

## Возможности оперативного управления параметрами излучения CuBr-лазера

А.И. Федоров, В.Ф. Федоров, В.А. Димаки\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 9.02.2011 г.

Исследованы параметры накачки CuBr-лазера с частотой следования импульсов 14 кГц с независимым подогревом активной среды и дополнительным источником импульсов возбуждения, обеспечивающим оперативное управление средней мощностью излучения в заданном временном интервале. Создана экспериментальная установка, позволяющая реализовать режим изменения средней мощности излучения путем подачи управляющего импульса с опережением основного в интервале времени 0,12–20 мкс. Показано, что для эффективного управления мощностью излучения лазера амплитуда напряжения дополнительного импульса возбуждения должна быть в пределах 12–28% от амплитуды основного импульса возбуждения. При этом предлагаемый режим управления позволяет оперативно от импульса к импульсу изменять параметры выходного излучения за счет большей энергии дополнительного импульса возбуждения по сравнению с саморазогревным режимом работы лазера.

*Ключевые слова:* газоразрядный CuBr-лазер, средняя мощность излучения, дополнительный и основной импульсы возбуждения; gas-discharge CuBr-laser, mean radiation power, supplementary and principal excitation pulses.

### Введение

Для микрообработки материалов лазерами на парах металлов (ЛПМ) требуется управление параметрами излучения в каждом отдельном импульсе генерации, поэтому вопросы оперативного и точного управления характеристиками лазеров на парах металлов всегда остаются актуальными. В работах [1–4] были предложены и реализованы методы оперативного управления характеристиками излучения ЛПМ путем введения дополнительных импульсов возбуждения. Механизм управления заключается в воздействии дополнительными импульсами возбуждения на концентрацию атомов металла нижнего лазерного уровня. При этом воздействие может проявляться как в заселении нижнего метастабильного уровня при прохождении дополнительного импульса возбуждения, так и в релаксации нижнего рабочего уровня после прохождения дополнительного импульса возбуждения [1]. При таком управлении энергозатрат в разряд остается постоянным, независимо от того, имеет место генерация или нет.

Отметим, что в работах [1–3] описаны лазеры на парах чистых металлов в саморазогревном режиме работы. В настоящей статье рассматривается лазер на парах бромида меди. Данному лазеру соответствуют хорошие энергетические характеристики и более простая технология изготовления

активного элемента по сравнению с лазером на парах чистой меди. Введение в рабочую среду активных примесей позволяет перейти к мощностям генерации и сроку службы активного элемента, необходимых для прикладных задач, например таких, как зондирование атмосферы, или для точной обработки материалов для электроники и медицины.

Кроме того, оптимальная температура активного объема позволяет более эффективно применять внешний нагрев рабочей зоны газоразрядной трубки (ГРТ) [5]. Нагрев и стабилизация температуры активного объема независимым источником питания создают условия для работы лазера с малыми вкладываемыми в разряд мощностями при относительно больших рабочих объемах активного элемента.

Данная работа посвящена выяснению особенностей работы лазера на парах бромида меди с внешним нагревателем в зависимости от амплитуды дополнительного импульса и временной задержки относительно основного импульса возбуждения.

### 1. Экспериментальная установка, аппарататура и методы измерений

В экспериментах использовалась конструкция активного элемента с внешним нагревателем, аналогичным описанному в работе [6]. Газоразрядная трубка была выполнена из оптического кварца с внутренним диаметром 38 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина активной зоны равнялась 900 мм. Электрическая блок-схема возбуждения CuBr-лазера приведена на рис. 1.

\* Анатолий Игнатьевич Федоров (fedorov@asd.iao.ru); Валерий Федорович Федоров (qel@asd.iao.ru); Виктор Анатольевич Димаки.

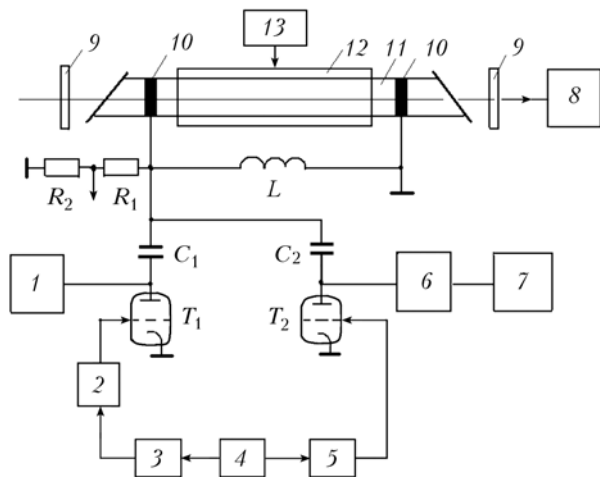


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки CuVg-лазера: 1, 6 – основной и дополнительный высоковольтные импульсные источники питания; 2, 5 – генераторы запуска основного и дополнительного тиратронов  $T_1$ ,  $T_2$  (ТГИ1-1000/25); 3 – блок-схема линии задержки между основным и дополнительными импульсами возбуждения; 4 – генератор запускающих импульсов; 7 – блок-схема регулятора напряжения дополнительных импульсов возбуждения; 8 – измеритель мощности ИМО-2Н; 9 – зеркала плоскопараллельного резонатора; 10 – внутренние электроды; 11 – газоразрядная трубка; 12 – нагревательная камера; 13 – термостабилизатор;  $L$  – зарядная индуктивность;  $R_1 = 51$  кОм и  $R_2 = 510$  Ом – сопротивления делителя напряжения;  $C_1 = 2,2$  нФ и  $C_2 = 3,3$  нФ – рабочие емкости

Лазер имел плоскопараллельный резонатор 9. Нагревательная камера 12 активного объема подерживала температуру стенки ГРТ 11 на заданном уровне за счет термостабилизатора 13. Электрическая блок-схема возбуждения осуществлялась за счет основного 1 и дополнительного 6 высоковольтных импульсных источников питания, генератора запускающих импульсов 4, коммутаторов  $T_1$  и  $T_2$ , блок-схемы регулятора линии задержки основных импульсов возбуждения 3, зарядной индуктивности  $L$  и рабочих емкостей  $C_1$  и  $C_2$ . Импульсно-периодический разряд осуществлялся с частотой 14 кГц между электродами 10. Давление буферного газа (неона) составляло 51 торр. Лазер работал следующим образом. От импульсного высоковольтного источника питания 1 заряжалась рабочая емкость  $C_1$ , а от регулируемого импульсного дополнительного источника питания 6 – емкость  $C_2$ . Емкости заряжались через зарядную индуктивность  $L$ . Генератор запускающих импульсов 4 включал коммутатор  $T_2$ , который формировал дополнительный импульс возбуждения с регулируемой амплитудой на лазерной трубке 11. Параллельно генератор запускающих импульсов 4 через блок-схему задержки 3 запускал коммутатор  $T_1$ , который формировал на лазерной трубке основной высоковольтный импульс возбуждения с амплитудой 6 кВ. Схема задержки позволяла регулировать времена задержки  $t_3$  между дополнительным и основным импульсами возбуждения от 0,12 до 20 мкс. Блок-схема регулятора амплитуды напряжения 7 дополнительного источника воз-

буждения 6 обеспечивала изменения амплитуды дополнительных импульсов возбуждения на электродах лазерной трубки от 0,4 до 2 кВ. Для измерения средней мощности излучения использовался калориметр ИМО-2Н. Амплитудно-временные характеристики дополнительного и основного импульсов возбуждения измерялись осциллографом Tektronix TDS 3032 и делителем напряжения Tektronix P6015A. Мощность основного источника питания соответствовала 1 кВт, а дополнительного – 0,3 кВт.

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследования по управлению средней мощностью излучения CuVg-лазера проводили при постоянной мощности возбуждения с частотой следования импульсов 14 кГц. На приемнике мощности ИМО-2Н регистрировалась суммарная средняя мощность излучения 1 Вт на длинах волн  $\lambda = 510,6$  и 578,2 нм. На рис. 2 представлены осциллограммы дополнительного импульса возбуждения с регулируемой амплитудой  $A$  и основного импульса возбуждения с амплитудой возбуждения порядка 6 кВ с временной задержкой 3,2 мкс между ними.

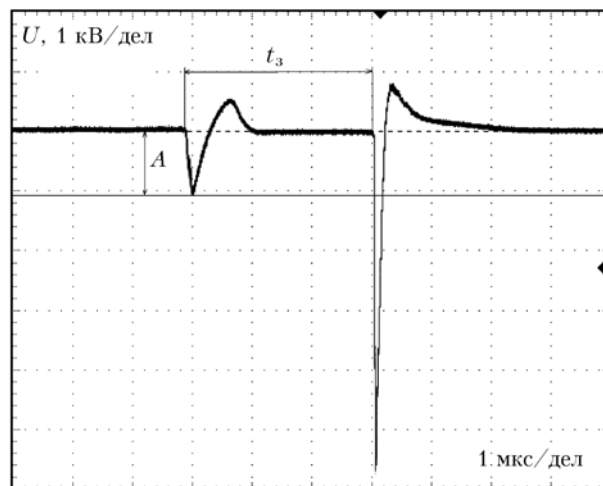


Рис. 2. Осциллограммы дополнительного и основного импульсов возбуждения с изменяющейся временной задержкой между ними  $t_3$

В экспериментах последовательно менялась задержка между импульсами возбуждения от 0,1 до 20 мкс для постоянной амплитуды дополнительного импульса возбуждения на электродах разрядной трубки, которая также могла изменяться в заданных пределах. Регулировка амплитуды дополнительного импульса возбуждения осуществлялась источником питания 6 и регулятором напряжения 7 в пределах от 0 до 400 В. При этом амплитуда основного импульса возбуждения оставалась практически постоянной.

Характерные зависимости средней мощности излучения от регулируемой амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения до 400 В для временных задержек  $t_3 = 1; 3; 6$  мкс приведены на рис. 3. Первые эксперименты показали, что на

среднюю мощность излучения влияли амплитуда напряжения дополнительного источника возбуждения и временная задержка между дополнительным и основным импульсами возбуждения.

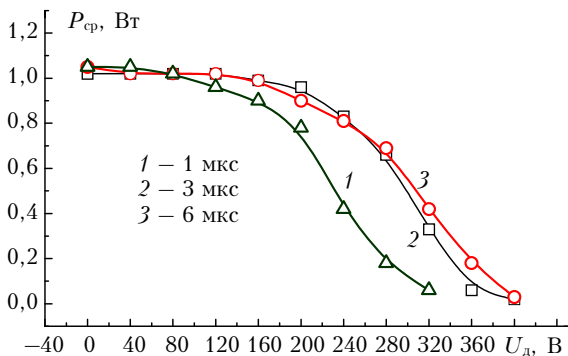


Рис. 3. Зависимости средней мощности излучения  $P_{cp}$  от амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения

Оказалось, что на среднюю мощность излучения практически не влияла амплитуда напряжения дополнительного источника возбуждения до 120 В, которому на электродах ГРТ соответствовало напряжение дополнительного импульса возбуждения порядка 0,7 кВ. Кроме того, средняя мощность излучения быстрее снижалась для временных задержек меньше чем 1 мкс при меньших амплитудах напряжения дополнительного источника возбуждения.

На рис. 4. приведены зависимости средней мощности излучения от временных задержек между дополнительным и основным импульсами возбуждения 0,12–1,2 мкс и от амплитуды дополнительного источника возбуждения 120–320 В.

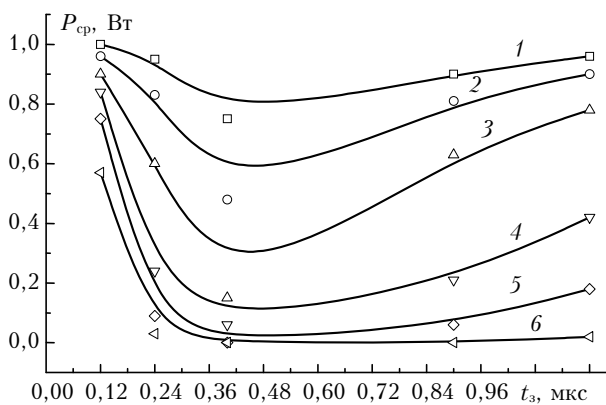


Рис. 4. Зависимости средней мощности излучения  $P_{cp}$  от времени задержки ( $t_3 = 0,12-1,2$  мкс) между дополнительным и основным импульсами возбуждения и от амплитуды регулируемого напряжения дополнительного источника возбуждения ( $U_d = 120$  В (кривая 1); 160 (2); 200 (3); 240 (4); 280 (5); 320 (6))

Исследования показали, что для нашей системы возбуждения минимальной задержкой являлась величина 100 нс, которая определялась амплитудой напряжения дополнительного источника возбуждения 120 В. Средняя мощность излучения остава-

лась максимальной при меньших амплитудах и временных задержках дополнительного импульса возбуждения. Для  $t_3 = 0,12$  мкс она быстро падала с ростом амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения от 120 до 320 В и была минимальной (0,58 Вт) при амплитуде дополнительного источника возбуждения 320 В. Затем она резко спадала с увеличением временной задержки до 0,4 мкс и равнялась 0, а далее уже не зависела от величины задержки. Независимо от амплитуды дополнительного импульса возбуждения при оптимальной временной задержке 0,4 мкс средняя мощность излучения быстро уменьшилась до минимального значения, а затем с ростом временной задержки стала медленно возрастать.

Быстрый спад средней мощности излучения хорошо иллюстрирует процесс заселения метастабильного уровня для медного лазера, а медленное возрастание средней мощности с ростом временной задержки обусловлено релаксацией населенности нижнего рабочего уровня после прохождения дополнительного импульса возбуждения [7]. Для быстрого управления средней мощностью излучения, видимо, оптимальными являлись режимы работы с амплитудой дополнительного импульса возбуждения в пределах от 240 до 320 В и временной задержкой от 0,12 до 0,4 мкс. В нашем эксперименте с независимым источником разогрева газоразрядной трубки оперативное управление мощностью излучения было в 2,5 раза быстрее, чем с саморазогревным режимом работы лазера [1]. Это означало, что средняя мощность излучения в нашем случае спадала до 0 за времена задержек 0,24–0,4 мкс, а в саморазогревном режиме за 1 мкс.

На рис. 5 представлены зависимости средней мощности излучения от времени задержки между дополнительным и основным импульсами возбуждения и от амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения.

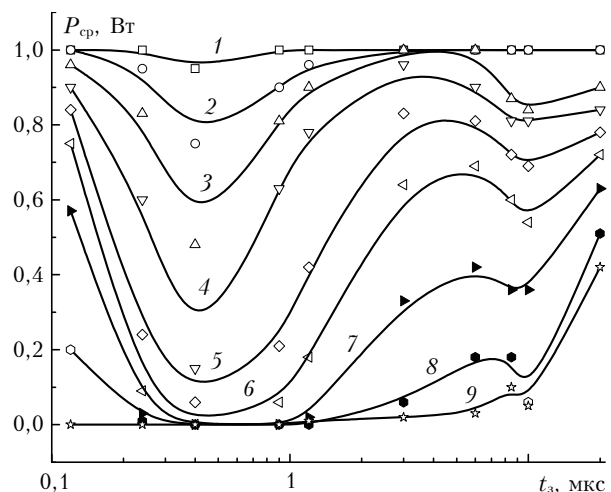


Рис. 5. Зависимости средней мощности излучения  $P_{cp}$  от времени задержки ( $t_3 = 0,12-20$  мкс) между дополнительным и основным импульсами возбуждения и амплитуды регулируемого напряжения дополнительного источника возбуждения ( $U_d = 80$  В (кривая 1); 120 (2); 160 (3); 200 (4); 240 (5); 280 (6); 320 (7); 360 (8); 400 (9))

На зависимостях средней мощности излучения от времени задержки можно выделить 5 временных точек. Первая точка — время задержки 0,12 мкс, когда начальная средняя мощность излучения определялась заданной амплитудой дополнительного импульса возбуждения. Вторая — время задержки 0,4 мкс соответствует минимальному времени спада средней мощности излучения для заданных амплитуд дополнительного импульса возбуждения. Третья — задержка 3–6 мкс, равна времени быстрого восстановления средней мощности излучения до максимально возможного значения для амплитуд от 80 до 240 В дополнительного источника возбуждения. Четвертая — задержка 10 мкс равна времени жизни метастабильного лазерного уровня и соответствует времени восстановления средней мощности до первоначального значения и времени второго спада. Пятая — задержка 20 мкс, соответствует разумному времени восстановления необходимой возможной средней мощности излучения медного лазера, так как большие временные задержки для дополнительного импульса снижают эффективность понятия оперативного управления параметрами излучения.

Отметим, что характерными точками для данных зависимостей являются три временные задержки: 0,4; 3–6 и 10 мкс. Для амплитуд напряжения дополнительного источника возбуждения 80–120 В средняя мощность излучения спадала до 0,95 и 0,75 Вт с временной задержкой 0,4 мкс соответственно, а затем с ее увеличением до 3 мкс она восстанавливалась до первоначального значения 1 Вт. В остальных случаях с ростом амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения максимальный спад средней мощности излучения происходил при времени задержки 0,4 мкс, а при больших задержках 3–6 мкс она возрастала до своего максимального значения. При этом средняя мощность излучения с дальнейшим увеличением времени задержки до 20 мкс оставалась все же меньше своего первоначального значения.

Для временной задержки 0,12 мкс средняя мощность излучения быстро спадала с увеличением амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения. Она была минимальной и равнялась, 0,2 Вт для амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения 360 В. Генерация отсутствовала при амплитуде напряжения дополнительного источника возбуждения 400 В и появлялась вновь при задержках дополнительного импульса возбуждения более 3 мкс. С ростом временной задержки более 0,12 мкс резко падала средняя мощность излучения и была минимальной независимо от амплитуды напряжения дополнительного импульса возбуждения для  $t_3 = 0,4$  мкс.

Таким образом, независимо от амплитуды напряжения дополнительного импульса возбуждения для временной задержки 0,4 мкс средняя мощность излучения быстро спадала и была минимальной, а затем с ростом временной задержки медленно возрастала. Следовательно, в зависимости от прак-

тической задачи применения данного лазера можно выбрать быстрый или медленный режимы изменения средней мощности излучения. Для более точного определения энергии, вкладываемой в разряд, нами измерялась амплитуда дополнительного и основного импульсов возбуждения (см. рис. 2). Результаты этих измерений приведены на рис. 6.

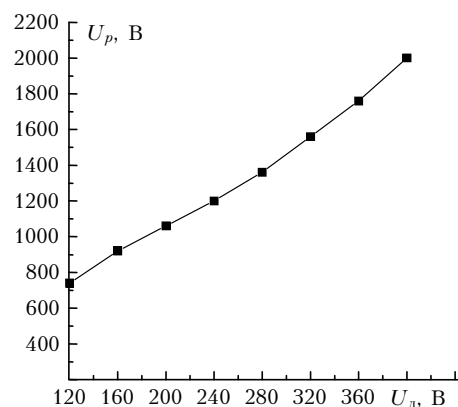


Рис. 6. Зависимость амплитуды напряжения дополнительного импульса возбуждения на электродах ГРТ от регулируемой амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения

Это характерная линейная зависимость амплитуды напряжения дополнительного импульса возбуждения ( $U_p$ ) на электродах ГРТ от регулируемой амплитуды напряжения дополнительного источника возбуждения ( $U_d$ ) для временной задержки 20 мкс. Управление средней мощностью излучения осуществлялось при амплитудах напряжения дополнительного источника возбуждения от 120 до 400 В, которым на разрядном промежутке соответствовали дополнительные импульсы возбуждения амплитудой от 0,7 до 2 кВ. При этом эффективная амплитуда дополнительных импульсов возбуждения составляла от 12 до 28% от амплитуды основного импульса возбуждения.

## Заключение

В результате проведенных исследований CuBr-лазера с независимым разогревом ГРТ и использованием дополнительного импульса возбуждения найдены оптимальные режимы оперативного управления средней мощностью излучения от амплитуды и временной задержки между дополнительным и основным импульсами возбуждения. Показано, что для оперативного управления средней мощностью излучения амплитуда напряжения дополнительного импульса возбуждения должна быть раной 12–28% от амплитуды основного импульса возбуждения. Обнаружены характерные временные задержки между дополнительным и основным импульсами возбуждения 0,4 и 10 мкс, которым могут соответствовать относительно минимальные значения средней мощности излучения, обеспечивающие CuBr-лазером. Показано, что быстрое уменьшение средней мощности излучения наблюдалось для

временных задержек  $t_3 \leq 0,4$  мкс, а ее увеличение для временных задержек  $0,4 \text{ мкс} < t_3 \leq 3$  мкс. Предлагаемый режим работы лазера позволял оперативно от импульса к импульсу изменять параметры выходного излучения, используя большую энергию дополнительного импульса возбуждения по сравнению с саморазогревным режимом работы лазера.

1. Скрипченко А.С., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. Пат. 2082263 РФ. Приоритет от 02.04.1992.
2. Юдин Н.А. Пат. 2237955 РФ. Приоритет от 13.05.2002.
3. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. и др. Пат. 2251179 РФ. Приоритет от 11.07.2003.

4. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В. Управление генерацией CuBr-лазера // Изв. ТПУ. 2009. Т. 315, № 4. С. 147–151.
5. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов: Сб. статей / Под ред. П.А. Бохана. Томск: ИОА СО АН СССР, 1978. 210 с.
6. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Лазер на парах бромида меди со стабилизацией температуры стенок активного объема // Изв. ТПУ. 2009. Т. 315, № 4. С. 152–155.
7. Юдин Н.А. Влияние предимпульсных параметров активной среды на характеристики генерации лазера на парах меди // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 8. С. 682–688.

*Fedorov A.I., Fedorov V.F., Dimaki V.A. The possibilities of prompt control for CuBr-laser radiation parameters.*

The CuBr-laser pumping parameters were investigated with a pulse repetition rate of 14 kHz with an independent heating of active medium and a supplementary source of excitation pulses, providing prompt control for radiation parameters in a given operating time range. The created experimental setup allowed one to realize both fast and slow time operating conditions of variation of output mean radiation power. It is shown that for prompt control of laser radiation power the voltage amplitude of a supplementary excitation pulse should be in limits of 12–28% of the amplitude of the basic excitation pulse. In this case, the proposed control operating condition enables one promptly change from pulse to pulse the output radiation parameters, using larger energy of the supplementary excitation pulse as compared with self-heating laser operating conditions.