

Объёмный разряд сверхатмосферного давления в CO₂-лазерных смесях с высокой плотностью энергии накачки

Б.А. Козлов^{1,*}, Д.С. Маханько², П.В. Томашевич³

¹Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

²АО «НИИГРП «ПЛАЗМА», Рязань, Россия

³АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

*kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Аннотация. Предложена и апробирована конструкция электродов с последовательным зажиганием вспомогательного коронного и основного объемного разрядов для возбуждения CO₂-лазерных смесей сверхатмосферного давления. Достигнуты максимальные плотности энергии накачки $W = 120 \div 200$ мДж·см⁻³·Атм⁻¹ в промежутке $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8$ см³ при полном давлении в 6 атмосфер в рабочих смесях CO₂:N₂:He = 1:1:6; 1:1:3; 1:1:2.

Ключевые слова: CO₂-лазерные смеси, коронный и объёмный разряды, фотоионизация, сверхатмосферное давление, плотность энергии накачки.

1. Введение

Интерес к CO₂-лазерам сверхатмосферного давления обусловлен возможностями реализации импульсов ИК-излучения нано- и субнаносекундной длительности, обеспечения плавной перестройки излучения в пределах от 9.2 до 10.7 мкм [1, 2]. Главной задачей при осуществлении накачки таких лазеров является зажигание пространственно-однородных возбуждающих объемных разрядов. Для достижения больших значений энергии лазерного излучения в импульсе целесообразно увеличивать плотность энергии накачки, т.е. увеличивать плотность энергии в плазме объемного разряда.

Формирование объемных разрядов в газах при атмосферном и сверхатмосферных давлениях осуществляется в два этапа. На первом этапе осуществляется предварительная ионизация рабочего газа с обеспечением некоторого порогового уровня свободных носителей зарядов. На втором - пробой основного разрядного промежутка.

Минимальная концентрация начальных носителей зарядов при давлении в одну атмосферу должна быть не менее 10^6 см⁻³ [3]. С увеличением давления уровень начальной ионизации увеличивается по кубическому закону. Увеличение давления приводит также и к увеличению напряжения зажигания. Его величина определяется из условия воспроизводства носителей зарядов на катоде и подчиняется почти линейному закону [4]. Кроме этих двух условий должны выполняться также условия «малости» длительности переднего фронта импульса напряжения и сокращения длительности тока объемного разряда. Минимальная длительность переднего фронта импульса напряжения связана с тем, что за время нарастания напряжения на основном разрядном промежутке до пробойного значения созданные на стадии предварительной ионизации свободные носители зарядов не были удалены из промежутка и их концентрация не оказалась ниже порогового значения. Необходимость в сокращении длительности тока накачки с увеличением давления продиктована тем, что времена развития плазменных неустойчивостей объемного разряда также сокращаются с увеличением давления [5]. Таким образом, переход от атмосферного давления к сверхатмосферным сопровождается существенным ужесточением к условиям зажигания объемного разряда.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению условий зажигания объемных разрядов в трехэлектродной системе с последовательно расположенными коронным и объемным разрядами с целью повышения плотности энергии накачки в CO₂-лазерных смесях в диапазоне давлений от одной до шести атмосфер.

2. Условия зажигания объемных разрядов сверхатмосферного давления в СО₂-лазерных смесях

Наиболее приемлемым способом создания начальных носителей зарядов с необходимой начальной концентрацией на стадии предварительной ионизации являются применение реакций фотоионизации молекул газа и фотоэффект из катода с помощью вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и мягкого рентгеновского излучений.

В качестве источников ВУФ-излучения в большинстве случаев используются вспомогательные искровые или коронные разряды. В импульсно-периодическом режиме ВУФ-излучение целесообразнее получать в коронных разрядах. Причинами этого являются меньшая степень разрушения электродов, а также возможность генерирования мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Последнее, в отличие от ВУФ-излучения, способно осуществлять однофотонную фотоионизацию не только молекул примесей (оксиды азота, пары органических соединений), но и всех компонентов лазерной смеси. Тем самым достигается более высокий уровень начальной ионизации.

Средняя энергия свободных электронов, находящихся в электрическом поле в газе, определяется соотношением (1) [4]:

$$W_e = e \cdot \lambda_e \cdot E, \quad (1)$$

где: e — заряд электрона; λ_e — средняя длина свободного пробега электронов в данном газе или смеси газов; E — напряженность электрического поля.

Величина напряженности электрического поля E в непосредственной близости к коронирующему электроду в структурах типа «нить-плоскость» или «полоса-плоскость», удаленных друг от друга на расстояние H , определяется как (2) [4]:

$$E = \frac{U}{r_0 \cdot \ln\left(\frac{H}{r_0}\right)}, \quad (2)$$

где U — напряжение на промежутке; r_0 — радиус закругления коронирующего электрода.

Для номинального значения напряжения на промежутке в 20 кВ, межэлектродном промежутке $H = 0.5$ см и радиусе закругления $r_0 = 0.01$ см (толщина полосы 0.2 мм) величина напряженности электрического поля достигает значений $E \approx 5.1 \cdot 10^5$ В/см. В этих условиях свободные электроны у коронирующего электрода будут обладать энергиями не менее 28 эВ. Электроны с такими значениями энергии в состоянии возбуждать атомы и молекулы газовой смеси в высоко расположенные энергетические состояния и обеспечивать генерацию очень коротковолнового излучения. Кванты света с энергиями более 16 эВ в состоянии ионизировать молекулярный азот и двуокись углерода. С повышением напряжения и формированием квантов с энергиями более 24 эВ фотоионизации будут подвергаться и атомы гелия.

При этом следует обратить внимание на следующее. Длина свободного пробега электронов изменяется обратно пропорционально давлению. Величина же напряженности электрического поля, при которой достигается пробой, почти пропорциональна давлению. В соответствии с выражением (1) среднее значение энергии электронов должно слабо зависеть от давления. Его значение главным образом определяется напряженностью электрического поля, которое зависит от приложенного напряжения.

В настоящей работе использовалась трехэлектродная структура, состоящая из вспомогательного электрода (ВЭ), общего сеточного анода (А) и монолитного профилированного катода (К) (Рис. 1). Вспомогательный электрод является коронирующим электродом и образован двумя молибденовыми полосками (Мо) толщиной 0.2 мм. Полоски приваривались точечной сваркой к цилиндрическому стержню из нержавеющей стали. Анод

(А) был выполнен из никелевой сетки с прозрачностью 50%. Профилированный катод (К) изготавливался из графита. Символами (КР) и (ОР) обозначены зоны горения коронного и объемного разрядов. Величина межэлектродного промежутка составляла 0,8 см. Объем промежутка для зажигания объемного разряда составлял $V = 7.5 \times 0.8 \times 0.8 \text{ см}^3$. В данной конструкции электродной системы предионизатор на основе коронного разряда как источник ВУФ-излучения находится на минимальном расстоянии от облучаемого основного разрядного промежутка. Последнее очень важно с точки зрения минимизации потерь ВУФ-излучения при прохождении расстояния между источником излучения и зоной облучения.

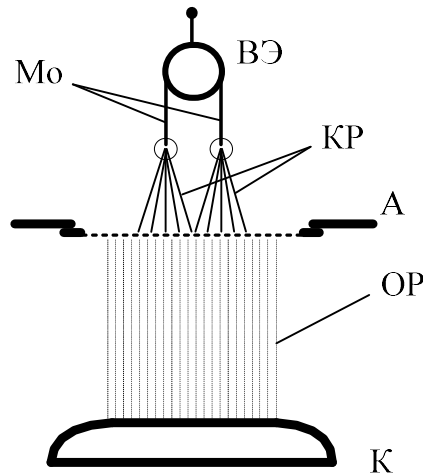


Рис. 1. Электродная структура для формирования объемных разрядов CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления.

Данная трехэлектродная структура функционирует следующим образом. Высоковольтный импульс положительной полярности необходимой амплитуды и длительностью переднего фронта в несколько наносекунд подается на выводы электродов (ВЭ) и (К). В начальный момент почти все напряжение прикладывается к вспомогательному промежутку (ВЭ) - (А) и в нем формируется вспомогательный коронный разряд с очень высокой напряженностью электрического поля на всем протяжении молибденовых полосок. Кружками на коронирующих электродах обозначены зоны максимальных напряженностей электрического поля и интенсивностей генерируемого ионизирующего излучения. Током коронного разряда заряжается конструктивная емкость «анод-катод». В ряде случаев к основному промежутку (А) - (К) подключалась внешняя обостряющая емкость величиной от 50 до 150 пФ. После достижения пробойного напряжения осуществляется зажигание объемного разряда и теперь один и тот же ток замыкается последовательно через вспомогательный и основной разрядные промежутки. В это время ток в коронирующем промежутке становится равным току объемного разряда. Генерирование ионизирующих излучений в данной электродной структуре происходит как на стадии предварительной ионизации, так и в течение всего времени протекания тока.

3. Экспериментальная часть

3.1. Разрядная камера

Разрядная камера представляет собой цилиндрическую оболочку из алюмооксидной керамики 22ХС с внутренним диаметром $D_1 = 10.2$ см. Эта оболочка располагалась внутри стального цилиндра с диаметром $D_2 = 22$ см. Пространство между этими цилиндрическими оболочками заливалось эпоксидной смолой. Длина цилиндрической части газоразрядной

камеры составляла 24 см. Внутри разрядной камеры монтировались электроды в соответствии с Рис. 1. Кроме этих электродов внутри разрядной камеры были смонтированы дополнительные электроды для формирования «электрического ветра». Высоковольтные вводы были изготовлены из бериллиевой керамики с проложенными внутри медными стержнями диаметром 4 мм.

Фланцы камеры были выполнены из оргстекла толщиной 3 см и удерживались с помощью 12 шпилек М14. Прозрачные фланцы позволяли визуально наблюдать за пространственной структурой разрядов в камере при всех возможных экспериментальных условиях.

Разрядная камера перед наполнением рабочими газами откачивалась до остаточного давления 10^{-2} Торр. Контроль рабочего давления осуществлялся с помощью манометра на 16 Атм. Объемные разряды при давлениях 1÷6 атмосфер зажигались на частотах повторения 10÷20 Гц. Такая частота повторения импульсов достигалась в результате применения явления «электрического ветра» [6].

3.2. Генератор высоковольтных импульсов

Высоковольтные импульсы с крутым передним фронтом формировались с помощью импульсного трансформатора и набора разрядников–обострителей. Схема такого генератора приведена на Рис.2. Заряженный до определенного напряжения накопительный конденсатор (C_H) разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора (ИТ) посредством тиратрона (Т). Током вторичной цепи обостряющий конденсатор ($C_{Об}$) заряжается до напряжения, при котором срабатывает разрядник–обостритель (РО-48). Формируемое на разрядном дросселе (L) напряжение прикладывается к электродам «вспомогательный электрод–анод».

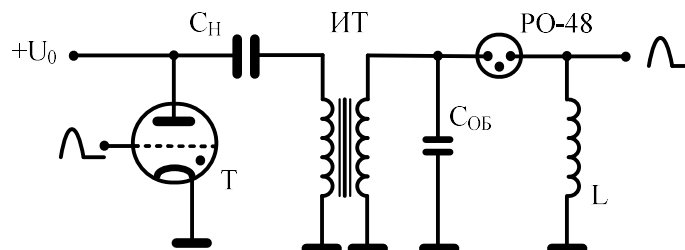


Рис. 2. Схема электрическая высоковольтного импульсного генератора.

При изменении компонентного состава рабочей смеси в разрядной камере изменяется величина напряжения пробоя. Для подбора соответствующего значения напряжения пробоя разрядника-обострителя изменялось давление рабочего газа (водорода) в нем. Для проведения количественных измерений было изготовлено шесть разрядников–обострителей типа РО-48 на напряжения 30÷100 кВ. Времена срабатывания самих разрядников не превышают 0.5 нс. Подробная схема измерений и результаты исследования времен развития разряда подробно отражены в работе [7]. Регистрация формы импульсов напряжения на основном разрядном промежутке, также как и регистрация тока разряда, оказались невозможными в силу необычайно высокого уровня электромагнитных наводок. Время нарастания напряжения на выводах (ВЭ)–(К) до момента пробоя вспомогательного коронного разряда не превышало 10 нс.

Импульсный трансформатор, накопительный и обостряющий конденсаторы, разрядник-обостритель и разрядный дроссель монтировались в металлическом баке с трансформаторным маслом. Энергия, вводимая в объемный разряд, оценивалась запасенной энергии в обостряющем конденсаторе $C_{Об}$ импульсного трансформатора.

3.3. Результаты измерений

Зависимости плотности энергии накачки от общего давления рабочих смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с различным компонентным составом приведены на Рис.3. Эти зависимости соответствуют трем составам рабочих смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$ (1); $1:1:3$ (2); $1:1:6$ (3). Общее давление для каждой рабочей смеси изменялось в пределах от одной до шести атмосфер.

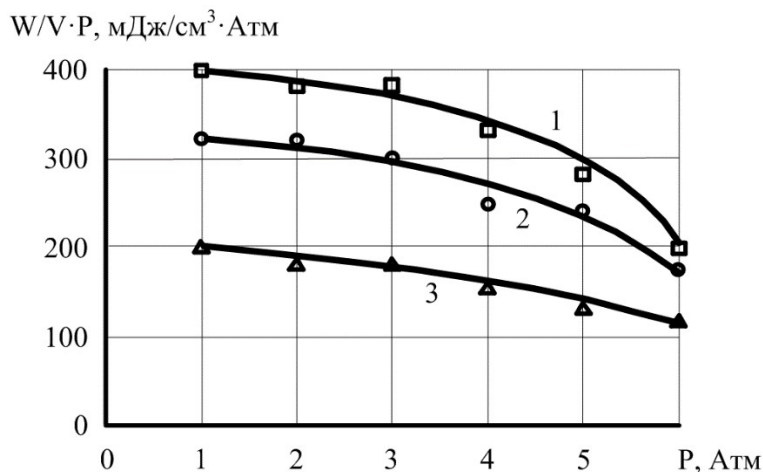


Рис.3. Зависимости плотности энергии, вводимой в плазму объемного разряда, от полного давления CO_2 -лазерной смеси. $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$ (1); $1:1:3$ (2); $1:1:6$ (3).

Наибольшее значение плотности энергии накачки $400 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{Атм}^{-1}$ достигается при использовании смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$ при давлении в одну атмосферу. Доля молекулярных компонентов составляет 50 %. При достижении давления в шесть атмосфер плотность энергии уменьшается до $200 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{Атм}^{-1}$. Для смесей с меньшим парциальным давлением двуокиси углерода плотности энергии накачки при давлении в одну атмосферу составляют соответственно 330 и 200 $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{Атм}^{-1}$. Самые малые значения плотности энергии характерны для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:6$. Для всех трех газовых смесей характерна общая тенденция к снижению этого показателя и при увеличении давления от одной до шести атмосфер плотность накачки для каждой смеси уменьшается почти в два раза.

Визуальные наблюдения за пространственной структурой вспомогательного и объемного разрядов показали, что в диапазоне давлений $1\div 2$ атмосферы и использовании смесей с соотношением компонентов $1:1:2$, $1:1:3$ и $1:1:6$ оба разряда обладают диффузным свечением. При более высоких значениях давления в смесях с соотношением компонентов $1:1:2$, $1:1:3$ в зоне вспомогательного коронного разряда начинают формироваться нитевидные каналы. При достижении давления в четыре атмосферы нитевидные каналы начинают появляться и в зоне объемного разряда. При этом их длина не превышает одной трети от величины межэлектродного промежутка. В это же время нитевидные каналы полностью перекрывают вспомогательный промежуток. Последнее может указывать на снижение интенсивности ионизирующих излучений и уровня начальной ионизации. В смеси, содержащей 80% гелия, нитевидные каналы начинают проявляться при давлениях $5\div 6$ атмосфер. Наряду с этим, при давлениях $P > 3$ атмосфер, обнаруживается тенденция к образованию в зоне горения объемного разряда «макронеоднородностей» свечения плазмы, т.е. образование зон с повышенной и пониженной интенсивностью свечения. Этот эффект наиболее заметен при зажигании объемного разряда на частотах повторения импульсов $15\div 20$ Гц. Природа «макронеоднородностей» свечения плазмы может быть связана с неоднородностью поверхности электродов при их изготовлении, а также в

результате накопления тепловых неоднородностей в газовой среде и изменения плотности тока по сечения разрядного промежутка.

4. Заключение

Показано, что коронный разряд может выступать в качестве эффективного источника жесткого ВУФ-излучения. Высокие значения энергии квантов обусловлены высокими значениями энергии возбуждающих электронов в коронирующей области коронного разряда. Последнее связано с тем, что напряженности электрического поля в этой области достигают значений 0.5 МВ/см и более. В таких полях свободные электроны могут иметь средние значения энергии порядка ≈ 30 эВ, достаточных для возбуждения квантов света с энергиями, превышающими пороги ионизации всех компонентов рабочей смеси, в том числе и CO_2 , N_2 , He. Проникновение ионизирующего излучения через сеточный анод обеспечивает также дополнительный канал получения свободных электронов в основном разрядном промежутке в результате внешнего фотоэффекта из катода.

Продемонстрирована целесообразность использования коронного разряда в качестве источника ионизирующего излучения при переходе к сверхатмосферным давлениям. Целесообразно также использовать последовательное включение разряда предионизации и объемного разрядов. Структура с последовательным включением коронного и объемного разрядов обеспечивает устойчивое зажигание объемного самостоятельного разряда в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления ($P_{MAX} = 6$ Атм). Впервые достигнуты удельные плотности энергии накачки от 120 до 400 мДж·см⁻³·Атм⁻¹ в CO_2 -лазерных смесях с повышенным содержанием молекулярных компонентов.

5. Список литературы

- [1] К.М. До, *Разработка малогабаритных CO_2 -лазеров с накачкой объемным разрядом сверхатмосферного давления: дисс. канд. техн. наук, 05-27-02*. Рязань: РГРТУ, 2019.
- [2] Б.А. Козлов, Д.С. Маханько, Импульсно-периодические объемные разряды в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления, *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022)*, TPU Publishing House, 560, 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S5-P-026202.
- [3] В.Ю. Хомич, В.А. Ящиков, *Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO_2 -, N_2 - и F_2 -лазеров*. М.: Физматлит, 2015.
- [4] В.Д. Соболев, *Физические основы электронной техники*. М.: Высшая школа, 1979.
- [5] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда*. Долгопрудный: Интеллект, 2009.
- [6] Б.А. Козлов, В.И. Соловьев, Исследование «электрического ветра» в электродных системах с коронирующими острями, *Журнал технической физики*, Т. 77, 70, 2007.
- [7] Б.А. Козлов, Д.С. Маханько, Времена срабатывания искровых разрядников-обострителей при давлениях до 140 атмосфер, *Вестник РГРТУ*, том 84, 234, 2023, doi: 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245