

Импульсно–периодические объемные разряды в CO₂-лазерных смесях сверхатмосферного давления

Б.А. Козлов^{1,*}, Д.С. Маханько²

¹Рязанский Государственный Радиотехнический Университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА», Рязань, Россия

*kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Аннотация. Определены условия формирования объемных самостоятельных разрядов в CO₂-лазерных смесях при общем давлении до 6 атмосфер на частотах повторения импульсов до 2.5 кГц. Газоразрядный промежуток был образован профилированными электродами из графита с активной зоной $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8$ см³. Достигнуты максимальные плотности энергии, вводимой в плазму объемного разряда, 100–120 мДж·см⁻³·Атм⁻¹ на частотах повторения импульсов 2–2.5 кГц.

Ключевые слова: объемный самостоятельный разряд, CO₂-лазерные смеси, сверхатмосферное давление, импульсно–периодический режим, плотность энергии накачки, частота повторения импульсов.

1. Введение

В настоящее время для решения многих технологических задач требуются импульсы лазерного излучения ИК–диапазона (9–11 мкм) с энергией излучения в импульсе в несколько десятков миллиджоулей, длительностью менее 20 наносекунд и максимальной частотой повторения до 20 кГц.

Такие параметры могут быть реализованы только в CO₂-лазерах сверхатмосферного давления. Возбуждение объемных разрядов сверхатмосферного давления в плотных газах на частотах повторения импульсов в единицы и десятки герц не представляет особых затруднений. На частотах повторения импульсов 0.1–10 кГц формирование объемных разрядов с необходимой плотностью энергии накачки превращается в трудноразрешимую задачу.

Цель настоящей работы заключалась в определении условий формирования объемных разрядов накачки в CO₂-лазерных смесях при общем давлении до 6 атмосфер на частотах повторения импульсов до 2.5 кГц в промежутке с геометрическими размерами $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8$ см³.

2. Условия зажигания объемных разрядов в плотных газах в импульсно-периодическом режиме

Зажигание объемного разряда в плотных газах в импульсно–периодическом режиме связано с выполнением целого ряда требований к уровню начальной ионизации, параметрам высоковольтных импульсов, предназначенных для реализации однородного пробоя в основном разрядном промежутке и ввод энергии в плазму разряда на стадии однородного горения, длительности тока объемного разряда. Минимальный уровень начальной ионизации в газовых смесях при давлении в одну атмосферу составляет 10^6 – 10^9 см⁻³ [1]. С увеличением давления уровень начальной ионизации увеличивается по кубическому закону [1]. Высоковольтный импульс напряжения, предназначенный для формирования объемного разряда в основном разрядном промежутке, должен обладать достаточной для пробоя амплитудой при минимальной длительности переднего фронта [1]. Это обусловлено тем, что за это время из межэлектродного промежутка не будут удалены свободные электроны, созданные на стадии предварительной ионизации

Кроме этого, длительность тока объемного разряда не должна превышать время развития плазменных неустойчивостей различной природы, которое при давлении в одну атмосферу составляет десятки наносекунд.

В качестве генераторов для формирования таких высоковольтных импульсов в импульсно–периодическом режиме наиболее подходящими являются генераторы Маркса. В случае применения двухкаскадных генераторов Маркса с применением водородных тиратронов типа ТГИ1–1000/25 амплитуда высоковольтных импульсов может достигать значений в 60 кВ. При использовании генераторов Маркса обеспечиваются минимальные значения как времени коммутации, так и длительности тока объемного разряда.

Негативные влияния остаточных напряжений на пространственную структуру объемного разряда и на его устойчивость к локализации в импульсно–периодическом режиме ослаблялись с помощью демпфирующих цепей с использованием высоковольтных вакуумных диодов ВИЗ–70/32 и наборов низкоиндуктивных резисторов типа ТВО–60 на общее сопротивление 50 Ом [2].

3. Экспериментальное оборудование

3.1. Газоразрядная камера

Газоразрядная камера для изучения объемного разряда представляет собой цилиндрический сосуд из нержавеющей стали с диаметром 34 см и длиной 46 см. Объемный разряд зажигался с помощью двух типов электродных структур, схематически приведенных на Рис.1. В первом варианте (Рис.1а) объемный разряд зажигался между сеточным анодом (А) и профилированным катодом (К). Источником начальной ионизации здесь служит коронный разряд (КР), который зажигается между коронирующими электродами (3) и сеточным анодом (А). Во втором варианте объемный разряд зажигался между монолитными электродами (А) и (К) (Рис.1б). В качестве источника начальной ионизации в этом варианте служат искровые разряды между набором вспомогательных электродов из вольфрама (3) и монолитным анодом (А). Высоковольтные импульсы для зажигания вспомогательного и объемного разрядов подавались соответственно на выводы электродов (1–3) и (1–2).

Электроды для зажигания объемного разряда были изготовлены из графита. Выбор графита был обусловлен его повышенной устойчивостью к изменению структуры рабочих поверхностей под воздействием плазмы объемного разряда и имеющих иногда место локальных искровых разрядов. Объемный самостоятельный разряд зажигался в межэлектродном промежутке с геометрическими размерами $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8 \text{ см}^3$.

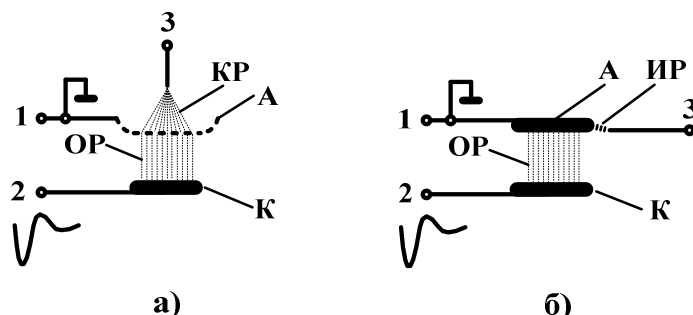


Рис.1. Электродные структуры для зажигания объемного разряда.

Скоростной газовый поток в межэлектродном промежутке создавался с помощью блока из 28 малогабаритных электроventilаторов типа ДВО1–400. Скорость газового потока в основном межэлектродном промежутке достигала $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Охлаждение газовой смеси происходило в теплообменнике. Для возбуждения вспомогательного и объемного разрядов

применялись два автономных импульсных генератора с плавно регулируемой в пределах 0–2 мкс задержкой между моментами их включения.

Временное поведение импульсов напряжения и тока объемного разряда контролировались с помощью резистивного делителя и измерительного трансформатора тока [3, 4]. Поскольку конструкция газоразрядной камеры не позволяла включать измеритель тока в низковольтной цепи, применявшийся измерительный трансформатор тока через высоковольтный изолятор одевался на высоковольтный ввод (2).

Использовались типичные «лазерные» смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с соотношением компонентов 1:1:6, 1:1:8 и 1:1:10 при полном давлении от одной до шести атмосфер.

Визуальные наблюдения за пространственной структурой объемного разряда осуществлялись через окна из кварцевых пластин толщиной 10 мм, расположенные на торцах разрядной камеры.

3.2. Генераторы высоковольтных импульсов

Физические процессы на стадии формирования объемного разряда аналогичны тем, которые происходят при искровом пробое [1, 5]. Считается, что развитие искрового разряда количественно может быть описано теорией Таунсенда, в которой помимо вторичной ион–электронной эмиссии учитывается фотоэлектронная эмиссия от собственного излучения развивающегося разряда [5–8]. В этом случае статические напряжения зажигания объемного разряда, обладающего свойствами тлеющего разряда высокого давления, можно оценить по известному соотношению [9, 10]:

$$U_{np} = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)}, \quad (1)$$

где A и B – константы, определяемые родом газа (размерности $1/(\text{см} \times \text{Торр})$ и $\text{В}/(\text{см} \times \text{Торр})$); p и d – давление газа и величина межэлектродного промежутка (размерности Торр и см); γ – обобщенный коэффициент вторичной электронной эмиссии, включающий в себя и коэффициент фотоэлектронной эмиссии (типичные значения $\gamma \approx 10^{-1} - 10^{-2}$).

Константы A и B хорошо известны для индивидуальных газов. Для смеси газов значения этих констант могут быть определены в соответствии со следующими соотношениями [11]:

$$A = (20X + 12Y + 3Z), \quad B = (470X + 340Y + 34Z), \quad (2)$$

где X , Y и Z – относительное содержание двуокиси углерода, азота и гелия в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$.

Расчетные значения напряжений пробоя для смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:10$, 1:1:8 и 1:1:6 при давлении в одну атмосферу имеют следующие значения: 7, 8 и 9 кВ. При полном давлении в 6 атмосфер напряжения зажигания увеличиваются до значений 42, 47 и 54 кВ.

Такие значения напряжений пробоя в импульсно–периодическом режиме могут быть реализованы с помощью двухкаскадных генераторов Маркса с применением импульсных водородных тиратронов типа ТГИ1–1000/25 в качестве коммутаторов. Эти генераторы с легко обеспечивают формирование высоковольтных импульсов амплитудой до 60 кВ и длительностью переднего фронта на уровне 30–40 наносекунд на частотах повторения импульсов до нескольких килогерц. При необходимости формирования импульсов на более высокие напряжения с сохранением длительности переднего фронта на минимальном уровне генератор Маркса может быть включен в первичную цепь низкоиндуктивного импульсного трансформатора с небольшим ($k \leq 4$) коэффициентом трансформации.

Принципиальная схема двухкаскадного генератора Маркса с использованием импульсных водородных тиратронов в качестве коммутаторов приведена на Рис.2 [12]:

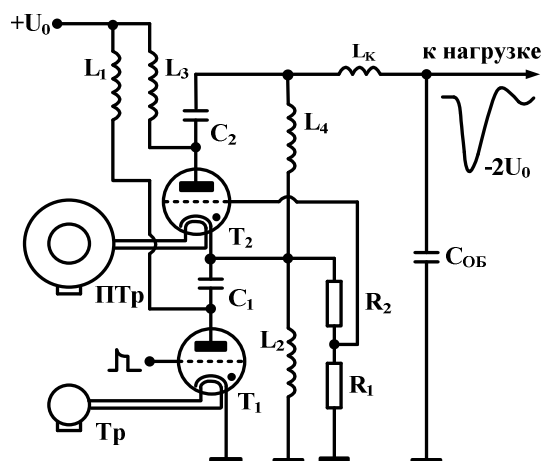


Рис.2. Схема генератора Маркса с импульсными водородными тиратронами в качестве коммутаторов: T_1, T_2 – импульсные водородные тиратроны ТГИ1–1000/25; C_1, C_2 – накопительные конденсаторы (КВИ–3); L_1, L_2 – зарядные дроссели для тиратрона T_1 ; L_3, L_4 – зарядные дроссели для тиратрона T_2 ; L_k – конструктивная индуктивность; $C_{об}$ – обостряющий конденсатор (КВИ–3); Тр – накальный трансформатор тиратрона T_1 ; ПТр – «потенциальный» трансформатор накала тиратрона T_2 .

Тиратрон T_1 первого каскада генератора Маркса запускается от управляющего генератора. Второй тиратрон T_2 высоковольтного каскада запускается от положительного импульса, который автоматически формируется с помощью делителя R_1 – R_2 сразу же после срабатывания тиратрона T_1 . После того как оба тиратрона сработают на дросселях L_2 и L_4 будет сформирован импульс напряжения отрицательной полярности с амплитудой $2U_0$.

Длительность переднего фронта импульса напряжения, формируемого в двухкаскадных генераторах Маркса, определяется временем коммутации второго тиратрона T_2 , который срабатывает, находясь под удвоенным потенциалом. Время развития разряда в тиратроне T_2 в таких условиях сокращается по сравнению с временем развития разряда в тиратроне T_1 . Как показали измерения – это время может достигать 10–15 наносекунд.

Такой же по структуре генератор Маркса ($U_{МАКС} \approx 40$ кВ) с использованием в нем тиратронов ТГИ2–500/20 применялся для возбуждения вспомогательных разрядов.

4. Результаты исследований

Результаты исследований показали, что при использовании электродной структуры с сеточным анодом и предионизацией с помощью коронного разряда (Рис.1а) для получения объемного разряда требуются в 2–4 раза меньшие энергетические затраты на начальную ионизацию по сравнению с вариантом с монокристаллическими основными электродами и предионизацией от искровых разрядов (Рис.1б).

Однако электродная структура с сеточным электродом имеет один принципиальный недостаток – разрушение сетки под воздействием локальных разрядов, в которых выделяются сотни и тысячи ватт средней электрической мощности.

От этого недостатка свободен второй вариант электродной системы (Рис.1б), в котором электроды для зажигания объемного разряда изготовлены из графита. В этом варианте локальные разряды приводят к локальным нарушениям структуры рабочих поверхностей, но эти изменения в структуре рабочих поверхностей не оказывают заметного влияния на структуру объемного разряда при его повторном зажигании. В связи с этим основной объем исследований был проведен с электродной структурой, в которой оба электрода были изготовлены из графита, а предионизация рабочих газов осуществлялась от искровых разрядов.

На Рис.3 приведены зависимости средней электрической мощности, вводимой в плазму объемного разряда, от частоты повторения импульсов для трех соотношений $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ и при полном давлении в 6 атмосфер.

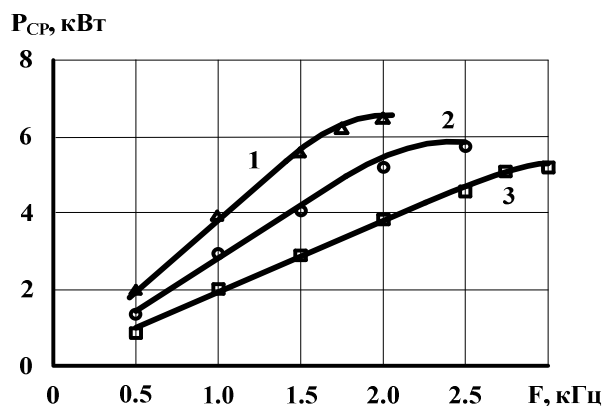


Рис.3. Зависимости средней электрической мощности, рассеиваемой в плазме объемного разряда, от частоты повторения импульсов для трех составов газовой смеси: $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:6$ (1), $1:1:8$ (2) и $1:1:10$ (3); полное давление $P_{\Sigma} = 6$ атмосфер.

Приведенные зависимости соответствуют максимально достижимым значениям средней мощности в указанном диапазоне частот повторения импульсов. Зависимости носят линейный характер в значительном диапазоне частот повторения импульсов. Некоторое снижение скорости нарастания средней мощности наблюдается при приближении к предельным значениям частоты повторения импульсов и обусловлено необходимостью снижения зарядного напряжения и энергии, запасаемой в емкостных накопителях. На этих частотах повторения импульсов в катодной области основного разрядного промежутка наблюдается формирование множества нитевидных плазменных каналов длиной до нескольких миллиметров, являющихся предшественниками полной локализации объемного разряда.

При увеличении энергетических затрат на начальную ионизацию длина локальных нитевидных каналов в катодной области объемного разряда сокращается и объемный разряд сохраняет свою пространственную однородность и на более высоких частотах повторения импульсов. Наиболее однородной пространственной структурой обладает объемный разряд в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:10$ во всем диапазоне изменений рабочего давления газов.

Наибольшее значение средней электрической мощности достигается при использовании смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:6$. Для нее же характерно и наименьшее значение максимальной частоты повторения импульсов (2 кГц против 3 кГц при использовании смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:10$).

На основании приведенных зависимостей на Рис.3 можно определить удельные плотности энергии накачки на частотах повторения импульсов в диапазоне от 0.5 до 3 кГц. Для максимально достигнутых частот повторения импульсов имеют место следующие значения удельной плотности энергии накачки:

$$W_{уд} = 120 \text{ мДж} \times \text{см}^{-3} \times \text{Атм}^{-1} (\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:6);$$

$$W_{уд} = 100 \text{ мДж} \times \text{см}^{-3} \times \text{Атм}^{-1} (\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8);$$

$$W_{уд} = 60 \text{ мДж} \times \text{см}^{-3} \times \text{Атм}^{-1} (\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:10).$$

Для давлений в одну атмосферу значения удельной плотности энергии накачки превышают достигнутые при полном давлении в 6 атмосфер в 1.7–2 раза. Последнее может быть связано с более высоким уровнем начальной ионизации и большей устойчивостью объемного разряда к перерождению в искровой канал. На связь уровня начальной ионизации с давлением рабочего газа впервые было указано в [1].

Длительность тока объемного разряда на полувысоте при давлении в 6 атмосфер составляет 25–30 наносекунд. При давлении в одну атмосферу длительность тока объемного разряда может достигать 50–70 наносекунд.

5. Заключение

1. Определены условия формирования устойчивых объемных разрядов в CO₂-лазерных смесях при давлениях до 6 атмосфер на частотах повторения импульсов 0.5–3 кГц.

Главными из них являются:

- многократное (более чем на порядок) увеличение энергетических затрат на начальную ионизацию ультрафиолетовым излучением;
- изготовление электродов для зажигания объемного разряда из графита;
- введение в рабочую смесь значительных (75–83 %) концентраций гелия;
- сокращение длительности тока объемного разряда до уровня 25–30 наносекунд;
- устранение остаточных напряжений на разрядном промежутке после прохождения тока объемного разряда.

2. В CO₂-лазерных смесях при общем давлении до 6 атмосфер в промежутке с геометрическими размерами $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8 \text{ см}^3$ достигнуты удельные плотности энергии накачки на уровне $W_{уд} = 100\text{--}120 \text{ мДж} \times \text{см}^{-3} \cdot \text{Атм}^{-1}$ при вводимой в плазму объемного разряда средней электрической мощности до 6–6.5 кВт на частотах повторения импульсов 2–2.5 кГц.

6. Список литературы

- [1] Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И., *Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах*. (Москва: Атомиздат, 1981).
- [2] Kozlov B.A., Rayurov A.Ya., *Proceedings of SPIE*, **11322**, 2019; doi: 10.1117/12.2550676
- [3] Шваб А., *Измерения на высоком напряжении*. (Москва: Энергоатомиздат, 1983).
- [4] Anderson J.M., *Rev. Sci. Instruments*, **7**, 915, 1971; doi: 10.1063/1.1685307
- [5] Осипов В.В., *УФН*, **170** (3), 225, 2000; doi: 10.1070/PU2000v043n03ABEH000602
- [6] Королев Ю.Д., Месяц Г.А., *Физика импульсного пробоя газов*. (Москва: Наука, 1991).
- [7] Мик Дж., Крэгс Дж., *Электрический пробой в газах*. (Москва: Издательство иностранной литературы, 1960).
- [8] Месяц Г.А., *Импульсная энергетика и электроника*. (Москва: Наука, 2004).
- [9] Гапонов В.И., *Электроника. Том I*. (Москва: ГИМФЛ, 1960).
- [10] До К.М., *Разработка малогабаритных CO₂-лазеров с накачкой объемным разрядом сверхатмосферного давления: дисс. канд. техн. наук, 05–27–02*. (Рязань: РГРТУ, 2019).
- [11] Смирнов Б.М., *Физика слабоионизированного газа в задачах и решениях*. (Москва: Наука, 1985).
- [12] Kozlov B.A., Makhan'ko D.S., Seredinov V.I., P'yanchenkov S.A., *Journal of physics: Conference series*, **1393**, 012010, 2019; doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012010