

04:07

## Зажигание объемного разряда в $\text{CO}_2$ -смесьях повышенного давления

© П.Н. Дашук, К.С. Кулаков, С.Л. Кулаков, Ю.В. Рыбин

Санкт-Петербургский политехнический университет,  
195252 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail:kulakov@delfa.net

(Поступило в Редакцию 6 июля 2007 г.)

Рассмотрены результаты экспериментов по возбуждению объемного разряда (ОР) в газовой смеси  $\text{CO}_2$ -лазеров сверхатмосферного давления при длине разрядного промежутка 5 см. Показано, что при использовании предьонизации мягкого рентгеновского излучения возможно горение ОР в условиях, когда величина  $E/p$  ( $p = 5 \text{ atm}$ ) ниже статического пробивного.

PACS: 51.50.+v, 52.80.-s

Разработка сверхмощных газовых лазеров с импульсной мощностью, превышающей  $10^{17} \text{ W/cm}^2$ , тесно связана с проблемой увеличения энергии лазерного импульса и снижения его длительности. Решение обеих задач однозначно приводит к необходимости использования в активной среде лазера газовых смесей, находящихся при повышенных давлениях [1].

Действительно, минимально возможная длительностью импульса излучения составляет  $\tau_u \sim (\Delta\nu)^{-1}$ , где  $\Delta\nu$  — уширение линии излучения. В случае столкновительной релаксации  $\Delta\nu = NV_m\sigma_c$ , где  $N$  — концентрация атомов,  $V_m$  — тепловая скорость,  $\sigma_c$  — сечение газокинетических столкновений. Таким образом, уширение линии генерации и возможное сокращение длительности импульса определяются давлением среды

$$\tau_u \sim (NV_m\sigma_c)^{-1} \sim p^{-1}. \quad (1)$$

Установим связь давления газовой смеси ( $p$ ) и удельной мощности генерации  $P_g$  в случае накачки активной среды объемным разрядом, контролируемым рекомбинацией.

Как известно [2], эффективная накачка ТЕА-лазеров осуществляется на стадии горения высоковольтного тлеющего разряда, тогда

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha V_d n_e - \beta n_i^2 = 0, \quad (2)$$

где  $n_e$ ,  $n_i$  — концентрация ионов ( $n_e \approx n_i$ ),  $\alpha$ ,  $\beta$  — коэффициенты ионизации и рекомбинации соответственно,  $V_d$  — дрейфовая скорость электронов. В данном случае плотность мощности, выделяемая в разряде, составит

$$P_p = jE = enV_d E = e \frac{\alpha V_d^2}{\beta} E. \quad (3)$$

Учитывая известные зависимости  $\alpha/p = F_1(E/p)$ ,  $V_d = F_2(E/p)$ , получим

$$P_p = \frac{e}{\beta} \left( \frac{\alpha}{p} \right) V_d^2 \left( \frac{E}{p} \right) p^2 = F \left( \frac{E}{p} \right)^2. \quad (4)$$

Таким образом, мощность, выделяемая в разряде, квадратично зависит от давления газа. Соответственно

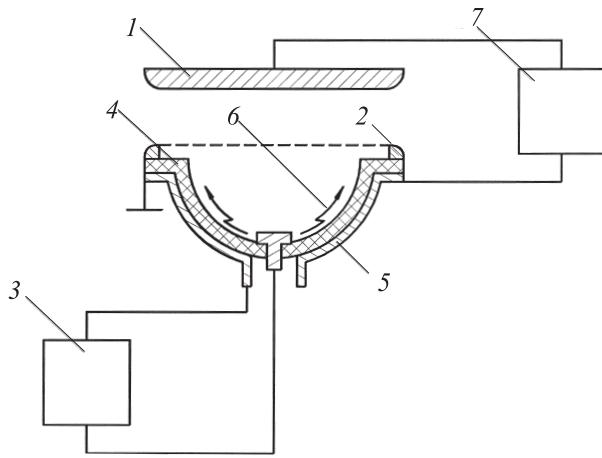
для максимальной мощности излучения ( $P_{\text{max}}$ ), с учетом выражения (1), зависимость максимальной мощности от давления носит кубический характер  $P_{\text{max}} \sim p^3$ .

В настоящее время хорошо отработана техника формирования объемного самостоятельного разряда (ОСР) в газовых средах атмосферного давления с предьонизацией УФ-излучением. Однако создание начальной концентрации электронов таким способом в крупноапертурных лазерах повышенного давления практически невозможно из-за малой проникающей способности УФ-излучения. Этот факт потребовал использования в конструкциях предьонизаторов либо высокоэнергетических электронных пучков [1], либо более коротковолнового излучения, а именно мягкого рентгеновского (МРИ) (SX-ray) [3].

В [4] описана система предьонизации, использующая в качестве источника МРИ излучение наносекундного скользящего разряда (НСР). В основе явления лежит эффект „убегания“ электронов в плазме НСР [5]. Излучение носит тормозной характер и формируется при взаимодействии ускоренных электронов с газом.

Характерной особенностью излучения является его малая длительность ( $t = 3-5 \text{ ns}$ ) и относительно невысокая эффективная энергия  $E_{\text{eff}} = 5-10 \text{ keV}$ , что при достаточно высокой проникающей способности обеспечивает интенсивное поглощение в газе и соответственно высокое значение начальной концентрации фотоэлектронов. Эффект сохраняется при давлениях газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ , вплоть до атмосферного. При запасенной в генераторе энергии 1 Дж, энергия в импульсе рентгеновского излучения составляет порядка  $W = 10^{-3} \text{ J}$ , а мощность рентгеновского излучения достигает величины  $P = (2-3) \cdot 10^5 \text{ W}$ .

Использование данной системы предьонизации позволило сформировать однородный ОСР атмосферного давления в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$  импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера с разрядным промежутком (РП) длиной 22 см и активным объемом  $V = 401$  в диапазоне удельных энергокладов  $60-125 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$  при длительности фронта импульса напряжения —  $\tau_f = 100 \text{ ns}$ . При удельном энергокладе  $125 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$  энергия лазерного излучения составила  $W = 600 \text{ J}$  [4].



**Рис. 1.** 1 — анод; 2 — катод; 3 — наносекундный генератор импульсов напряжения; 4 — оргстеклянная поверхность; 5 — металлизированная подложка; 6 — наносекундный скользящий разряд; 7 — генератор импульсов напряжения (ГИН).

В настоящей работе исследовалась возможность использования системы предыонизации на основе эффекта убегания электронов в плазме НСР, для возбуждения однородного ОР при давлении  $P = 5 \text{ atm}$  и РП = 5 см в газовых смесях с высоким содержанием молекулярных газов.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Электродная система разрядного промежутка была образована плоскими электродами с закругленными краями. В плоской части катода имелось круглое окно для вывода ионизирующего излучения площадью  $S = 95 \text{ cm}^2$ , выполненное из латунной сетки с коэффициентом прозрачности по свету  $\sim 0.7$ . Расстояние между электродами 1 и 2 равнялось 5 см, а рабочий объем, заполненный ОР, —  $V = 475 \text{ cm}^3$ . Герметический корпус разрядной камеры был изготовлен из металла и через диэлектрический фланец, сквозь который проходил высоковольтный ввод, непосредственно пристыковывался к маслозаполненному пятиступенчатому генератору импульсов напряжения (ГИН) — схема питания ОР. ГИН, собранный по схеме Маркса, имел емкость в ударе  $C = 20 \text{ nF}$ , индуктивность разрядного контура (включая разрядную камеру)  $L = 300 \text{ nH}$  и соответственно волновое сопротивление  $\rho = 3.8 \Omega$ .

Максимальное зарядное напряжение ступени ГИН в проверенных экспериментах составляло 50 кВ, что обеспечивало суммарный энергозапас  $W = 625 \text{ J}$ . Длительность переднего фронта импульса напряжения в режиме холостого хода составляла  $\tau_f = 10 \text{ ns}$ .

Система предыонизации состояла из высоковольтного генератора наносекундных импульсов напряжения (рис. 1) и излучателя мягкого рентгеновского излучения. Высоковольтный генератор формировал на согласованной нагрузке  $R = 50 \Omega$  импульс напряжения с амплитудой  $U = 170 \text{ kV}$ , длительностью переднего фрон-

та  $\tau_f = 1 \text{ ns}$ , длительностью импульса по основанию  $t_u = 5 \text{ ns}$  и энергией в импульсе  $W = 0.6 \text{ J}$ .

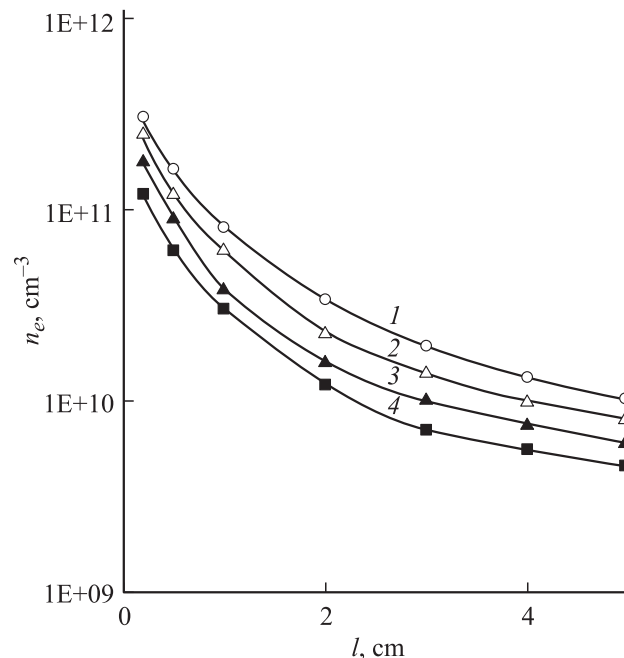
Рентгеновский излучатель представлял собой выгнутую оргстеклянную поверхность (4), профиль которой был выполнен по формуле логарифмической спирали [5] с фокусом в центре РП. Внешняя металлизированная поверхность излучателя — подложка 5 — соединялась с заземленным корпусом высоковольтного генератора. Внутренняя поверхность, вдоль которой формировался наносекундный скользящий разряд 6, отделялась от активного объема вакуумноплотной мембраной из полипропилена толщиной  $12 \mu\text{m}$ , уложенной на опорную решетку. Конструктивно излучатель и высоковольтный генератор были собраны в едином металлическом корпусе и через переходный фланец пристыковывались к разрядной камере.

В процессе проведения экспериментов регистрировалось напряжение на РП и ток ОР, производилось фотографирование разряда. Начальная концентрация электронов в камере измерялась ионизационными датчиками. Эффективная энергия рентгеновского излучения определялась методом ослабления в алюминиевых фольгах [6].

## Экспериментальные результаты

Для выбора оптимального режима работы рентгеновского излучателя проводилось измерение начальной концентрации фотоэлектронов в активном объеме.

На рис. 2 приведены зависимости начальной концентрации фотоэлектронов от расстояния до катода



**Рис. 2.** Зависимости начальной концентрации фотоэлектронов от расстояния до катода для смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ ; 1 —  $2 \cdot 10^5$ , 2 —  $3 \cdot 10^5$ , 3 —  $4 \cdot 10^5$ , 4 —  $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

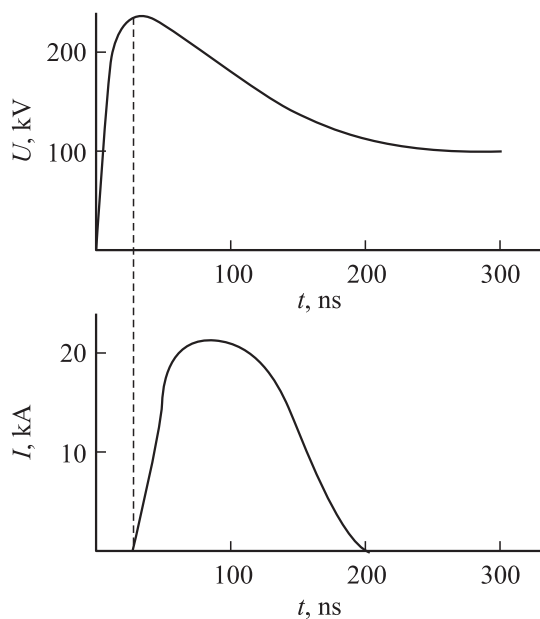


Рис. 3. Осциллограмма ОСР.

в активном объеме разрядной камеры для различных давлений газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  в случае, когда объем рентгеновского излучателя заполнен гелием при давлении  $P = 2 \cdot 10^4$  Па и разделен с активным объемом разрядной камеры вакуумноплотной мембраной. При практическом совпадении величин концентрации фотоэлектронов для гелия и смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  непосредственно за выходным окном излучателя кривая для смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  спадает более круто, что связано с большим значением коэффициента поглощения газовой смеси, по сравнению с гелием.

Использование системы предварительной ионизации МРИ позволило возбудить ОСР в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  при давлении  $P = 5$  atm (ПП = 5 cm) в двух принципиально различных режимах.

В первом случае импульс высокого напряжения с крутым передним фронтом ( $\tau_f = 10$  ns) и напряжением в ударе  $U = 250$  kV подавался на разрядный промежуток спустя 30 ns после импульса рентгеновского излучения (рис. 3).

Задержка в 30 ns оказалась оптимальной с точки зрения устойчивости горения разряда и, по всей видимости, связана с характерным временем термализации электронов. Зажигание разряда происходило при величине приведенной напряженности электрического поля  $E/p = 9.2$  kV/cm · atm ( $U = 230$  kV). Однако при этом наблюдался значительный (50% от напряжения зажигания разряда) недоразряд высоковольтных конденсаторов ГИН. Приведенная напряженность электрического поля погасания разряда составляла  $E/p = 4.6$  kV/cm · atm. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом. Перераспределение напряжения ГИН между сопротивлением разрядной плазмы и импедансом разрядного контура привело к тому, что в условиях высокой

скорости гибели электронов за счет рекомбинации величины электрического поля оказывается недостаточно для поддержания необходимого уровня размножения электронов.

Из вышесказанного следует, что для эффективной накачки активной среды в режиме „короткого“ фронта (КФ) требуются схемы питания ОСР с предельно малыми значениями импеданса разрядного контура.

Во втором случае на электродах разрядного промежутка формировался импульс напряжения с плоской вершиной (работа ГИН в режиме холостого хода) с амплитудой, меньшей пробивного напряжения (величина пробивного напряжения  $U_s = 250$  kV), а импульс рентгеновского излучения использовался для инициации ОР.

В диапазоне приложенных напряжений (0.9–0.95) от пробивного напряжения были получены две стадии разряда (рис. 4): слаботочная (медленная) —  $\sim 4.5$   $\mu\text{s}$ ; сильноточная (быстрая) —  $\sim 450$  ns.

В слаботочной стадии при величине амплитуды приложенного напряжения  $U_n = 230$  kV происходил разряд накопительных конденсаторов ГИН на 15% от величины приложенного напряжения ( $\Delta U = 34.5$  kV) при среднем значении разрядного тока  $I = 150$  А, после чего разряд переходил в сильноточную стадию с полным разрядом накопительных конденсаторов.

В отличие от режима КФ, при котором длительность протекания разрядного тока не превышала 200 ns, длительность протекания разрядного тока в сильноточной стадии составляла  $t = 450$  ns при меньшей, нежели в режиме КФ, величине амплитуды.

Суммарная величина приведенного удельного энерговыклада в активный объем составляла  $w = 220$  J/1 · atm.

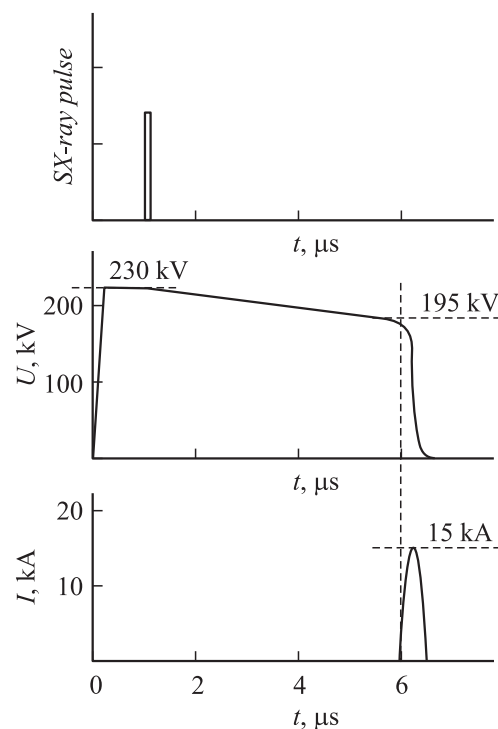


Рис. 4. Осциллограммы ОСР.

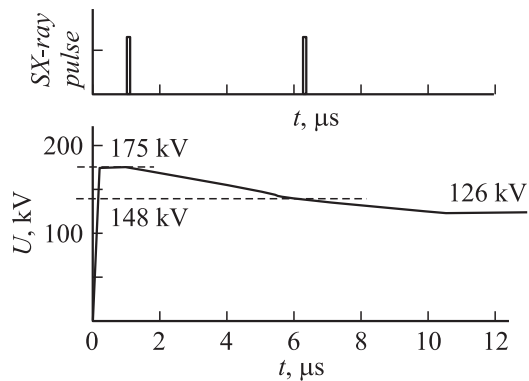


Рис. 5. Осциллограмма ОСР.

При амплитуде приложенного напряжения меньше 0.9 от пробивного напряжения ( $E/p = 8.8 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ) и вплоть до 0.55 ( $E/p = 5 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ) формировалась только медленная стадия горения ОР, после чего разряд погасал. При этом длительность разряда практически не менялась ( $t \approx 5 \mu\text{s}$ ), и величина разряда накопительных конденсаторов ГИН в среднем составляла 15% от приложенного напряжения. При меньших значениях приложенного напряжения разряд не загорался.

При формировании разряда в области оптимальных [7] для накачки активной среды значений  $E/p$  разряд возбуждался при амплитуде приложенного напряжения  $U = 150 \text{ kV}$  ( $E/p = 6 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ) и погасал при напряжении  $U = 127 \text{ kV}$  ( $E/p = 5 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ). При этом была получена величина приведенного удельного энерговклада  $w = 260 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$ .

В работе исследовалась возможность получения длительности горения разряда (накачки активной среды) свыше  $5 \mu\text{s}$ . С этой целью была использована система предварительной ионизации, включающая в себя два высоковольтных импульсных генератора, нагруженных на общий рентгеновский излучатель.

При срабатывании первого генератора (рис. 5) разряд загорался при величине приложенного напряжения  $U = 175 \text{ kV}$  ( $E/p \approx 7 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ). Через  $5 \mu\text{s}$  при напряжении  $148 \text{ kV}$  ( $E/p \approx 5.9 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ) разряд погасал. Вслед за этим через  $100\text{--}200 \text{ ns}$  срабатывал второй генератор, инициируя повторное зажигание заряда. Длительность горения повторно инициированного разряда также была равна  $t \approx 5 \mu\text{s}$ , и разряд погасал при напряжении  $U = 126 \text{ kV}$  ( $E/p \approx 5 \text{ kV/sm} \cdot \text{atm}$ ).

В этом случае значение приведенного удельного энерговклада было равно  $w = 60 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$  при величине среднего тока  $I = 100 \text{ A}$ .

Можно предположить, что при наличии системы предварительной ионизации МРИ, формирующей последовательность (пачку) импульсов рентгеновского излучения с частой следования  $f = 200 \text{ kHz}$ , и достаточной энергоемкости накопительных конденсаторов схемы питания ОСР возможно возбуждение квазинепрерывного режима горения разряда (накачки активной среды) длительностью в десятки микросекунд.

## Заключение

1. Использование системы предыонизации мягким рентгеновским излучением, генерируемым плазмой НСР, позволило возбудить ОСР в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  при давлении  $p = 5 \text{ atm}$  и разрядном промежутке длиной  $5 \text{ cm}$  при длительности переднего фронта импульса напряжения ( $\tau_f = 10 \text{ ns}$ ) ГИН.

2. При включении постоянного напряжения, величина которого меньше пробивного для данного РП, и освещении межэлектродного объема коротким ( $t_u = 3\text{--}5 \text{ ns}$ ) импульсом рентгеновского излучения получены две стадии горения разряда ( $p = 5 \text{ atm}$ , РП =  $5 \text{ cm}$ ,  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ ): слаботорочная (медленная) —  $\approx 5 \mu\text{s}$ ; сильноторочная (быстрая) —  $\approx 450 \text{ ns}$ .

3. Определены условия формирования слаботорочной (медленной) стадии горения разряда без дальнейшего перехода разряда в сильноторочную стадию.

4. Показана возможность формирования разряда в слаботорочной стадии с длительностью горения  $5 \mu\text{s}$  и более.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, грант № 07-08-00814.

## Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] Карношин В.Н., Солоухин Р.И. Микроскопические и молекулярные среды в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981. 200 с.
- [3] Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Кучинский А.А., Рыбин Ю.В., Смирнов В.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 50–57.
- [4] Кулаков С.Л., Кучинский А.А., Масленников А.Г., Рыбин Ю.В., Смирнов В.А., Томашевич В.Л., Шестаков И.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 43–48.
- [5] Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Рыбин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 7. С. 438–442.
- [6] Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Чистов Е.К. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 7. С. 39–44.
- [7] Baranov G.A., Maslennikov A.G., Tomashevich V.P., Kuchinsky A.A. // Plasma devices and operation. 1994. Vol. 3. P. 343–351.