

В.В. Осипов, В.А. Сабуров, В.А. Шитов, В.В. Платонов, М.Г. Иванов

Мощный CO₂-лазер с регулируемой формой и длительностью импульсов излучения в широком диапазоне

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 15.12.2003 г.

Сообщается о конструкции и характеристиках мощного CO₂-лазера, накачиваемого несамостоятельным разрядом, поддерживаемым электронным пучком. Объем активной среды составляет 20 л (10 × 20 × 100 см), давление — 50–200 торр.

Отличительной особенностью лазера является возможность изменения длительности излучения от 50 мкс вплоть до непрерывного излучения, частоты следования импульсов — до 5 кГц, формы импульса излучения — по заданному закону. Такая высокая регулируемость выходных параметров обеспечивается благодаря возможности регулировки параметров пучка ускоренных электронов, контролирующего ток несамостоятельного разряда накачки лазера.

Регулируемость длительности излучения открывает широкие возможности для выявления оптимальных параметров излучения для силовых лазерных технологий: резка, сварка материалов, получение наноразмерных порошков твердых веществ, напыление тонких пленок на поверхности изделий и т.д.

Сообщается о реализации возможности управления длительностью импульсов накачки CO₂-лазера «НЭИЛ-20» со средней выходной мощностью излучения 20 кВт. Излагаются метод управления и его схематическое воплощение.

CO₂-лазеры, накачиваемые несамостоятельным разрядом, поддерживаемым электронным пучком (электроионизационные лазеры), предложены в 1970-е гг. [1, 2]. За это время их средняя мощность излучения достигла сотен киловатт [3], а энергия, генерируемая в импульсе, нескольких единиц и даже десятков килоджоулей [4, 5]. Электроионизационные лазеры с высокой средней мощностью работают, в основном, в непрерывном режиме, что связано с большими трудностями по созданию простых, надежных и долговечных импульсно-периодических ускорителей электронов. Однако в настоящее время в ускорительной технике известен ряд подходов, позволяющих преобразовать непрерывные потоки электронов в импульсно-периодические [6].

В настоящей статье рассматривается возможность управления длительностью накачки, а следовательно, длительностью импульсов излучения, без изменения средней мощности накачки и излучения, используя достаточно простую систему управления током пучка электронов.

Для проведения исследований по управлению длительностью и формой импульсов токов накачки использовался CO₂-лазер «НЭИЛ-20».

Блок-схема CO₂-лазера «НЭИЛ-20» приведена на рис. 1. Лазерная кювета имела активный объем газа 10 × 20 × 10 см. Размеры анода 20 × 100 см. Максимальная плотность тока электронного пучка j_e в плоскости анода разрядной камеры составляла 120 А · см⁻², энергия электронов находилась в пре-

делах 180–200 кэВ. Объемный расход лазерной смеси может изменяться вплоть до максимального значения $V_{\max} = 8 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ за счет регулирования числа оборотов вентилятора.

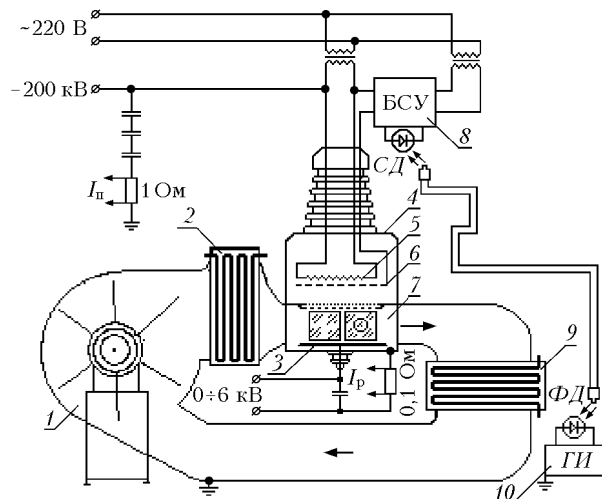


Рис. 1. Функциональная схема мощного CO₂-лазера: 1 — газодинамический контур; 2, 9 — водяной теплообменник; 3 — анод; 4 — электронный ускоритель; 5 — прямонакальный катод; 6 — сетчатый электрод; 7 — разрядная камера; 8 — блок сеточного управления; 10 — генератор импульсов

Использование магнитной муфты для вращения вала вентилятора обеспечивало полную герметичность газодинамического контура. Формирование излучения осуществлялось с помощью трехпроходного телескопического резонатора с прозрачностью 50%. Для вывода излучения использовалась пластина из KCl.

Используемый в эксперименте электроионизационный CO_2 -лазер имеет при работе в непрерывном режиме следующие технические характеристики:

Длина волны излучения	10,6 мкм
Выходная средняя мощность излучения	20 кВт
Диаметр фокусного пятна	1 мм
Энергия ускоренных электронов	200 кэВ
Объем газодинамического контура	3 м ³
Скорость прокачки рабочей смеси	
в межэлектродном промежутке	50 ÷ 100 м/с
Напряжение разряда, max	6 кВ
Напряжение ускорителя, max	200 кВ
Номинальная электрическая мощность, вкладываемая в разряд	200 кВт
Средняя плотность тока электронного пучка	5 · 10 ⁻⁴ А · см ²
Объем разрядного промежутка	10 × 20 × 100 см
Мощность электронного ускорителя	20 кВт

Мощность накачки $p = jE$ при постоянстве электрического поля E в процессе разряда может управляться только током разряда I . В свою очередь, ток разряда линейно связан с током электронного пучка и при сохранении среднего тока пучка вне зависимости от режима ввода энергии в газ средняя мощность должна оставаться практически постоянной. Изменением длительности тока электронного пучка можно изменить длительность тока накачки и, следовательно, мощность излучения.

Известно использование для этих целей как непрерывных [7], так и импульсно-периодических электронных пучков [8], формируемых в ускорителях на основе высоковольтных генераторов Маркса, трансформаторов Тесла, генераторов Блюмляйна с накопителями на основе линий с распределенными параметрами и т.д. Ясно, что в импульсном режиме применяются сложные устройства с жестким требованием к крутизне фронта нарастания напряжения. Последнее требование обусловлено тем, что при длительных фронтах нарастания и спада напряжения значительная часть электронного пучка будет замедляться в фольге, разделяющей вакуумный и газовый объемы, резко ускоряя ее разрушение.

В нашем случае переход к импульсно-периодическому режиму может быть осуществлен посредством подачи на сетку ускорителя, ранее предназначенную только для выравнивания плотности тока электронного пучка, периодически изменяющегося по длительности импульса запирания.

Достоинства такого подхода в том, что независимо от фронта нарастания напряжения на сетчатом электроде любой электрон, оказавшийся в промежутке сетка–анод, набирает энергию, близкую к $\epsilon = eU$, где e – заряд электрона; U – напряжение, приложенное к промежутку сетка–анод. Поскольку U – величина постоянная, то на фольгу поступает практически моноэнергетический пучок электронов.

Это свойство является принципиально важным, поскольку позволяет минимизировать потери энергии в фольге и резко увеличить срок ее службы. Недостаток такого подхода связан с тем, что все элементы схемы управления находятся под ускоряющим потенциалом.

Среди рассмотренных вариантов наиболее удачной оказалась схема управления, приведенная на рис. 2. Здесь управление напряжением на сетчатом электроде производится с помощью изменения интенсивности свечения светодиода (СД), излучение от которого с помощью световолокна поступает на фотодиод $\Phi Д$. Световолокно выполняет также роль диэлектрической развязки между высоковольтными и низковольтными элементами систем питания и управления лазера.

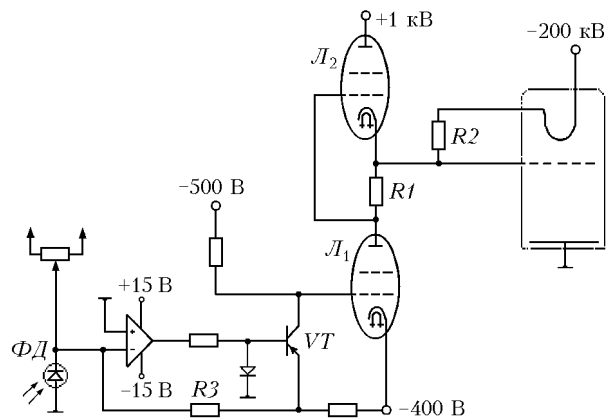


Рис. 2. Схема сеточного управления

Световое излучение, промодулированное необходимым образом, подается на фотодиод, включенный в фотогальваническом режиме, обеспечивающем линейное преобразование интенсивности излучения в силу тока. Операционный усилитель и выходной транзистор VT охвачены 100%-й отрицательной обратной связью и преобразуют ток фотодиода в напряжение, управляющее потенциалом сетки лампы L_1 и, следовательно, током этой лампы, каскадно соединенной с лампой L_2 .

Исходно, выбором тока смещения, задаваемым потенциометром, транзистор VT открыт, падение потенциала сетка–катод лампы L_1 близко к 0, и через лампу L_1 протекает наибольший ток. Этот ток обеспечивает падение напряжения на резисторе R_1 , достаточное для полного запираения лампы L_2 .

Лампа L_1 полностью открыта, лампа L_2 полностью закрыта, на выходе системы управления и на сетчатом электроде ускорителя устанавливается потенциал, практически равный потенциалу катода L_1 300 В, электроны эмиттера в ускоряющий промежуток не поступают.

При полной засветке фотодиода транзистор VT закрыт, падение потенциала сетка – катод равно -100 В, L_2 открыта и на сетчатый электрод ускорителя подается потенциал анода L_2 : 1000 В.

Таким образом, данная схема управления позволяет подавать на сетчатый электрод ускорителя потенциалы от -300 до 1000 В, что обеспечивает полное управление током ускоренных электронов.

Схема снабжена собственным источником питания, включающим в себя выпрямитель, фазоимпульсный стабилизатор напряжения и преобразователь напряжения. На выходе источника формируются следующие напряжения:

+1 кВ, выдаваемое на L_2 ;
 -400 В, выдаваемое на L_1 ;
 +200 В, прикладываемое к экранной сетке тетрода;

+6,3 В, для накала катода тетрода (используются два источника);

± 15 В, для питания операционного усилителя.

Блок потребляет ток силой до 3 А от источника постоянного напряжения 20 В и позволяет управлять вкладываемой в разряд мощностью до 1 МВт с быстродействием 50 мкс.

Использование блока сеточного управления позволяет исследовать энергетические характеристики работы электроионизационного лазера при задании различных длительностей и периодов следования импульсов и определить оптимальные условия получения максимального КПД и энергии излучения.

При работе лазера в непрерывном режиме была снята характерная зависимость тока разряда от тока электронного пучка. Считается важным показать однозначную зависимость этих параметров при работе лазера в импульсно-периодическом режиме с заданием импульсов электронного пучка различной длительности.

Управляющие импульсы подавались на схему сеточного управления от генератора Г5-54 по оптронной линии связи. Анализ осциллограмм токов разряда и электронного пучка (рис. 3) показал, что в процессе инжекции в активный газовый объем лазера электронного пучка в газе устанавливается стационарный ток, продолжительность которого в нашем случае определяется длительностью импульса тока пучка, а форма импульсов в точности повторяет заданную генератором.

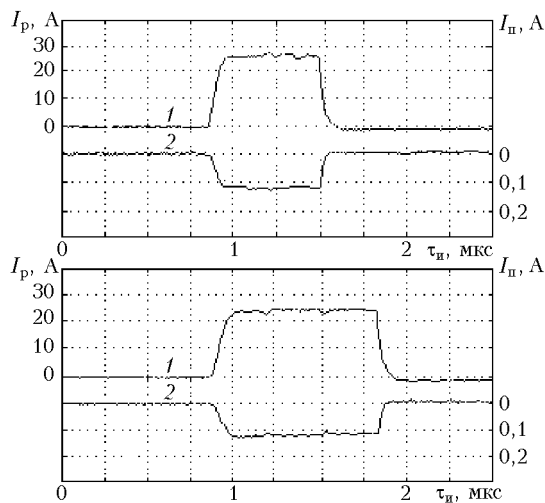


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда (1) и тока электронного пучка (2)

Также была проанализирована зависимость I_p от U_p при постоянном токе электронного пучка $I_e \sim 200 \div 220$ мА. Полученные данные показывают линейный рост тока разряда до самого пробоя, напряжение которого определяется давлением нагнетаемой в разрядный промежуток смеси.

Благодаря возможности работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме, генерируя импульсы излучения различной формы и длительности, данный лазер можно по праву назвать уникальной установкой. Полученные результаты позволяют судить об однозначном управлении током разряда, а следовательно, и мощностью излучения CO_2 -лазера. Длительности фронта и спада импульсов тока позволяют использовать этот лазер для исследования различных физико-технологических процессов.

Открываются широкие возможности для выявления оптимальных параметров излучения для силовых лазерных технологий: резка, сварка материалов, напыление тонких пленок на поверхности изделий, получение наноразмерных порошков твердых веществ и т.д.

Настоящая работа выполнена согласно Программе исследований по приоритетным научным направлениям УрО РАН.

1. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Керимов С.М., Ковш Н.Б., Сульков А.Ф. Газовые лазеры при высоких давлениях // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. Вып. 7. С. 421–426.
2. Fenstermacher C.A., Nutton M.S., Boner K., Rink I.J. E-dtfv sustained atmospheric pressure CO_2 -laser // Bull. Phys. Soc. 1978. V. 16. № 1. P. 42–45.
3. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
4. Бычков Ю.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Курбатов Ю.А., Манылов В.И., Месяц Г.А., Орловский В.М., Прохоров А.М., Рыбалко А.М. Импульсный CO_2 -лазер с энергией 5 кДж // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 5. С. 212–216.
5. Perkins R.B. Progress in inertial research at Los Alamos Sci. Lab. / Prepr. IAEA-CN-38/B-2. Brussels, 1980.
6. Басов Н.Г., Башенко В.В., Глотов Е.П., Данилычев В.А., Картов Г.П., Лапата В.А., Малыш М.М., Рудой О.Г., Сабуров В.А., Сорока А.М. Непрерывный и импульсно-периодический режим сварки электроионизационным CO_2 -лазером // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. № 12. С. 2310–2320.
7. Велихов Е.П., Письменный В.Д., Рахимов А.Т. Независимый газовый разряд, возбуждающий непрерывные CO_2 -лазеры // Успехи физ. наук. 1977. Т. 122. Вып. 3. С. 419–447.
8. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.

V.V. Osipov, V.A. Saburov, V.A. Sheetov, V.V. Platonov, M.G. Ivanov. **High-power CO_2 laser with regulable wide-ranging radiation pulse duration and shape.**

The design and characteristics of a high-power CO_2 laser have been reported. The CO_2 laser active medium was excited by a non-self-sustained discharge controlled by electronic beams. The active medium volume was 20 liter ($10 \times 20 \times 100$ cm), the gas pressure was 50–200 Torr.

The laser feature is the possibility to change the pulse duration from 50 μs to continuous-wave radiation and the pulse frequency up to 5 kHz. The pulse shape was changed by a preset law. The output characteristics were varied owing to the possibility to the regulate electronic beams parameters.

This property provides an ability to determine optimal parameters of high-power CO_2 laser radiation in various technologies: cutting, welding, nanodimension powder production, thin film deposition, and so on.