

А. Н. Шемякин¹, канд. техн. наук, shemyakin@lantanlaser.ru,
М. Ю. Рачков², д-р техн. наук, проф., michyur@gmail.com,
Н. Г. Соловьев¹, д-р физ.-мат. наук, solovyov@lantanlaser.ru,
М. Ю. Якимов¹, д-р физ.-мат. наук, yakimov@lantanlaser.ru,

¹ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, г. Москва,

² Московский политех, г. Москва

Управление мощностью излучения технологического CO₂-лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом путем изменения частоты импульсов ионизации

Статья посвящена управлению в автоматическом режиме мощностью излучения технологических CO₂-лазеров с несамостоятельным продольным тлеющим разрядом с импульсной емкостной ионизацией серии "Лантан". Данный способ организации разряда позволяет легко управлять мощностью лазерного излучения, обеспечивает высокую оптическую однородность активного объема, стабильность разряда и высокий КПД лазерной генерации. Приведена схема организации несамостоятельного тлеющего разряда с импульсной емкостной ионизацией, этапы создания и краткие характеристики лазеров серии "Лантан". Выбран способ управления мощностью лазерного излучения путем изменения частоты импульсов ионизации, что позволяет организовать работу лазера как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с регулируемой скважностью и длительностью импульсов, а также обеспечивает возможность перехода из одного режима в другой. В непрерывном режиме управление мощностью излучения происходит путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц. Управление излучением в импульсном режиме осуществляется модуляцией импульсов ионизации, которая состоит в подаче импульсов пакетами. Частота импульсов в пакете определяет мощность излучения в импульсе, частота следования пакетов — частоту импульсного режима, длина пакета — длительность импульсов. На основе экспериментальных данных определена зависимость мощности излучения от частоты импульсов ионизации. Приведена схема эксперимента и определена точность измерения мощности лазерного излучения и частоты импульсов ионизации. Сбор данных и обработку результатов экспериментов проводили с помощью USB-устройства сбора данных NI 6008 в среде проектирования виртуальных приборов LabVIEW фирмы National Instruments. Для изучения зависимости мощности лазерного излучения от частоты импульсов ионизации применен метод регрессионного анализа. Проведенные исследования показали, что зависимость мощности лазерного излучения от частоты импульсов ионизации носит линейный характер в широком диапазоне параметров. Получено уравнение прямой регрессии, рассчитаны доверительные оценки параметров прямой регрессии и доверительные оценки отклонения теоретической прямой регрессии от эмпирической зависимости при доверительной вероятности 95 %.

Ключевые слова: технологический лазер, система управления, несамостоятельный тлеющий разряд, мощность излучения лазера, частота импульсов ионизации

Введение

Мощные технологические CO₂-лазеры серии "Лантан" предназначены для резки, сварки и модификации поверхности различных материалов в составе лазерного технологического комплекса. Это быстропроточные лазеры с замкнутым газовым циклом и несамостоятельным продольным тлеющим разрядом с импульсной емкостной ионизацией [1]. Первые опыты по стабилизации мощного тлеющего разряда быстроповторяющимися импульсами были сделаны в работах Рейли [2] и Хилла [3]. Дальнейшее развитие этот способ организации разряда получил в работах [4–6]. В таком комбинированном разряде функции создания электрической проводимости газа (главным образом за счет свободных электронов) и вклада энергии в лазерную активную среду

разделены между двумя различными типами разрядов. Ионизация и связанная с ней проводимость обеспечиваются импульсно-периодическим емкостным разрядом, а вклад энергии в колебания молекул — прохождением тока основного разряда через плазму с концентрацией электронов, задаваемой ионизацией. Такой способ организации разряда позволяет легко управлять мощностью лазерного излучения, обеспечивает высокую оптическую однородность активного объема, стабильность разряда и высокий КПД лазерной генерации.

Схема организации разряда

Схема организации несамостоятельного тлеющего разряда с импульсной емкостной ионизацией показана на рис. 1.

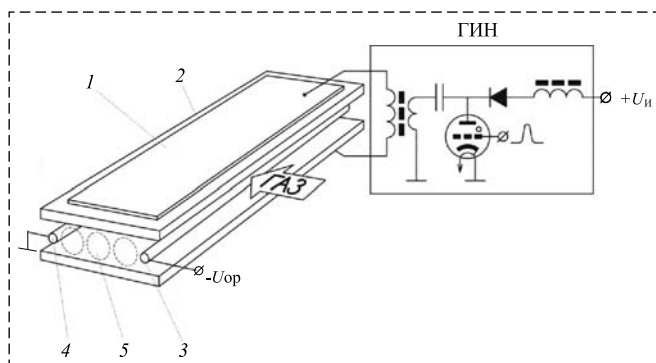


Рис. 1. Схема организации несамостоятельного тлеющего разряда с импульсной емкостной ионизацией:

1 — металлический электрод разряда импульсной емкостной ионизации; 2 — диэлектрическая пластина; 3 — катод несамостоятельного тлеющего разряда; 4 — анод несамостоятельного тлеющего разряда; 5 — зеркала многопроходного оптического резонатора; ГИН — генератор импульсного напряжения ионизации; $-U_{OP}$ — напряжение питания источника основного разряда; $U_{И}$ — напряжение питания ГИН

Fig. 1. The scheme of a nonself-sustained glow discharge with ionization by periodic-pulsed capacitively coupled auxiliary discharge:

1 — periodic-pulsed capacitively coupled discharge metal electrode; 2 — dielectric plate; 3 — cathode of a nonself-sustained glow discharge; 4 — anode of a nonself-sustained glow discharge; 5 — multipass optical resonator mirrors; ГИН — pulse ionization generator; $-U_{OP}$ — main discharge power supply voltage; $U_{И}$ — pulse ionization generator supply voltage

Разрядная камера представляет собой плоский канал прямоугольного сечения. Сверху и снизу разрядная камера ограничена электродами ионизации 1 (показан только верхний электрод), а с боковых сторон — стенками с отверстиями для прохода лазерного излучения к расположенным снаружи зеркалам резонатора 5. Каждый электрод емкостного разряда ионизации состоит из охлаждаемой водой металлической пластины 1, отделенной от объема разрядной камеры слоем диэлектрического материала 2. К электродам прикладывается высокое импульсное напряжение, и в объеме между ними возникает емкостной импульсный разряд, создающий свободные электроны. По окончании импульса концентрация электронов будет уменьшаться за счет процессов рекомбинации, прилипания, ухода на стенки и выноса потоком. Однако если импульсы ионизации подавать с частотой, превышающей характерную частоту (до потери электронов от предыдущего импульса), то в разрядном объеме установится некоторая средняя концентрация электронов. Electrodes основного разряда 3, 4, выполненные в виде медных охлаждаемых водой трубок, расположены на входе и выходе из разрядной камеры. К ним прикладывается напряжение основного разряда $-U_{OP}$,

которое меньше пробойного, и в камере возникает несамостоятельный тлеющий разряд с импульсной емкостной ионизацией.

На экспериментальном лазере "Циклон", разработанном в ИПМех РАН, впервые были проведены исследования несамостоятельного тлеющего разряда с импульсной емкостной ионизацией в камере большого объема в условиях мощной непрерывной лазерной генерации. В частности, было показано, что этот оригинальный способ организации разряда позволяет получить высококачественное одномодовое лазерное излучение мощностью до 10 кВт [1].

На основе исследований, проведенных на лазере "Циклон", были разработаны экспериментальный технологический лазер "Лантан-1", а затем технологический лазер "Лантан-2", предназначенный для промышленного выпуска [7]. Дальнейшим развитием метода импульсной емкостной ионизации стала разработка моноблочного автоматизированного технологического лазера "Лантан-3" [8] и экспериментального технологического лазера с быстрой осевой прокачкой [9], на котором было получено непрерывное излучение мощностью 4 кВт с высоким КПД.

Выбор способа управления мощностью лазерного излучения

Существуют три способа управления мощностью излучения лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом и импульсной емкостной ионизацией:

- путем изменения напряжения источника питания основного разряда;
- путем изменения напряжения источника питания ионизации;
- путем изменения частоты импульсов ионизации.

В работе [10] подробно проанализированы технические аспекты практической реализации этих способов управления, и предпочтение отдано управлению мощностью лазерного излучения путем изменения частоты импульсов ионизации.

Такой способ управления позволяет организовать работу лазера как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с регулируемой скважностью и длительностью импульсов, а также обеспечивает возможность перехода из одного режима в другой.

В непрерывном режиме управление мощностью излучения происходит путем изменения частоты импульсов ионизации, которые представляют собой высоковольтные импульсы напряжения длительностью 100 нс, подаваемые с частотой 1...5 кГц.

Управление излучением в импульсном режиме осуществляется модуляцией импульсов ионизации, которая состоит в подаче импульсов пакетами. Частота импульсов в пакете определяет мощность излучения в импульсе, частота следования пакетов — частоту импульсного режима, длина пакета — длительность импульсов.

Для управления мощностью излучения лазера в автоматическом режиме необходимо на основе экспериментальных данных определить зависимость мощности излучения от частоты импульсов ионизации.

Постановка эксперимента и обработка результатов

Эксперименты проводили на технологическом лазере "Лантан-3". Схема эксперимента приведена на рис. 2.

Система управления лазером задает мощность излучения W . Частота импульсов ионизации F , соответствующая заданной мощности, измеряется цифровым осциллографом TDS 2014 [11]. Лазерное излучение подается на термоэлектрическое зеркало-приемник с анизотропией термоЭДС [12], которое измеряет его мощность. Основными преимуществами выбранного приемника являются непосредственное измерение мощности широкоапертурного (диаметр 20...50 мм) высокоинтенсивного (до 1 кВт/см²) лазерного излучения и высокое быстродействие (не хуже 10⁻⁵ с). Зеркало-при-

емник обладает линейной характеристикой в диапазоне мощности от 0 до 3 кВт [13].

После предварительного усиления сигнал с зеркала-приемника поступает на дифференциальный аналоговый вход USB-устройства сбора данных NI 6008 фирмы National Instruments [14].

Сбор данных и обработку результатов экспериментов проводились в среде проектирования виртуальных приборов LabVIEW фирмы National Instruments [15], [16].

Перед проведением основных экспериментов необходимо выполнить усреднение мощности лазерного излучения для устранения влияния амплитудных изменений мощности с частотой импульсов ионизации [17]. В работе [18] показано, что $n = 100$ точек усреднения позволяет уменьшить флуктуацию мощности до величины менее 1 %, а именно $\Delta W = \pm 0,68 \%$, где

$$\Delta W = \pm \frac{2s_W}{\bar{W}} 100,$$

s_W — эмпирическое стандартное отклонение мощности излучения; $\bar{W}$ — эмпирическое среднее значение мощности излучения.

При проведении основных экспериментов исследовали зависимость мощности лазерного излучения от задаваемой частоты импульсов ионизации. USB-устройство сбора данных NI 6008 было запрограммировано на аналоговый ввод данных по дифференциальной схеме с диапазоном входного напряжения ± 1 В и частотой дискретизации 10 кГц. Каждую секунду программа сбора данных вводила 100 значений мощности лазерного излучения, усредняла эти значения и записывала их в компьютер. Было проведено два эксперимента. На рис. 3 показано характерное изменение мощности излучения во время проведения одного из экспериментов. На графике измеряемый сигнал умножен на коэффициент передачи зеркала-приемника 2320 Вт/В и переведен в ватты.

На технологическом лазере "Лантан-3" не реализована возможность задавать непосредственно частоту импульсов ионизации. Поэтому при проведении экспериментов задавалась мощность лазерного излучения, которая измерялась USB-устройством сбора данных NI 6008, а частота импульсов ионизации, соответствующая каждой ступеньке мощности, измерялась цифровым осциллографом TDS 2014.

Оценим точность измерения частоты, проводимого в режиме автоматического измере-

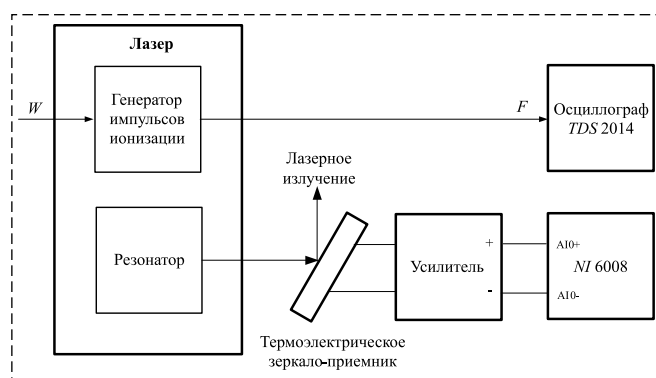


Рис. 2. Схема эксперимента
Fig. 2. Experimental system



Рис. 3. Изменение мощности излучения W при проведении эксперимента

Fig. 3. Experimental radiation power change W

ния. Для максимально измеренной частоты 2900 Гц (период $T \sim 345$ мкс) скорость развертки V_p должна составлять $V = 50$ мкс/деление, так как в режиме автоматического измерения хотя бы один период измеряемого сигнала должен поместиться на экран осциллографа ($50 \text{ мкс} \cdot 10 \text{ делений экрана} = 500 \text{ мкс}$). В таком случае, согласно руководству пользователя [6], период дискретизации t_d равен $t_d = V_p/250 = 50/250 = 0,2$ мкс, а погрешность измерения времени ΔT составляет

$$\Delta T = \pm(t_d + 100 \cdot 10^{-6} T + 0,0006 \text{ мкс}). \quad (1)$$

Результаты предварительной обработки экспериментов

Results of experimental data pre-processing

№	Эксперимент 1		Эксперимент 2	
	Частота импульсов ионизации F , Гц	Средняя мощность излучения W , Вт	Частота импульсов ионизации F , Гц	Средняя мощность излучения W , Вт
1	2900	601	2820	597
2	2760	555	2700	550
3	2530	508	2590	504
4	2420	462	2440	458
5	2240	414	2290	411
6	2200	369	2200	364
7	2080	321	2100	316
8	1950	274	2030	269
9	1840	227	1900	222
10	1730	181	1820	176
11	1650	133	1690	127
12	1540	86	1580	81
13			1430	35

Подставив значения в соотношение (1), получим $\Delta T = \pm 0,24$ мкс, что дает относительную точность измерения $\pm(0,24/345) \cdot 100 = \pm 0,07 \%$.

Такая высокая точность обусловлена малым периодом цифровой дискретизации осциллографа, который на данном временном диапазоне составляет всего 0,2 мкс.

Исходные данные, полученные в результате экспериментов, предварительно обработаны: компенсировано отрицательное смещение, убраны нулевые точки и вычислены средние значения ступеней мощности излучения. Результаты предварительной обработки представлены в таблице.

Для изучения зависимости мощности лазерного излучения от частоты импульсов ионизации применим метод регрессионного анализа [19].

Для аналитического представления зависимости $W = f(F)$ применим линейную регрессию вида $y = kx + c$. Для расчета коэффициентов регрессии воспользуемся функцией *Linear Fit* среды проектирования *LabVIEW*. Уравнение линейной регрессии принимает вид

$$W = 0,402F - 530,3. \quad (2)$$

Точность коэффициентов регрессии выбрана таким образом, чтобы ошибка округления при вычислениях не превышала 1 %. Зависимость мощности излучения от частоты импульсов ионизации показана на рис. 4.

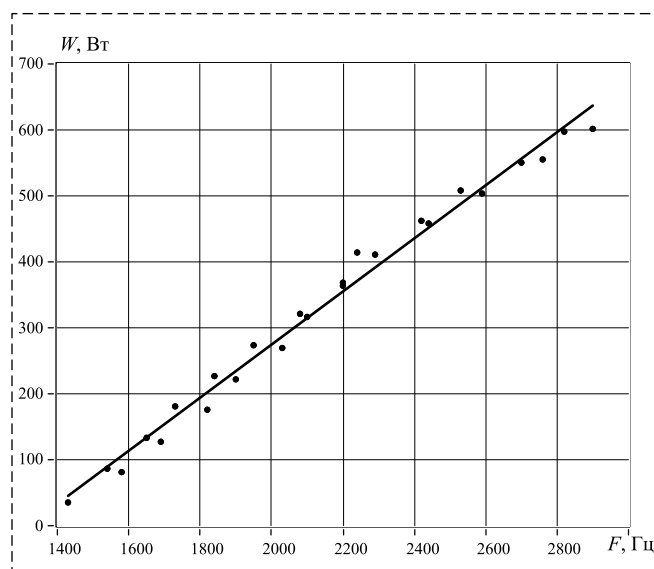


Рис. 4. Зависимость мощности излучения от частоты импульсов ионизации и прямая регрессии W на F по формуле (2)

Fig. 4. Dependence of radiation power on the frequency of ionization pulses and direct regression W on F according to (2)

Параметры этой линейной функции удовлетворяют принципу наименьших квадратов по W : сумма квадратов отклонений измеренных значений W_i от рассчитанных по уравнению прямой регрессии меньше, чем сумма квадратов отклонений их от любой другой прямой.

Квадрат коэффициента корреляции r^2 между двумя множествами данных равен $r^2 = 0,988$.

Рост мощности излучения W с увеличением частоты импульсов ионизации F точно описывается линейной регрессией W . Однако следует отметить, что линейная зависимость W от F наблюдается только в рабочем диапазоне частот. При частоте, меньшей пороговой частоты генерации, лазерная генерация отсутствует и мощность излучения равна нулю. При частоте, большей максимально допустимой для данной модели лазера, происходит контракция разряда и срыв лазерной генерации.

Для дальнейших вычислений с помощью функции *Standard Deviation and Variance* среды проектирования *LabVIEW* рассчитаем эмпирические средние значения, дисперсии и стандартные отклонения W и F для $n = 25$ измерений из таблицы.

Эмпирические средние значения

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_1^n W_i = 329,7, \quad \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_1^n F_i = 2137,2.$$

Эмпирические дисперсии

$$s_W^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (W_i - \bar{W})^2 = 30\,002;$$

$$s_F^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (F_i - \bar{F})^2 = 183\,013.$$

Эмпирические стандартные отклонения

$$s_W = 173,2, \quad s_F = 427,8.$$

Сумма квадратов отклонений измеренных значений W_i от рассчитанных по уравнению прямой регрессии W на F равна

$$\begin{aligned} s_{W|F} &= \sum_1^n [(W_i - \bar{W}) - k(F_i - \bar{F})]^2 = \\ &= (n-1)s_W^2(1-r^2) = 8760. \end{aligned}$$

Уравнение линейной регрессии (2) можно записать в виде

$$\begin{aligned} W - \bar{W} &= k(F - \bar{F}) \quad \text{или} \\ W &= \bar{W} + k(F - \bar{F}). \end{aligned}$$

Подставив значения, получим

$$W = 329,7 + 0,402(F - 2137,2).$$

Рассчитаем доверительные оценки параметров прямой регрессии W на F при доверительной вероятности $P = 95\%$. Если записать теоретическую прямую регрессии в виде

$$W = b + \beta_{W|F}(F - a),$$

где $\beta_{W|F}$ — коэффициент теоретической регрессии W на F , то доверительными границами для b служат

$$\bar{W} \pm t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{(n-2)n}} = 329,7 \pm 8,07,$$

а доверительными границами для $\beta_{W|F}$ служат

$$k \pm t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{n-2}} \frac{1}{s_F \sqrt{n-1}} = 0,402 \pm 0,019,$$

где $t = t(P, m)$ — значение распределения Стьюдента [20] при доверительной вероятности $P = 95\%$ и числе степеней свободы $m = n - 2 = 23$

$$t = t(95\%, 23) = 2,069.$$

Перейдем к вычислению доверительной оценки отклонения теоретической прямой регрессии от эмпирической при доверительной вероятности $P = 95\%$. Для этого воспользуемся функцией *Linear Fit Intervals* среды проектирования *LabVIEW*. К сожалению, эта функция дает только визуальное представление доверительных границ теоретической прямой регрессии. Приведем аналитическое выражение для этих границ.

При фиксированном значении $F = F_0$ доверительные границы для теоретической прямой регрессии определяются формулой

$$\bar{W} + k(F_0 - \bar{F}) \pm t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{(n-2)n}} \sqrt{1 + \frac{n(F_0 - \bar{F})^2}{(n-1)s_F^2}}.$$

Для нашего случая

$$t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{(n-2)n}} = 8,07; \quad \frac{n}{(n-1)s_F^2} = 5,69 \cdot 10^{-6}.$$

Тогда доверительные границы можно записать в виде

$$\begin{aligned} &\pm t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{(n-2)n}} \sqrt{1 + \frac{n(F_0 - \bar{F})^2}{(n-1)s_F^2}} = \\ &= \pm 8,07 \sqrt{1 + 5,69 \cdot 10^{-6} (F_0 - \bar{F})^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя значения $F_0 = F_i$ из таблицы в уравнение эмпирической прямой регрессии W на F и в формулу для доверительных границ, можно вычислить значения эмпирической прямой регрессии с 95 %-ми доверительными границами для теоретической прямой регрессии.

Эмпирическая прямая регрессии W на F вместе с 95 %-ми доверительными границами

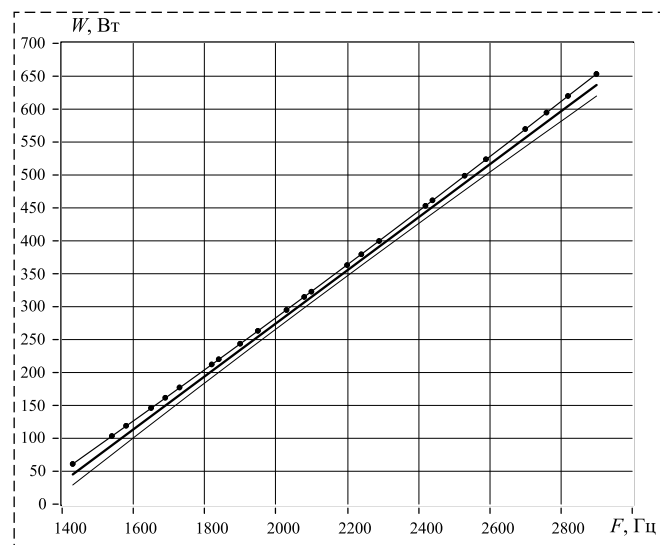


Рис. 5. Эмпирическая прямая регрессии W на F (2) вместе с 95 %-ми доверительными границами для теоретической прямой регрессии W на F по формуле (3)

Fig. 5. Empirical direct regression of W on F (2) together with 95 % confidence bounds for theoretical direct regression of W on F according to (3)

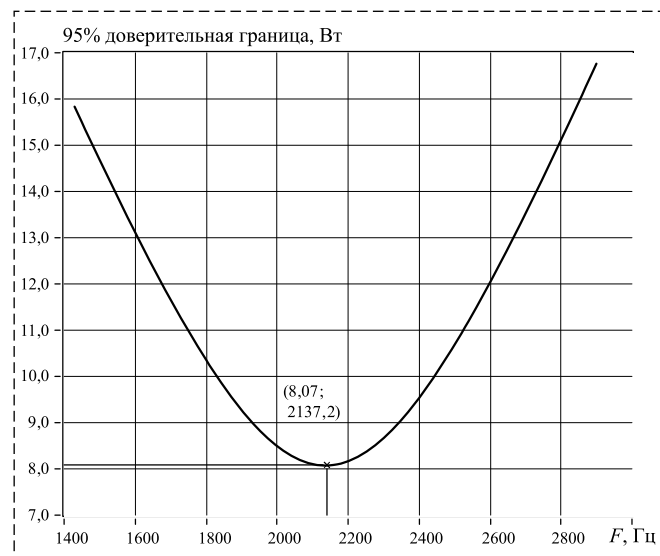


Рис. 6. Зависимость 95 %-й доверительной границы теоретической прямой регрессии W на F по формуле (3) от частоты импульсов ионизации F

Fig. 6. Dependence of the 95 % confidence bound of the theoretical direct regression W on F according to (3) on the frequency of the ionization pulses F

для теоретической прямой регрессии W на F показаны на рис. 5.

На верхней доверительной границе, полученной с помощью функции *Linear Fit Intervals* среды проектирования *LabVIEW*, точками показаны результаты аналитического расчета по формуле (3).

На рис. 6 изображена зависимость 95 %-ной доверительной границы теоретической прямой регрессии W на F от частоты импульсов ионизации F .

Видно, что отклонение теоретической прямой регрессии от экспериментальной минимально при $F_i = \bar{F} = 2137,2$ Гц и равно

$$t \sqrt{\frac{s_{W|F}}{(n-2)n}} = 8,07 \text{ Вт.}$$

По мере удаления от среднего значения $\bar{F}$ отклонение теоретической прямой регрессии от экспериментальной увеличивается.

Заключение

Проведенные исследования показали, что зависимость мощности лазерного излучения W от частоты импульсов ионизации F носит линейный характер в широком диапазоне параметров. Вычислено уравнение прямой регрессии W на F и рассчитаны доверительные оценки параметров прямой регрессии и доверительные оценки отклонения теоретической прямой регрессии от эмпирической при доверительной вероятности $P = 95$ %. Полученное уравнение прямой регрессии W на F позволяет управлять мощностью излучения лазеров с несамостоятельным тлеющим разрядом серии "Лантан" в автоматическом режиме.

Список литературы

1. Генералов Н. А., Зимаков В. П., Косынкин В. Д. и др. Быстропроточный технологический CO_2 -лазер комбинированного действия // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549—1557.
2. Reily J. P. Electrically excited flowing gas laser and method of operation // Patent US3721915A (1970).
3. Hill A. E. Uniform electrical excitation of large-volume high-pressure near sonic CO_2 - N_2 -He flowstream // Applied Physics Letters. 1971. Vol. 18(5). P. 194—197.
4. Brown C. O., Davis J. W. Closed cycle performance of a high power electric discharge laser // Applied Physics Letters. 1972. Vol. 21. P. 480.
5. Christensen C. P. Pulsed transverse electrodeless discharge excitation of a CO_2 laser // Applied Physics Letters. 1979. Vol. 34(3). P. 211—213.

6. Seguin H. J. J., Nam A. K., Tulip J. The photoinitiated impulse-enhanced electrically excited (PIE) discharge for high-power cw laser applications // *Applied Physics Letters*. 1978. Vol. 32. P. 418–420.
7. Богданов М. П., Верин В. М., Генералов Н. А., Зимаков В. П., Картавый С. К., Косынкин В. Д., Лаптев А. Р., Соловьев Н. Г., Штернин Л. А. Технологическая установка УЛГ-2.01 комбинированного действия: импульсно-периодического и непрерывного // Труды Всесоюзной конференции "Применение лазеров в народном хозяйстве". 1986. С. 50–53.
8. Generalov N. A., Gorbulyenko M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. High-Power Industrial CO₂ Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge // In W.J. Witteman and V.N. Ochkin (eds.), *Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects*. 1996. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. P. 323–341.
9. Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser // In *Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE Vol. 6611*, Oleg B. Danilov Ed. // Paper 66110K, 2007. 8 p.
10. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю. Выбор способа управления мощностью излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // *Известия МГИУ*. 2009. № 3 (16). С. 25–31.
11. Цифровые запоминающие осциллографы серии TDS1000 и TDS2000. Руководство пользователя. Tektronix, Inc. 190 с.
12. Глебов В. Н., Мананков В. М., Малютин А. М. и др. Термоэлектрическое зеркало-приемник лазерного излучения // *Известия РАН. Серия физическая*. 1993. Т. 57. № 12. С. 167–169.
13. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Якимов М. Ю. Измерение мощности лазерного излучения технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // *Машиностроение и инженерное образование*. 2009. № 2 (19). С. 22–29.
14. USER GUIDE. NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multi-function DAQ USB Device. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf> (дата обращения: 02.04.2019).
15. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 800 с.
16. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.
17. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Исследование характеристик мощности лазерного излучения технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // *Машиностроение и инженерное образование*. 2011. № 1 (26). С. 40–48.
18. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г. Исследование влияния деградации рабочей смеси газов на мощность излучения лазерного технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // *Известия МГИУ*. 2010. № 3 (20). С. 28–31.
19. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: ИЛ, 1956. 664 с.
20. Дьяконов В. П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия Телеком, 2007. 958 с.

Radiation Power Control of the Industrial CO₂ Laser Excited by a Nonself-Sustained Glow Discharge by Changing the Frequency of Ionization Pulses

A. N. Shemyakin¹, shemyakin@lantanlaser.ru, M. Yu. Rachkov², michyur@gmail.com,
N. G. Solov'ev¹, solovyov@lantanlaser.ru, M. Yu. Yakimov¹, yakimov@lantanlaser.ru,

¹ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
119526, Moscow, Russian Federation

² Moscow Polytech, 107023, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Rachkov Michael Yu., DSc, Professor,
Moscow Polytech, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: michyur@gmail.com

Accepted on December 16, 2019

Abstract

The article describes radiation power control of industrial CO₂ lasers of Lantan series excited by a nonself-sustained glow discharge in the automatic mode. These lasers are closed-cycle fast gas-transport lasers excited by a nonself-sustained glow discharge with ionization by periodic-pulsed capacitively coupled auxiliary discharge. In this case, ionization and conductivity are provided by periodic-pulsed capacitively coupled discharge. The energy contribution to molecular oscillations is provided by the passage of the main discharge current through the plasma with electron density given by ionization. This permits easy laser power control, provides excellent optical homogeneity and stability of an active volume together with high laser efficiency. A system of a nonself-sustained glow discharge with ionization by periodic-pulsed capacitively coupled auxiliary discharge, the stages of creation and brief characteristics of the Lantan series lasers is presented. The method of controlling the power of laser radiation by changing the frequency of the ionization pulses is determined. This control method allows operating of the laser in continuous and in pulse-periodic modes with adjustable pulse ratio and pulse duration, and also provides switching from one mode to another. In the continuous mode, the radiation power is controlled by changing the frequency of ionization pulses, which are high voltage pulses with duration of 100 ns, given with the frequency of 1–5 kHz. Pulse-periodic radiation control is performed by modulating ionization pulses that consists of pulses being delivered in batches. The frequency of the pulses in a batch determines the radiation power in a pulse. The frequency of the batches following is the frequency of the pulse mode, and the length of the batch determines the pulses duration. Based on the experimental data, the dependence of the radiation power on the ionization pulses frequency was determined. An experimental system is presented and the measuring accuracy of the laser radiation power and the frequency of ionization pulses is determined. Data acquiring and processing of experimental results were performed using the NI 6008 USB data acquisition device in the LabVIEW programs of National Instruments. To study the dependence of the laser power on

the frequency of the ionization pulses, a regression analysis method was applied. Studies have shown that the dependence of the laser power on the ionization pulses frequency is linear in a wide range of parameters. The equation of the direct regression is calculated. The confidence estimates of the coefficients of the direct regression and the confidence estimates of the deviation of the theoretical direct regression from the empirical one are calculated with a confidence level of 95%.

Keywords: industrial laser, control system, nonself-sustained glow discharge, laser radiation power, ionization pulses frequency.

For citation:

Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solov'ev N. G., Yakimov M. Yu. Radiation power control of the industrial CO₂ laser excited by a nonself-sustained glow discharge by changing the frequency of ionization pulses, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 224–231.

DOI: 10.17587/mau.21.224-231

References

1. Generalov N. A., Zimakov V. P., Kosynkin V. D. et al. Rapid-flow combined-action industrial CO₂ laser, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 9, no. 8, pp. 1549–1557 (in Russian).
2. Reily J. P. Electrically excited flowing gas laser and method of operation, Patent US3721915A (1970).
3. Hill A. E. Uniform electrical excitation of large-volume high-pressure near sonic CO₂-N₂-He flowstream, *Applied Physics Letters*, 1971, vol. 18(5), pp. 194–197.
4. Brown C. O., Davis J. W. Closed cycle performance of a high power electric discharge laser, *Applied Physics Letters*, 1972, vol. 21, pp. 480.
5. Christensen C. P. Pulsed transverse electrodeless discharge excitation of a CO₂ laser, *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 34 (3), pp. 211–213.
6. Seguin H. J. J., Nam A. K., Tulip J. The photoinitiated impulse-enhanced electrically excited (PIE) discharge for high-power cw laser applications, *Applied Physics Letters*, 1978, vol. 32, pp. 418–420.
7. Bogdanov M. P., Verin V. M., Generalov N. A., Zimakov V. P., Kartavy S. K., Kosynkin V. D., Laptev A. R., Solov'ev N. G., Shternin L. A. Processing machine ULG-2.01 of combined action: periodic-pulsed and continuous wave, *Proceedings Soviet Conf. "Primenenie laserov v narodnom hozyaistve"*, Moscow, Nauka, 1986, pp. 50–53 (in Russian).
8. Generalov N. A., Gorbulyenko M. I., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. High-Power Industrial CO₂ Lasers Excited by a Non-self Sustained Glow Discharge, In W.J. Witteman and V.N. Ochkin (eds.), *Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects*, 1996, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, pp. 323–341.
9. Generalov N. A., Shemyakin A. N., Solov'yov N. G., Yakimov M. Yu., Zimakov V. P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser, In *Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. Proc. SPIE Vol. 6611*, Oleg B. Danilov, Ed., Paper 66110K, 2007, 8 p.
10. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu. The choice of the method of controlling the radiation power of an industrial laser processing machine with nonself-sustained glow discharge, *Izvestiya MGIIU*, 2009, no. 3 (16), pp. 25–31 (in Russian).
11. TDS1000-, TDS2000-series digital oscilloscope. User's manual. Tektronix, Inc. 190 p.
12. Glebov V. N., Manankov V. M., Malyutin A. M. and al. Thermoelectric mirror-detector for laser radiation, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 1993, vol. 57, no. 12, pp. 167–169 (in Russian).
13. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu. Laser radiation power measurements in an industrial laser processing machine with nonself-sustained glow discharge, *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2009, no. 2 (19), pp. 22–29 (in Russian).
14. USER GUIDE. NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multi-function DAQ USB Device, available at: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf> (date of the application: 02.04.2019).
15. Travis J., Kring J. LabVIEW for everyone, Moscow, DMK Press, 2008, 800 p. (in Russian).
16. Suranov A. Ya. LabVIEW 8.20: Functions Reference book, Moscow, DMK Press, 2007, 536 p. (in Russian).
17. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solov'yov N. G. Investigation of laser power characteristics in an industrial laser processing machine with nonself-sustained glow discharge, *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2011, no. 1 (26), pp. 40–48 (in Russian).
18. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Solov'yov N. G. Investigation of the effect of working gas mixture degradation on the radiation power of an industrial laser processing machine with nonself-sustained glow discharge, *Izvestiya MGIIU*, 2010, no. 3 (20), pp. 28–31 (in Russian).
19. Hald A. Statistical theory with engineering applications, Moscow, IL, 1956, 664 p. (in Russian).
20. Dyakonov V. P. Mathcad 11/12/13 in mathematics. Reference book, Moscow, Goryachaya liniya Telekom, 2007, 958 p. (in Russian).