предполагает проведение измерений в установившемся тепловом режиме. При использовании соотношений электрической теории озонаторов необходимо знать величину напряжения на промежутке во время протекания тока разряда, которая непосредственно не измеряется. Применение способа «г» ограничивается трудностью определения в ряде случаев коэффициента формы.

Вероятно, наиболее предпочтительным следует считать расчет энерговклада по вольт-кулоновской характеристике, поскольку протекающий в цепи заряд и падение напряжения на разрядной ячейке могут быть определены прямыми измерениями. Энергия, введенная в газоразрядную плазму в течение полного цикла разряда (в течение одного периода), рассчитывается как площадь фигуры в координатах заряд – напряжение. Основным недостатком данного способа является отсутствие информации о временном ходе величин падения напряжения на газоразрядном промежутке и мощности возбуждения. Знание данных характеристик может быть важным, например, при создании высокоэффективных Хе₂-эксилламп, в которых, как оказалось, эффективность работы лампы во многом опре-

деляется режимом ввода энергии в газоразрядную плазму [4, 5]. Кроме того, это может быть полезным в целом для более адекватного представления о динамике различных процессов, протекающих в газоразрядной плазме.

В данной статье рассматривается временной ход величин падения напряжения на газоразрядном промежутке, мощности и вводимой энергии в эксилампе с возбуждением барьерным разрядом и проверяется корректность расчета параметров возбуждения посредством сравнения энерговклада, определенного для тех же экспериментальных условий стандартными способами.

1. Основные расчетные соотношения

Одной из особенностей разрядов, ограниченных диэлектриком, является сложная временная и пространственная зависимость распределения тока разряда от прикладываемого к ячейке напряжения. В зависимости от условий разряд может принимать различные формы – от однородного объемного до резко неоднородного с явно выделенными токовыми каналами – филаментами. В качестве эквивалентной электрической схемы в литературе приводятся различные схемы, наиболее простая состоит из источника питания с напряжением $U(t)$, включенных последовательно емкости диэлектрика C_d и газового промежутка C_r [6]. Параллельно емкости C_r установлены два антипараллельных диода Зенера (Zener diodes), ограничивающих напряжение на газоразрядном промежутке до величин $\pm U_r$ при подаче на разрядную ячейку переменного напряжения. Данная схема адекватна в случае синусоидальной формы напряжения генератора. Однако при использовании коротких импульсов возбуждения длительностью десятки – сотни наносекунд напряжение на промежутке в течение активной фазы разряда не будет поддерживаться постоянным, как это имеет место для синусоидальной формы напряжения. Поэтому в данном случае для анализа электрических характеристик разряда следует использовать иную, более общую эквивалентную схему, приведенную на рис. 1. Подобные схемы при моделировании барьерного разряда использовались в [2, 7 и др.]. Корректный расчет энерговклада при короткоимпульсном режиме возбуждения важен еще и потому, что в целом ряде работ для различных при-

менений продемонстрировано преимущество данного режима по сравнению с использованием генераторов синусоидальной формы напряжения [4, 5, 8 и др.], а в работе [9] указывается на невозможность применения традиционной методики определения энерговклада по вольт-кулоновской характеристике в случае короткоимпульсного возбуждения.

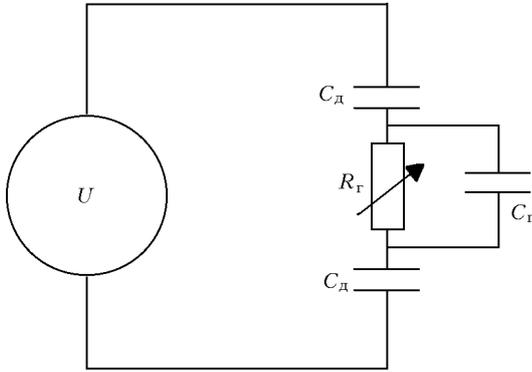


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема: U – напряжение генератора; C_d – емкость диэлектрического барьера; C_r – емкость газового промежутка; R_r – сопротивление газоразрядной плазмы

В данном исследовании падение напряжения на разрядном промежутке $U_r(t)$ предполагалось зависящим от времени в течение активной фазы разряда и изменяющимся от напряжения пробоя до напряжения погасания. До пробоя газового промежутка ячейка подобна емкостному делителю напряжения. При этом, поскольку в большинстве случаев $C_d \gg C_r$, основная доля напряжения приложена к емкости C_r и газовому промежутку. После пробоя емкость C_r шунтируется сопротивлением разрядного промежутка R_r и энергия вводится в плазму как активную нагрузку. Для расчета вводимой в плазму мощности $P(t)$ достаточно знать падение напряжения $U_r(t)$ и величину активной составляющей тока в разрядном промежутке $I_a(t)$:

$$P(t) = U_r(t) I_a(t). \quad (1)$$

Величина $U_r(t)$ может быть найдена по второму правилу Кирхгофа с использованием экспериментально измеряемых величин временного хода напряжения на разрядной ячейке $U(t)$, а также падения напряжения на емкости диэлектрика $U_d(t)$:

$$U_r(t) = U(t) - U_d(t). \quad (2)$$

Необходимо отметить, что напряжение $U(t)$ равно в каждый конкретный момент времени разности электродвижущей силы (эдс) генератора и падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора. Напряжение $U_d(t)$ можно вычислить, зная величины перемещенного заряда $Q(t)$ и емкости C_d :

$$U_d(t) = Q(t)/C_d. \quad (3)$$

Перемещенный в цепи заряд можно определить, по крайней мере, двумя способами. Во-первых, интегрированием тока с учетом начальных условий $Q(t=0) = Q_0$:

$$Q(t) = \int_0^t I(t') dt' + Q_0, \quad (4)$$

во-вторых, определением падения напряжения $U_{доп}(t)$ на дополнительной емкости $C_{доп}$, устанавливаемой в цепь последовательно с разрядной ячейкой:

$$Q(t) = U_{доп}(t)/C_{доп}. \quad (5)$$

Величина C_d вычисляется по геометрическим размерам ячейки и диэлектрической проницаемости применяемого диэлектрика или по наклону соответствующих участков вольт-кулоновской характеристики разряда [1–3]. Используя (2), (3), (5), запишем выражения для $U_r(t)$:

$$U_r(t) = U(t) - Q(t)/C_d. \quad (6)$$

Можем показать, что величина активной составляющей тока $I_a(t)$ определяется с использованием экспериментально регистрируемого полного тока $I(t)$:

$$I_a(t) = I(t) \frac{C_r + C_d}{C_d} - C_r \frac{\partial U}{\partial t} = I(t) - C_r \frac{\partial U_r}{\partial t}. \quad (7)$$

Мощность возбуждения $P(t)$ выразится из (1) и (6) как

$$P(t) = \{U(t) - Q(t)/C_d\} I_a(t). \quad (8)$$

Величина введенной в плазму энергии как функция времени $E(t)$ определится интегрированием (8):

$$E(t) = \int_0^t P(t') dt'. \quad (9)$$

Соотношения (6), (8), (9) были использованы нами для расчета напряжения на разрядном промежутке, мощности возбуждения и введенной в плазму энергии как функций времени при использовании данных, полученных в эксперименте.

Отдельное рассмотрение требуется для обоснования соотношения (7), так как при его выводе полагалось, что величина диэлектрической проницаемости плазмы – в общем случае среды с дисперсией – приближенно равна 1. Выражение для диэлектрической проницаемости плазмы в зависимости от циклической частоты приложенного поля ω в [10] приведено в виде

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{m(\omega^2 + \nu_m^2)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_m^2}, \quad (10)$$

где ω_p – плазменная частота; ν_m – эффективная частота столкновений электронов; n_e – плотность электронов; e – заряд электрона. Оценка $\varepsilon(\omega)$ для условий проводившегося эксперимента указывает, во-первых, на то, что зависимость ε от ω практически отсутствует, так как $\omega \ll \nu_m \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Во-вторых, при концентрации электронов в диапазоне $10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, характерном для барьерного разряда, ε равна приблизительно $1 \div 0,9$.

2. Экспериментальные условия

В эксперименте использовались эксилампы с двумя диэлектрическими барьерами коаксиальной конструкции [11]. Для возбуждения применялись: режим А – синусоидальные с частотой 17 кГц импульсы напряжения, и режим Б – короткие (0,1–2 мкс по основанию) одно- или двупо-

лярные импульсы напряжения с частотой 93 кГц. В первом случае использовалась лампа длиной 10 см (диаметры внешней и внутренней трубок 4 и 2 см). Во втором случае размеры лампы составляли 47; 6,5; 4,3 см. В качестве электродов выступали металлические фольга и сетка, установленные на внутренней поверхности внутренней трубки и на внешней поверхности внешней трубки. Толщина стенок кварцевых трубок, использованных при изготовлении эксиламп, составляла примерно 2 мм. Импульсы тока $I(t)$, напряжения на разрядной ячейке $U(t)$ регистрировались с использованием токового шунта и емкостного делителя напряжения. Электрические сигналы, в том числе непосредственно с дополнительной емкости $U_{\text{дон}}(t)$, подавались на осциллограф TDS-220. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы импульсов тока и напряжения на электродах ламп, которые брались в качестве исходных данных для расчета параметров возбуждения.

3. Результаты определения энерговклада различными способами

Для оценки корректности определения параметров возбуждения были проведены две проверки. Во-первых, для режимов *A* и *B* энерговклад за один период и средняя мощность возбуждения были определены вначале с

использованием соотношений (6)–(9), а затем для тех же экспериментальных условий общепринятым способом – по вольт-кулоновской характеристике. Во-вторых, был проведен дополнительный эксперимент с двухбарьерной эксилампой длиной ~ 70 см (режим возбуждения *B*), в ходе которого средняя мощность возбуждения определялась тремя способами: калориметрическим, по вольт-кулоновской характеристике разряда и по соотношениям (6)–(9).

На рис. 3 приведены вольт-кулоновские характеристики разряда для обоих режимов возбуждения в первом эксперименте. Интегрирование заряда по напряжению позволяет вычислить введенную за один цикл (период) энергию, а произведение данной величины на частоту – среднюю мощность возбуждения. Соответствующие величины составляют 4,5 мДж, 76 Вт (рис. 3,а) и 5,7 мДж, 525 Вт (рис. 3,б). Характерным является относительное постоянство напряжения горения ($\approx 2,9$ кВ) при использовании генератора синусоидальных импульсов. И наоборот, в случае короткоимпульсного возбуждения (рис. 3,б) фигура в координатах «заряд – напряжение» имеет сложную форму с характерными S-образными участками. Кроме того, наблюдается некоторое отличие протекания тока в различных направлениях, что, по-видимому, является следствием конструктивных особенностей эксилампы.

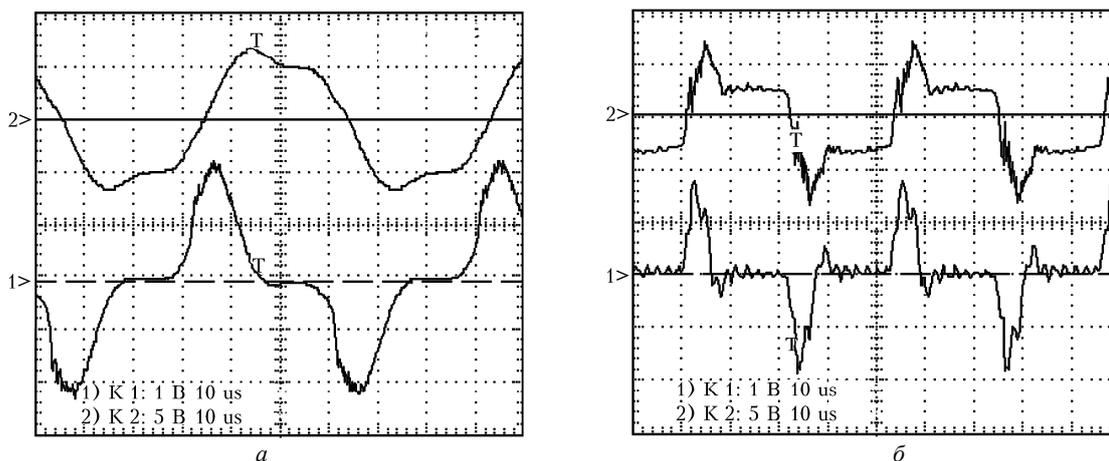


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока $I(t)$ (канал 1>) и напряжения $U(t)$ (канал 2>) на электродах ламп для синусоидальных (а) – режим *A* и коротких двуполярных импульсов напряжения (б) – режим *B*

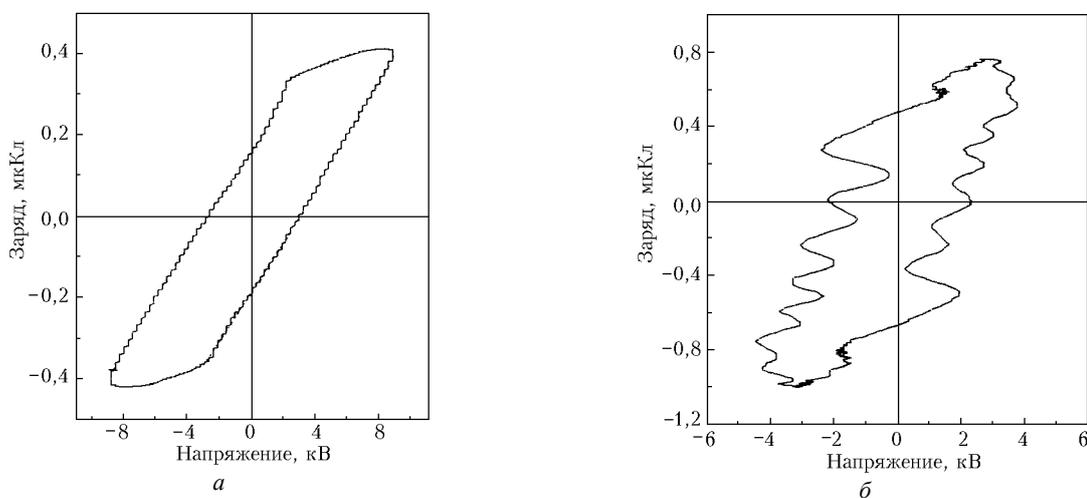


Рис. 3. Вольт-кулоновские характеристики разрядов для режимов *A* (а) и *B* (б)

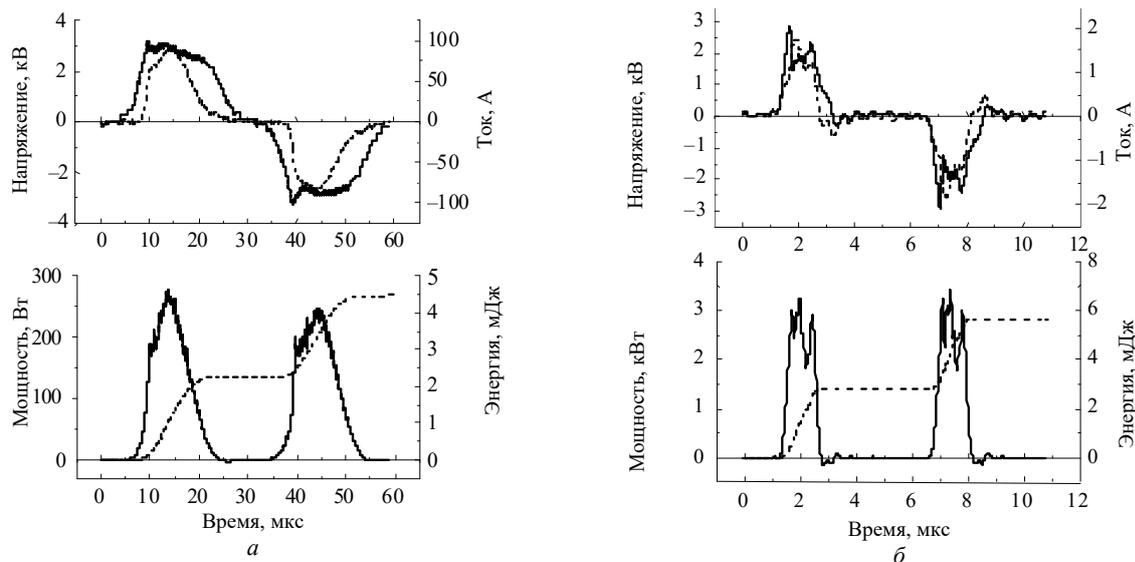


Рис. 4. Расчетные кривые активной составляющей тока, напряжения на газоразрядном промежутке, мощности возбуждения и вложенной энергии в течение одного периода для режимов *A* (*a*) и *B* (*b*). Сплошные кривые – напряжение и мощность; штриховые – ток и энергия

Величины емкостей C_d и C_r определяем по наклону соответствующих участков вольт-кулоновских характеристик. При этом некоторая неопределенность возникает для режима *B*. Независимую проверку величин C_d и C_r в данном случае можно осуществить их расчетом, исходя из геометрических размеров разрядной ячейки, а также методом подбора, используя условия софазности тока и падения напряжения на разрядном промежутке. Результаты расчета по соотношениям (6)–(9) следующие: 4,46 мДж и 75,7 Вт для условий рис. 3,а; 5,65 мДж и 525,5 Вт для условий рис. 3,б. На рис. 4 приведены расчетные кривые тока, напряжения на разрядном промежутке, а также кривые мощности возбуждения и введенной в плазму энергии.

Средняя мощность возбуждения, полученная по вольт-кулоновской характеристике разряда, калориметрическим способом (с учетом тепла, уносимого потоком охлаждающей эксилампу воды и рассеиваемого теплоизолирующим слоем) и по соотношениям (6)–(9) в дополнительном эксперименте равна соответственно 204, 197, 199 Вт.

Заключение

Проведенные расчеты параметров энерговода – падения напряжения, активной составляющей тока на разрядном промежутке, мощности и энергии возбуждения, а также измерения энергокладов и средней мощности возбуждения различными способами в эксилампах барьерного разряда показали, что средняя мощность возбуждения, определенная тремя методами (калориметрическим, по вольт-кулоновской характеристике разряда и интегрированием мощности) отличается не более чем на ~5%. Учет влияния емкости газоразрядного промежутка C_r наиболее значим при короткоимпульсном возбуждении и позволяет

получить более полную информацию о параметрах отдельного импульса и средней мощности возбуждения.

Данная работа выполнена за счет средств, выделенных по проекту МНТЦ (№ 1270).

1. Manley T.C. The electric characteristics of the ozonator discharge // Trans. Electrochem. Soc. 1943. V. 84. P. 83–96.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 176 с.
3. Falkenstein Z., Coogan J.J. Microdischarge behavior in the silent discharge of nitrogen-oxygen and water-air mixtures // J. Phys. D. 1997. V. 30. P. 817–825.
4. Mildren R.P., Carman R.J. Enhanced performance of a dielectric barrier discharge lamp using short-pulsed excitation // J. Phys. D. 2001. V. 34. L1–L6.
5. Vollkommer F., Hitzschke L. Dielectric Barrier Discharge // Proc. Of the 8th Int. Symp. On Science & Technology of Light Sources. Greifswald. 1998. P. 51–60.
6. Arnold E., Dreiskemper R. and Reber S. High – Power Excimer Sources // Proc. of the 8th Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources. Greifswald, 1998. P. 90–98.
7. Oda A., Sugawara H., Sakai Y., Akashi H. Estimation of the output power and efficiency of Xe barrier discharge excimer lamps using a one-dimensional fluid model for various voltage waveforms // J. Phys. D. 2000. V. 33. P. 1507–1513.
8. Пат. 642606 Швейцария. МКИ С 01 В 13/11. Бресслер П., Когельшатц У. Озонатор.
9. Spaan M., Leistikow J., Gathen V.S., and Dobele H.F. Dielectric barrier discharge with steep voltage rise: laser absorption spectroscopy of NO concentrations and temperatures // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 146–151.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1987. 592 с.
11. Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Кузнецов А.А. Ультрафиолетовые и вакуумноультрафиолетовые эксилампы с накачкой барьерным разрядом // Ж. техн. физ. 1994. Т. 64. Вып. 10. С. 146–150.

M.I. Lomaev. Energy input determination in barrier discharge pumped excilamps.

In this paper, the calculations on decay of voltage, power and excitation energy in barrier discharge excilamps is presented. In order to verify these parameters calculations, measurements of energy input into the gas discharge plasma both using common techniques (calorimeter and volt-culon discharge characteristics of discharge) and integration of calculated excitation power were conducted. The obtained results are in good agreement that points to correct calculations of the excitation parameters in the barrier discharge excilamps.