

А. М. ОРИШИЧ, А. Г. ПОНОМАРЕНКО,
член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВОЙНОГО ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА ПРИ НАКАЧКЕ ЛАЗЕРА НА CO_2

В работе ⁽¹⁾ показано, что объемный электрический разряд, осуществляющий инверсную заселенность в молекулярных газовых системах, является неустойчивым. Природа неустойчивости имеет ионизационно-перегревный характер, а время ее развития определяется скоростью поглощения энергии в разряде, давлением и составом рабочей смеси. В данном сообщении приводятся результаты серии экспериментов, проведенных для установления предельных условий работы импульсной лазерной системы на CO_2 и для выявления тех ограничений, которые могут оказаться существенными при больших плотностях энергии, поглощаемой в плазме электрического заряда.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Объемный разряд создавался в металлической камере длиной 100 см, с помощью специально разработанных емкостных источников C_1 и C_2 . Накопитель $C_1 = 10^{-7}$ ф представлял собой компактную электрическую линию на напряжение 100 кВ с волновым и омическим сопротивлениями, соответственно 0,2 и 0,8 ом. Вспомогательная емкость $C_2 \approx 3 \cdot 10^{-9}$ ф и емкость между катодом и поджигающим электродом $\sim 8 \cdot 10^{-9}$ ф изготавливались из фторопластовой пленки и размещались непосредственно в катодном элементе установки ⁽²⁾. Электроды выполнены по форме, рекомендованной Роговским, они имеют длину 80 см и ширину 8 см, расстояние между ними $d = 5$ см. Средняя часть катода в области однородного поля шириной 2 см изготавливалась из параллельного ряда тонких проволочек. Расстояние между проволочками и диэлектрической поверхностью поджигающего электрода равно 2 мм. При срабатывании разрядника появляющаяся разность потенциалов между проволочками и поджигающим электродом инициирует в газовом промежутке интенсивный коронный разряд, переходящий в поверхностный пробой диэлектрика.

Подобная система является эффективным источником ультрафиолетового излучения, которое способствует быстрой ионизации основного разрядного промежутка. В эксперименте с помощью пояса Роговского 1 и омического делителя 2 одновременно измерялись ток разряда и активное падение напряжения на электродах (см. рис. 1). Обработка осциллограмм $I_p(t)$ и $U_p(t)$, полученных при начальных напряжениях на накопителе

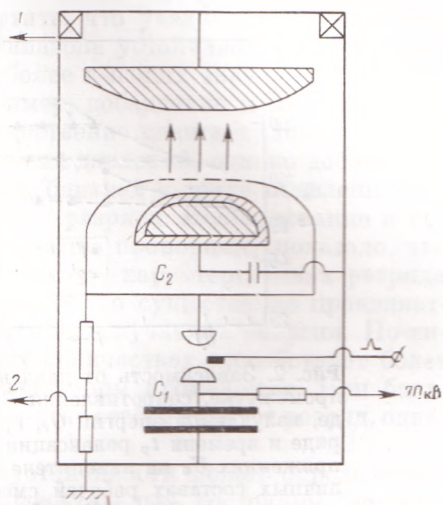


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

$U_0=30\div 70$ кв, позволила определить основные энергетические характеристики двойного поперечного разряда и их зависимость от состава и давления рабочей смеси.

Было установлено, что начальное напряжение при данном составе рабочей смеси практически не влияет на величину U_p (см. рис. 2), а зависимость U_p от давления полностью определяется проводимостью плазмы, возникающей в разряде, и соотношением между сопротивлением промежутка R_p и полным сопротивлением электрического контура.

Эксперимент, далее, показал, что проводимость основного разряда зависит от начального напряжения на накопителе U_0 , давления и состава

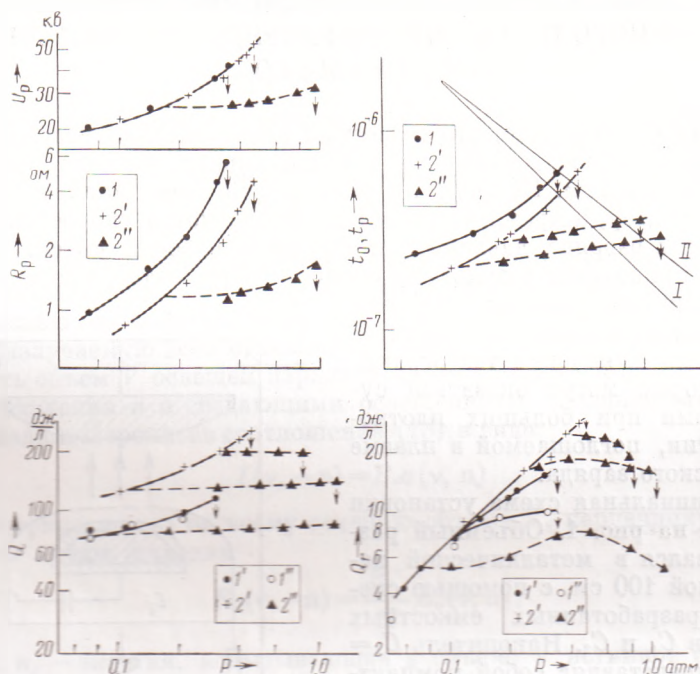


Рис. 2. Зависимость от давления P напряжения U_p на разрядном промежутке, сопротивления R_p , энергии Q , поглощаемой в разряде, излучаемой энергии Q_r , времени t_0 поглощения энергии в разряде и времени t_p релаксации уровня $01'0$ CO_2 при начальных напряжениях U_0 на накопителе 50 в (1, 1', 1'') и 70 в (2', 2'') и различных составах рабочей смеси: 1' - $\text{CO}_2 - 2\text{N}_2 - 0,5\text{H}_2$, 1'' - $\text{CO}_2 - 2\text{N}_2$, 2'' - $\text{CO}_2 - 2\text{N}_2 - 0,5\text{H}_2 - \text{He}$

рабочей смеси. Из рис. 2 видно, что сопротивление разрядного промежутка R_p , измеренное в момент времени, соответствующий максимуму тока, при малых давлениях (до $p=0,22$ атм., $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$) изменяется пропорционально $P^{0,8}/U_0$, а с увеличением давления $R_p \sim P^2/U_0^2$. Интересным является эффект «стабилизации» проводимости разряда при добавлении к рабочей смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$ чистого гелия. Значительное увеличение абсолютного давления в смеси с добавленным гелием приводит к весьма незначительному возрастанию сопротивления разряда. Поскольку $R_p \sim P/n$ (n — концентрация электронов в промежутке), то, как это следует из рис. 2, возрастание сопротивления при добавлении гелия может компенсироваться соответствующим увеличением n , ибо в разряде устанавливается такое напряжение U_p , при котором существенной может быть ионизация непосредственно в разрядном промежутке. Это означает, что величина энергии

$$Q = \int_0^\infty \frac{U_p^2}{R_p} dt,$$

поглощаемой в разряде, практически не изменяется с увеличением давления гелия и определяется в основном парциальным давлением смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$.

Более отчетливо указанные закономерности можно проследить на графиках $Q(P)$ и $Q_r(P)$. Излучение выводилось из рабочей камеры через германиевую пластинку и регистрировалось калориметром и германиевым приемником. Вторым элементом резонатора служило сферическое зеркало с серебряным покрытием и радиусом кривизны 5 м. Вкладываемая в разряд энергия увеличивается с давлением основной рабочей смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$ и не зависит от парциального давления гелия. Излучаемая энергия при добавлении гелия несколько возрастала только при малых парциальных давлениях смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$. Энергетический к.п.д. лазерной системы $\eta=Q_r/Q$ определялся в данном эксперименте действующим значением параметра $E/P=U_p/d_p$ и составил примерно 12,5% при максимально зарегистрированных значениях $Q=230$ дж/л и $Q_r=29$ дж/л.

Важным результатом также является наблюдаемый в эксперименте факт потери устойчивости объемного разряда, о котором можно судить по резкому уменьшению излучаемой энергии Q_r . При заданном начальном напряжении U_0 и емкости накопителя C_1 увеличение поглощаемой энергии и энергии излучения с ростом давления ограничивается возникновением дуги в разрядном промежутке. На рис. 2 соответствующий предел указан вертикальными стрелками. Можно отметить, что увеличение начального напряжения приводит к расширению диапазона устойчивости работы разряда, а следовательно, и к достижению более высоких значений Q и Q_r . Изменение состава рабочей смеси, например, добавление к молекулярной смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$ чистого гелия существенно сдвигает точку потери устойчивости в сторону больших абсолютных давлений, однако добавление гелия в области давлений основной смеси, близкой к точке появления неустойчивости, не приводит к стабилизации разряда. Использование в исследуемой системе водорода (в указанной выше пропорции) показало, что его влияние не сказывается на энергетических характеристиках разряда и на положении области потери устойчивости, но существенно проявляется, так же как и в опытах ⁽³⁾, в возрастании излучаемой энергии. По-видимому, добавление водорода в небольших количествах способствует более однородному распределению плазмы в разрядном промежутке. При больших парциальных давлениях водород несколько стабилизирует разряд, однако значительно слабее, чем гелий.

Поскольку развитие наблюдаемой неустойчивости может определяться процессом релаксации возбужденных колебательных состояний молекул CO_2 , представляет интерес сравнить характерные времена поглощения энергии в разряде t_0 с временем релаксации t_p уровня 01'0 молекул CO_2 . На рис. 2 изображена зависимость t_p и экспериментально определяемой из осциллограмм тока и напряжения величины t_0 от давления. Сплошными линиями нанесены расчетные зависимости t_p , полученные с помощью данных, приведенных в работах ^(4, 5). При этом предполагалось, что поскольку водород в используемой смеси ($\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$) не влияет на точку потери устойчивости, то релаксация колебательного уровня определяется в основном образующимися в разряде молекулами CO или же небольшой примесью паров воды, которые могут присутствовать в камере при заполнении ее смесью CO_2-2N_2 . Расчетные значения t_p (I) соответствуют предположению о 50% степени диссоциации молекул CO_2 или же наличию парциального давления паров воды порядка 2% от суммарного давления смеси. Возможно, что на самом деле в системе реализуется некоторый промежуточный случай. При добавлении к смеси $\text{CO}_2-2\text{N}_2-0,5\text{H}_2$ при давлении, например, $p=0,1$ атм. гелия время релаксации изменяется согласно второй расчетной линии t_p (II). Из графика видно, что при определенном давлении, когда t_p становится меньше t_0 , в разряде возникает неустойчивость. Поскольку t_p для столкновений с гелием примерно на порядок

превышает t_p для СО и на два порядка для паров воды, то естественно, что неустойчивость разряда при добавлении гелия наступает при значительно большем абсолютном давлении смеси.

Таким образом, из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что при работе двойного электрического разряда с поперечной накачкой существует предельная энергия $Q_{пр}$, которая может быть поглощена в газе при заданном начальном напряжении и определенном составе рабочей смеси. Величина этой энергии ограничена пределами устойчивости разряда. Полученные в эксперименте значения $Q_{пр} \approx 200-400$ дж·(л·атм.)⁻¹ для различных составов рабочей смеси находятся в удовлетворительном согласии с оценками, представленными в работе (1). Дальнейшее продвижение в область больших давлений и соответствующего увеличения вкладываемой энергии требует повышения начального напряжения на первичном источнике и уменьшения его волнового сопротивления, при этом Q увеличивается пропорционально $P^{1/2}$. Возрастание величины Q при заданном P в области существования устойчивого объемного разряда происходит примерно пропорционально напряжению U_0 . Однако следует отметить, что и в этом случае из условия $t_0 < t_p$ следует ограничение на выбор емкости начального накопителя при заданном начальном напряжении. Так, например, при больших давлениях, когда $R_p \sim P^2/U_0^2$, из условия устойчивости $t_0 < t_p$ следует необходимость выполнения условия $C_1 < (U_0^2/P^3) \text{const.}$ Это соотношение также удовлетворительно выполнялось в эксперименте.

Авторы искренне признательны С. П. Шаламову, Л. Н. Пузыреву и Н. В. Давыдову, за активную помощь в создании установки и П. Н. Медведеву за участие в эксперименте.

Институт теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
11 VI 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. П. Велихов, И. В. Новобранцев и др., ДАН, 205, 1328 (1972). ² А. К. Laflamme, Rev. Sci. Instr., 41, 1578 (1970). ³ T. F. Deutsch, Appl. Phys. Letters, 20, 315 (1972). ⁴ Н. Н. Соболев, В. В. Соковников, УФН, 91, 425 (1967). ⁵ R. L. Taylor, S. T. Bitterman, Rev. Modern Phys., 41, 26 (1969).