

Лазер на двуокиси углерода с разрядом, инициируемым пучком электронов в рабочей смеси лазера с давлением до 5 атм

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

Создан CO₂-лазер высокого давления с разрядом, инициируемым пучком электронов субнаносекундной длительности, сформированным в рабочей смеси лазера с давлением до 5 атм. При длительности импульса излучения 20 нс энергия с активного объема ~4 см³ составила 40 мДж. Продемонстрирована работа лазера при частоте следования импульсов до 5 Гц. В газовой смеси CO₂:N₂:He = 1:1:6 при давлении 5 атм в процессе импульсного несамостоятельного разряда с ионизационным усилением реализованы удельные энерговыходы ~0.07 Дж·см⁻³·атм⁻¹.

Ключевые слова: CO₂-лазер, пучок электронов, высокое давление.

1. Введение

В настоящее время проблеме формирования мощных коротких импульсов излучения CO₂-лазера и их использованию уделяется достаточно большое внимание. Так, в работе [1] получено излучение высокой мощности (2 кВт) в диапазоне 0.5–3 ТГц при смешении двух частот излучения CO₂-лазеров на нелинейном кристалле GaAs, а сверхмощные поля ИК диапазона могут использоваться для получения частиц высокой энергии [2].

Для формирования оптических полей высокой мощности применяется система генератор–усилитель. В случае активной среды атмосферного давления полоса пропускания усилительного каскада невысока, поскольку спектр усиления состоит из отдельных вращательных линий и не позволяет усиливать импульсы короче единиц наносекунд. В работе [3] для формирования импульсов излучения было предложено использовалось усиление пикосекундных импульсов CO₂-лазера в активных средах высокого давления CO₂-усилителей. В работе [4] с помощью этого метода была получена пиковая мощность импульса излучения CO₂-лазера 15 ТВт (45 Дж, 3 пс). Давление активной среды последнего усилителя данной системы составляло 2.5 атм. Полоса пропускания, требуемая для усиления лазерного импульса длительностью 3 пс в активной среде с давлением 2.5 атм, обеспечивалась поперечным уширением спектра среды под действием излучения интенсивностью до 140 ГВт/см². Энергия насыщения для импульса длительностью 3 пс составляла 120 мДж/см². Лазер генерировал излучение на шести вращательных линиях. Дальнейшее увеличение пиковой мощности таких лазерных CO₂-систем связано с ростом давления активной среды и соответствующим увеличением полосы пропускания для усиления коротких импульсов.

Увеличение давления активной среды наиболее эффективно при использовании потока электронов для инициирования разряда в сжатых средах импульсных и импульсно-периодических CO₂-лазеров [5–7]. В работах [8, 9] показано, что для реализации несамостоятельного разряда можно использовать импульс тока пучка длительностью до ~1 нс. При такой длительности в результате увеличения плотности тока пучка достигается высокая концентрация электронов при атмосферном давлении смеси и реализуется эффективный режим работы лазера. С увеличением давления выше атмосферного можно использовать импульсы тока пучка короче 1 нс. В случае малой длительности потока электронов (~1 нс) основная доля энергии вводится на стадии распада плазмы, а электронный пучок осуществляет предварительную ионизацию в активном объеме. Сокращение длительности импульса пучка электронов, используемых для инициирования разряда в CO₂-лазерах, позволяет существенно снизить энергию, затрачиваемую на создание проводимости в газовом промежутке. В оптимальных условиях эта энергия не превышает 1% энергии, вложенной в активную среду в процессе основного разряда [7]. В работах [8, 9] было показано, что применение отпаянных вакуумных диодов для получения пучка ускоренных электронов позволило существенно уменьшить габариты CO₂-лазеров с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов. Кроме того, использование потока электронов наносекундной длительности позволило повысить давление активной среды CO₂-лазеров, что перспективно для формирования импульсов малой длительности и получения плавной перестройки частоты излучения.

Формирование наносекундных пучков электронов является достаточно сложной задачей, связанной с получением электронных пучков и их выводом через окно, которое разделяет газовую и вакуумную кюветы. В работе [10] показано, что при подаче наносекундных высоковольтных импульсов на газовый диод электронный пучок можно получить при значениях параметра E/p (E – напряженность электрического поля на газовом промежутке, p – давление) существенно меньших критических, необходимых для формирования убегающих электронов [11]. В [12] электронный пучок при атмосферном давлении

В.М.Орловский, С.Б.Алексеев, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: orlovskii@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 6 апреля 2011 г., после доработки – 2 августа 2011 г.

был получен: в гелии – с амплитудой тока пучка 200 А (плотность тока пучка более 10 А/см^2 , средняя энергия электронов $\sim 150 \text{ кэВ}$), в воздухе – с амплитудой 10 А (плотность тока пучка более 1 А/см^2 , средняя энергия электронов $\sim 95 \text{ кэВ}$), в азоте – с амплитудой 3.5 А (плотность тока пучка более 0.35 А/см^2) и в смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ – с амплитудой 12 А. На этой основе был создан CO_2 -лазер атмосферного давления с разрядом, инициируемым потоком электронов, который был сформирован в этой же газовой среде [13]. Дальнейшее увеличение давления в таких лазерных системах связано с возможностью формирования объемного разряда в диодном промежутке и создания на его основе субнаносекундного потока электронов в сжатых лазерных средах.

Целью настоящей работы является создание импульсно-периодического CO_2 -лазера высокого (до 5 атм) давления с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов, который был бы сформирован в той же газовой смеси.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В генератор импульсов 1 (СИНУС) [14] была встроена дополнительная передающая линия с волновым сопротивлением 40 Ом. Это позволило повысить давление в газовом диоде до 6 атм. Генератор формировал на согласованной нагрузке 40 Ом импульс напряжения с амплитудой $\sim 180 \text{ кВ}$ и длительностью на полувысоте $\sim 1.5 \text{ нс}$ при фронте $\sim 0.5 \text{ нс}$. Катод 2 состоял из набора трех цилиндров диаметрами 12, 22 и 30 мм из титановой фольги толщиной 50 мкм, вставленных друг в друга таким образом, что цилиндр диаметром 12 мм был выше среднего цилиндра диаметром 22 мм на 2 мм, а крайнего – на 4 мм. Установка имела два газовых промежутка, сообщающихся между собой и заполненных смесью газов $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$. Первый промежуток длиной 17 мм был образован катодом 2 и сеткой 3 с ячейками $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$, изготовленной из стали. В ряде экспериментов с целью выравнивания электрического поля в лазерном промежутке вместо сетки применялась фольга из AlBe толщиной 40 мкм. Результаты опытов с сеткой и фольгой из AlBe были идентичны. Импульс напряжения от генератора импульсов 1 подавался на катод 2. Пучок электронов, сформированный в процессе импульсного разряда в первом промежутке, выводился через сетку либо фольгу во второй промежуток. Второй промежуток, равный 6 мм, был образован сеткой или фольгой и профилированным электродом 4 из нержавеющей стали.

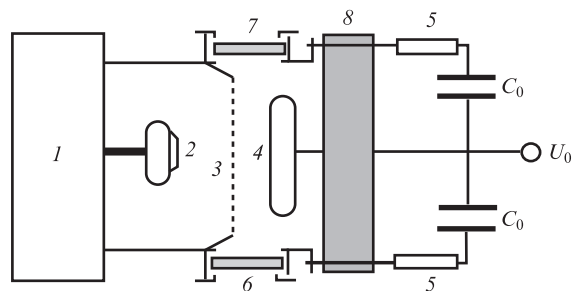


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор импульсов; 2 – катод; 3 – фольга из AlBe (сетка из стали); 4 – анод; 5 – токовый шунт; 6 – зеркало; 7 – выходное окно; 8 – изолятор (оргстекло).

вещею стали размером $70 \times 10 \text{ мм}$. Диаметр пучка электронов на расстоянии 1 см от сетки равнялся 80 мм, что обеспечивало зажигание разряда по всей длине электрода 4. Напряжение U_0 подавалось на межэлектродный промежуток от дополнительного источника питания постоянного напряжения и изменялось от 10 до 35 кВ. Суммарная емкость накопителя C_0 равнялась 6.6 нФ. Резонатор состоял из медного зеркала 6 (радиус кривизны 2,5 м) и зеркала из ZnSe с многослойным покрытием 7 (коэффициент отражения 90%). Параметры пучка электронов регистрировались коллектором, выполненным на основе двухстороннего стандартного разъема. Площадка для фиксации параметров пучка электронов (диаметр 20 мм, латунь) размещалась в цилиндре с внутренним диаметром 25 мм (подвижная часть разъема) на центральной части разъема с одной из сторон, а другая сторона соединялась с кабелем. Измерения проводились при размещении в рабочей кювете фланца с коллектором, заменившего электрод 4 с изолятором. Нестабильность плотности пучка электронов в области расположения электрода 4 составляла не более 15%. Для регистрации сигналов с емкостного делителя, коллекторов и шунтов применялся осциллограф TDS-7405 с полосой 4 ГГц и частотой дискретизации 20 ГГц или осциллограф TDS-334 с полосой 0.3 ГГц и частотой дискретизации 2.5 ГГц. Калориметр ИМО-2Н использовался для измерения энергии в импульсе и средней мощности лазерного излучения. Длительность импульса лазерного излучения определялась с помощью фотоприемника ФП-1 или ФСГ-22-3А2. Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Как было показано ранее в [15], в неоднородном электрическом поле при коротком фронте напряжения на промежутке в различных газах формируется пучок электронов с амплитудой в десятки и сотни ампер. При этом в промежутке наблюдается объемный разряд – струи в виде конуса или нескольких конусов с яркими пятнами на катоде. Использование генератора СИНУС с дополнительной передающей линией и кольцевого профилированного катода позволило сформировать регулярную структуру катодных пятен и объемный разряд в виде конусов при давлениях выше атмосферного, а также существенно расширить область давлений, при которых формируется электронный пучок. На рис.2 приведены зависимости амплитуды напряжения на первом газовом промежутке, плотности тока пучка и длительности импульса тока на полувысоте от давлений гелия и азота. Плотность тока пучка для He немного растет с увеличением давления и стремится к насыщению; для N_2 наблюдается уменьшение плотности тока с увеличением давления. Уменьшение плотности тока пучка в азоте при давлении 2–4 атм связано с уменьшением области, занимаемой объемным разрядом, и с началом контрагирования разряда при давлении $\sim 4 \text{ атм}$. Длительности импульсов тока пучка при измерениях с разрешением до 0.14 нс в гелии и азоте составляли на полувысоте $\sim 0.2 \text{ нс}$ (рис.3, 4). Установлено, что регистрируемая длительность импульса тока пучка зависела от диаметра коллектора и была минимальной при его малых размерах. Плазма, расширяющаяся от катода, в разных точках подходит к аноду не одновременно, соответственно время достижения критического поля так-

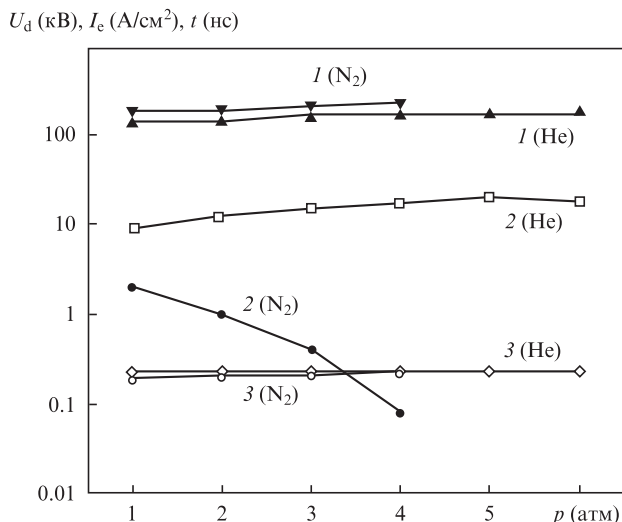


Рис.2. Амплитуда напряжения (1), плотность тока (2) и длительность импульса тока пучка электронов на полувысоте (3) как функции давления гелия и азота для первого промежутка.

же имеет разброс, а длительность импульса полного тока больше, чем длительность тока с небольшого участка площади анода. Средняя энергия электронов пучка в оптимальном режиме составляет ~60% энергии, соответствующей максимальному напряжению на промежутке. Все эти данные подтверждают предположение [12, 15] о формировании пучка электронов между фронтом плазмы, расширяющейся от катода, и анодом при достижении критического поля.

В первом газовом промежутке при подаче наносекундного импульса напряжения формировался пучок электронов длительностью ~0.2 нс. Максимум распределения электронов по энергиям в пучке зависел от сорта газа и соответствовал энергии электронов 70–100 кэВ, плотность тока пучка также зависела от сорта газа и составляла 5–20 А/см². Электронный пучок был использован для инициировании разряда во втором газовом промежутке, при

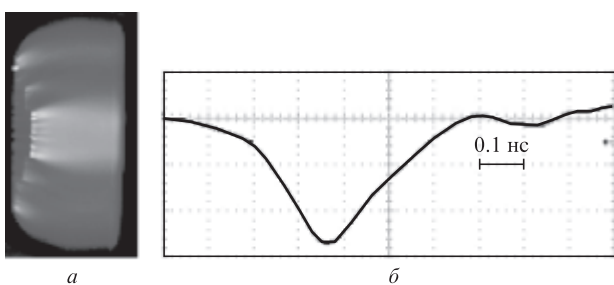


Рис.3. Интегральное свечение разряда в гелии при давлении 6 атм (а) и импульс тока пучка (б).

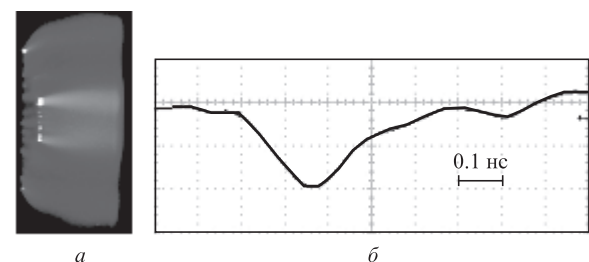


Рис.4. Интегральное свечение разряда в азоте при давлении 2 атм (а) и импульс тока пучка (б).

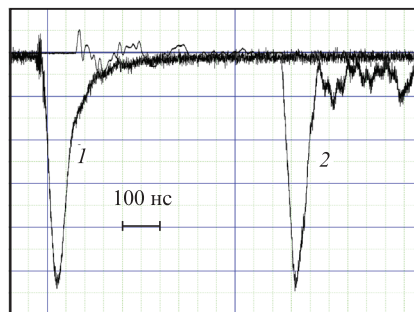


Рис.5. Осциллограммы импульсов тока разряда (1) и импульса лазерного излучения (2) при давлении рабочей смеси 4 атм.

этом в первом газовом промежутке находилась та же газовая смесь $CO_2:N_2:He=1:1:6$ и при том же давлении, что и во втором. Оба газовых промежутка сообщались через сетку или отверстия в фольге. Последние находились сбоку и не попадали в зону разряда. Время нарастания импульса тока разряда до максимума при давлении смеси 5 атм составляло ~25 нс, и практически вся энергия вводилась в газ за время ~50 нс. Амплитуда тока разряда была равна ~1200 А. Импульс излучения возникал спустя 500 нс после начала импульса тока, а его длительность на уровне половины амплитуды была равна ~20 нс при давлении 4 атм. Энергия излучения составляла 40 мДж при КПД от запасаемой энергии 2.8%.

На рис.5 для давления рабочей смеси 4 атм показаны осциллограммы импульсов тока разряда во втором промежутке и импульса лазерного излучения. После прохождения тока пучка и разряда на конденсаторах C_0 оставалось напряжение (около 1/3 от исходного), 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 примерно за 50 нс.

На рис.6 приведена зависимость энергии излучения от давления рабочей смеси. Максимальная энергия была получена при давлении 5 атм газовой смеси $CO_2:N_2:He=1:1:6$ и при удельной энергии, рассеянной в газе, 0.067 Дж·см⁻³·атм. Лазер работал с частотой следования импульсов до 5 Гц, при более высоких частотах исследования не проводились.

Таким образом, в работе впервые показана возможность создания CO_2 -лазера с разрядом, инициируемым пучком электронов субнаносекундной длительности, сформированным в рабочей смеси при давлении 5 атм. Такой способ создания активной среды является перспектив-

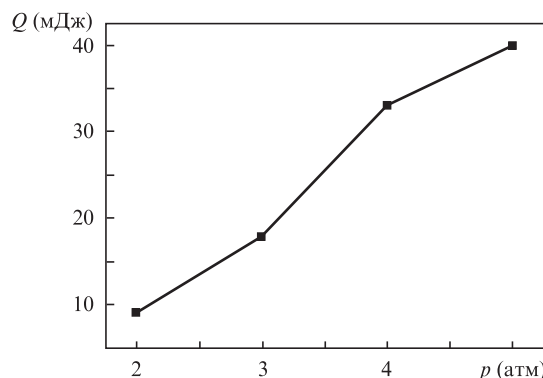


Рис.6. Зависимость энергии излучения от давления рабочей смеси.

ным для создания лазеров с малой длительностью излучения и плавной перестройкой его частоты.

1. Tochitsky S.Ya., Sung Chieh, Trubnick S.E., Joshi Chan, Vodopyanov K.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24** (9), 2509 (2007).
2. Pogorelsky I., Shkolnikov P., Chen M., Pukhov A., Yakimenko V., McKenna P., Carroll D., Neely D., Najmudin Z., Willingdale L., Stolyarov D., Stolyarova E., Flynn G. *AIP Conf. Proc.*, **1086**, 532 (2009).
3. Corkum P.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21** (3), 216 (1985).
4. Haberberger D., Tochitsky S., Joshi C. *Opt. Express*, **18** (17), 17865 (2010).
5. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Керимов О.М., Ковш И.Б., Подсосонный А.С., Сучков А.Ф. *ЖЭТФ*, **17** (3), 147 (1973).
6. Орловский В.М. *Изв. вузов. Сер. Физика*, №8, 74 (1999).
7. Карпов В.М., Конев Ю.Г., Орловский В.М., Осипов В.В., Пономарёв В.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 465 (1988).
8. Бычков Ю.И., Орловский В.М., Осипов В.В., Потеряев А.Г. *ПТЭ*, №5, 185 (1983).
9. Карпов В.М., Месяц Г.А., Орловский В.М., Осипов В.В., Потеряев А.Г. *ЖТФ*, **57** (12), 2335 (1987).
10. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Степченко А.С., Тарасенко В.Ф. *ПТЭ*, №4, 81 (2003).
11. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
12. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **30** (20), 35 (2004).
13. Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **33** (12), 1059 (2003).
14. 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).
15. Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. и др. *Письма в ЖТФ*, **29** (10), 29 (2003).