

# СО<sub>2</sub>-лазер атмосферного давления с иницируемым пучком электронов разрядом, сформированным в рабочей смеси

С.Б.Алексеев, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко

*Создан СО<sub>2</sub>-лазер атмосферного давления с разрядом, иницируемым пучком электронов, который сформирован в рабочей смеси лазера. Получена энергия излучения 18 мДж от активного объема ~6 см<sup>3</sup>. Продемонстрирована работа лазера при частоте повторения импульсов до 5 Гц. В газовой смеси состава СО<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>: He = 1:1:4 при атмосферном давлении в процессе импульсного самостоятельного разряда с ионизационным усилением реализованы удельные энерговыклады ~0.1 Дж/см<sup>3</sup>.*

**Ключевые слова:** СО<sub>2</sub>-лазер, предыонизация пучком электронов, сформированным в рабочей смеси.

## 1. Введение

Использование пучка электронов в качестве внешнего источника ионизации сжатых газовых сред позволяет с меньшими затратами создавать активную среду в импульсных и импульсно-периодических СО<sub>2</sub>-лазерах [1, 2]. В случае малой длительности импульса электронов (~1 нс) основная доля энергии вводится на стадии распада плазмы, а электронный пучок осуществляет предварительную ионизацию в активном объеме. Уменьшение длительности импульса пучка электронов, используемых для иницирования разряда в СО<sub>2</sub>-лазерах, позволяет существенно снизить энергию, затрачиваемую на создание проводимости в газовом промежутке. В оптимальных условиях эта энергия не превышает 1% от энергии, вложенной в активную среду в процессе основного разряда [2]. В [3, 4] было показано, что применение для получения пучка ускоренных электронов отпаянных вакуумных диодов и диодов, выполненных в виде линии с распределенными параметрами, позволило существенно уменьшить габариты СО<sub>2</sub>-лазеров с накачкой разрядом, иницируемым пучком электронов.

Формирование наносекундных пучков электронов достаточно сложная задача, связанная с получением электронных пучков и выводом их через окно, разделяющее газовую и вакуумную кюветы. В работе [5] предыонизация активного объема СО<sub>2</sub>-лазера осуществлялась пучком электронов, сформированным в той же рабочей смеси. Однако рабочее давление данного лазера было малым (~20 Тор), энергия импульса излучения при активной длине ~12 см не превышала 0.3 мДж, а электронный пучок формировался в газовом диоде при больших параметрах  $E/p$  ( $E$  – напряженность электрического поля,  $p$  – давление газа), которые были выше критических для формирования пучка электронов в газах [6]. В работах [7, 8] было показано, что при подаче наносекундных им-

пульсов на газовый диод электронный пучок можно получить при параметрах  $E/p$ , существенно меньших критических. В [7, 8] электронный пучок был получен при атмосферном давлении в гелии (амплитуда тока  $J_{\max} = 200$  А, плотность тока  $j > 10$  А/см<sup>2</sup>, средняя энергия электронов  $\varepsilon \sim 150$  кэВ), в воздухе ( $J_{\max} = 10$  А,  $j > 1$  А/см<sup>2</sup>,  $\varepsilon \sim 90$  кэВ), в азоте ( $J_{\max} = 3.5$  А,  $j > 0.35$  А/см<sup>2</sup>) и в смеси СО<sub>2</sub> – N<sub>2</sub> – He ( $J_{\max} = 12$  А).

Цель настоящей работы – создание импульсно-периодического СО<sub>2</sub>-лазера с разрядом, иницируемым пучком электронов, который был бы сформирован в той же газовой смеси при атмосферном давлении. Использовались результаты по формированию электронных пучков в газовых диодах, которые получены нами ранее в [7–9].

## 2. Экспериментальная установка и методика измерения

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Для формирования пучка электронов использовался генератор импульсов 1, подробно описанный в работе [10]. Он позволял формировать на согласованной нагрузке 30 Ом импульс напряжения с амплитудой 200 кВ и длительностью на полувысоте ~3 нс при длительности фронта ~1 нс. Установка имела два газовых промежутка, сообщающихся между собой и заполненных смесью газов СО<sub>2</sub> – N<sub>2</sub> – He. Первый промежуток длиной 20 мм образован катодом 2 и сеткой 3. Катод выполнен из графита в виде таблетки диаметром 29 мм, выпуклой в сторону фольги с радиусом кривизны 10 см. Сетка изготовлена из стали и имела прозрачность по свету ~50%. В ряде экспериментов вместо сетки применялась алюминировано-бериллиевая фольга толщиной 40 мкм.

Импульс напряжения подавался от генератора импульсов 1 на катод 2. Пучок электронов, сформированный в процессе импульсного разряда в первом промежутке, выводился через сетку либо алюминировано-бериллиевую фольгу во второй промежуток, который имел длину 10 мм. Второй промежуток образован сеткой либо алюминировано-бериллиевой фольгой 3 и профилированным электродом 4 из нержавеющей стали размером

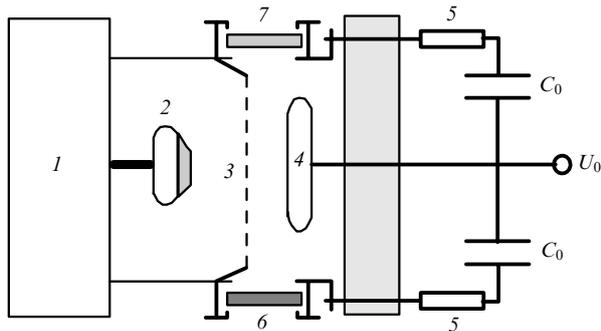


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор; 2 – катод; 3 – фольга или сетка; 4 – электрод; 5 – шунт для измерения тока пучка; 6 и 7 – зеркала резонатора.

70 × 10 мм. Диаметр пучка электронов на расстоянии 1 см от сетки равнялся 80 мм, что обеспечивало зажигание разряда по всей длине электрода 4. Напряжение  $U_0$ , подаваемое на межэлектродный промежуток, изменялось от 5 до 15 кВ. Суммарная емкость конденсаторов  $C_0$  составляла 9.9 нФ. Резонатор состоял из медного зеркала 6 (радиус кривизны 2.5 м) и ZnSe-зеркала 7 с многослойным покрытием (коэффициент отражения 90 %). Сигнал с низкоомного шунта 5 регистрировался осциллографом TDS-220. Калориметр ИМО-2Н использовался для измерения энергии в импульсе и средней мощности лазерного излучения. Длительность импульса лазерного излучения определялась с помощью фотоприемников ФП-1 или ФСГ-22-3А2. Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В первом газовом промежутке при подаче наносекундного импульса напряжения формировался пучок электронов длительностью не более 1 нс [7–9]. Максимум распределения электронов по энергии в выведенном пучке зависел от сорта газа и соответствовал энергии электронов 70–100 кэВ, плотность тока пучка также зависела от сорта газа и составляла 0.3–15 А/см<sup>2</sup>. Электронный пучок использовался для инициирования разряда во втором газовом промежутке, при этом в первом промежутке находилась та же газовая смесь ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 4$ ) и при том же давлении, что и во втором. Оба газовых промежутка были сообщающимися за счет сетки или отверстий в фольге. Последние были сделаны сбоку и не попадали в зону разряда.

На рис.2 для давления рабочей смеси 1 атм показаны осциллограммы тока разряда во втором промежутке и импульса излучения, а также фотография свечения разряда. Время нарастания тока разряда до максимума составило ~80 нс. После прохождения тока пучка и разряда конденсаторов  $C_0$  на них оставалось напряжение, что свидетельствует о формировании объемного разряда. Сопоставление измерений по «подсадке» напряжения на конденсаторе и по осциллограммам импульса тока через газовый промежуток показывает, что практически вся энергия вводится в газ за время ~170 нс. Амплитуда тока разряда для условий рис.2 составляла 800 А. Как уже отмечалось, разряд был однородным и заполнял равномерно всю межэлектродную область (см. вставку на рис.2). Импульс излучения возникал спустя 550–650 нс после начала импульса тока и имел длительность по по-

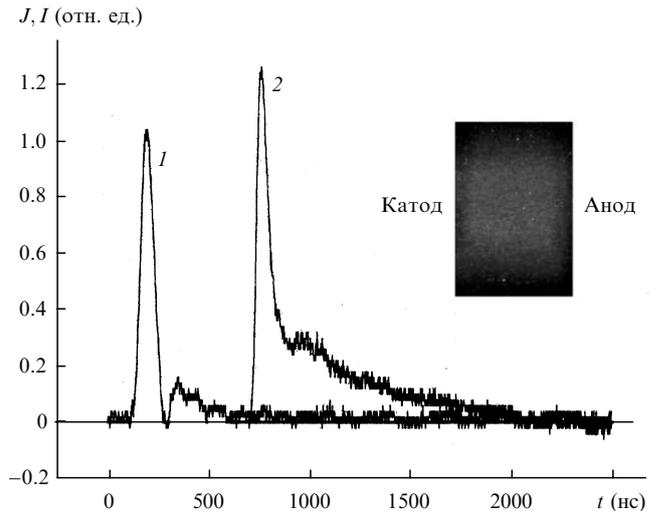


Рис.2. Осциллограммы разрядного тока  $J$  (1) и интенсивности генерации  $I$  (2), а также фотография свечения разряда (вставка) при давлении смеси состава  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 4$ , равном 1 атм.

лувысоте ~80 нс при давлении 1 атм.

На рис.3 приведены зависимости вводимой в газ удельной энергии при ионизации активной среды пучком электронов, инжектируемым через сетку, и энергии излучения от давления. Максимальная энергия излучения 18 мДж была реализована при КПД, примерно равном 2.3 % от запасенной в конденсаторах  $C_0$  энергии. Лазер мог работать с частотой следования импульсов до 5 Гц, при более высоких частотах исследования не проводились.

Отметим, что в отличие от работ [11, 12], где основной накопитель также заряжался до напряжения ниже статического пробивного, а для предыонизации использовался дополнительный высоковольтный импульс или серия импульсов, нам удалось существенно увеличить рабочее давление в лазерной камере. Так, в [11] рабочее давление смеси, содержащей 50 % гелия, не превышало 30 Тор, а в [12] даже при использовании дополнительной УФ предыонизации и увеличенном содержании гелия в смеси (~70 %) оно не превышало 150 Тор.

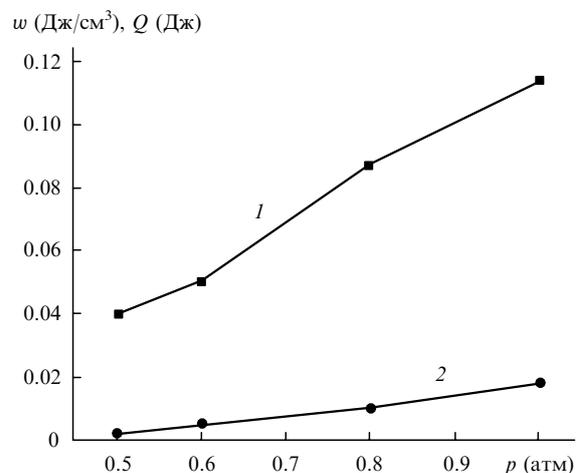


Рис.3. Зависимости вводимой в газ удельной энергии  $w$  (1) и энергии излучения  $Q$  (2) при ионизации активной среды пучком электронов, инжектируемым через сетку, от давления  $p$  для смеси состава  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 4$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые продемонстрирована работа CO<sub>2</sub>-лазера с накачкой разрядом, иницируемым пучком электронов, который был сформирован в рабочей смеси лазера при атмосферном давлении. Такой способ иницирования разряда является весьма перспективным для создания короткоимпульсных лазеров высокого давления.

Авторы благодарят В.Хассона (V.Hasson) за иницирование работы в данном направлении и С.Д.Коровина за предоставление генератора.

1. Электроионизационный метод накачки газовых лазеров и его приложения. *Труды ФИАН*, **116** (1980).
2. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
3. Бычков Ю.И., Орловский В.М., Осипов В.В., Потеряев А.Г. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 185 (1983).
4. Карпов В.М., Месяц Г.А., Орловский В.М., Осипов В.В., Потеряев А.Г. *ЖТФ*, **57**, 2335 (1987).
5. Колбычев Г.В., Колбычева П.Д. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 12, 79 (2002).
6. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
7. Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **29** (10), 29 (2003).
8. Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Письма в ЖТФ*, **29** (16), 45 (2003).
9. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунаев А.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 3, 94 (2003).
10. Губанов В.П., Коровин С.Д., Пегель И.В., Ростов В.В., Степченко А.С., Тараканов В.П. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 12, 110 (1996).
11. Reilly J.P. *J. Appl. Phys.*, **43**, 3411 (1972).
12. Hill A.E. *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 670 (1973).