

Нетипичный режим генерации CuBr-лазера

Н.А. Васнев, Н.В. Карасев, В.О. Троицкий, М.В. Тригуб

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, Томск, Россия, пл. Академика Зуева, 1, vasnev_na@iao.ru, trigub@iao.ru

Была разработана экспериментальная установка для накачки активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов. Предусмотрено изменение параметров импульсов накачки, что позволяет реализовать новые (нетипичные) характеристики генерации. В ходе экспериментов был обнаружен новый нетипичный режим генерации, получивший название режим двоянных импульсов. Данный режим проявляется, когда длительность паузы между импульсами предионизации и возбуждения составляет менее 300 нс. В этом случае были зафиксированы импульсы излучения и от импульса предионизации, и от основного импульса возбуждения. Управление энергетическими параметрами импульсов возможно путем варьирования энергии импульса предионизации. Было установлено, что для получения импульсов излучения с одинаковой амплитудой требуется разный уровень энергии дополнительного источника питания в зависимости от временной задержки между импульсами. Для оценки преобразования мощности в этом режиме был введен коэффициент η , который представляет собой отношение мощности излучения в режиме двоянных импульсов к мощности генерации в импульсно-периодическом режиме. Экспериментально было показано, что при уменьшении временной задержки коэффициент η возрастает.

Ключевые слова: активные среда на парах галогенидов металлов, бромид меди, накачки, импульсно-периодический режим, мощность генерации, режим двоянных импульсов; metal halide active medium, copper bromide, pumping, pulse-periodic mode, generation power, double-pulse mode.

Введение

Активные среды на парах металлов позволяют решать задачи, для которых прочие активные среды могут быть не приспособлены. В частности, из наиболее характерных сфер применения возможно выделить визуально-оптическую диагностику, лазерное обогащение урана, косметологию, прецизионную микрообработку [1–4]. Основной задачей, стоящей перед исследователями подобных сред, является система оперативного управления характеристиками излучения. Достаточно перспективным решением вышеуказанной задачи представляется использование нескольких источников питания [5–7]. Как правило, используются два: первый производит подготовку активной среды, второй – накачку. Соответственно, изменяя амплитудные параметры импульсов каждого из источников и временную задержку между импульсами, возможно задавать параметры для импульса выходного излучения, такие как амплитуда или длительность [8]. Еще одно важное преимущество, которое дает подобная конфигурация, заключается в возможности применения нетипичных режимов возбуждения. Исследование нетипичных режимов возбуждения позволяет получить более детальное представление о кинетике процессов, происходящих в активном объеме и, как следствие, определить зависимость параметров выходного излучения от параметров возбуждения. Особый интерес представляют малые времена задержки между импульсами предионизации и накачки, поскольку данных о характеристиках излучения в этом диапазоне отсутствуют [9].

Целью данной работы является исследование характеристик излучения в нетипичном режиме возбуждения при малых временах задержки между импульсами предионизации и возбуждения.

Экспериментальная установка

Активный элемент на парах бромида меди с указанными геометрическими параметрами ($l = 90$ см; $d = 5$ см; $V = 1767$ см³) был снабжен двумя источниками питания, один из которых являлся основным, а другой – дополнительным. Основной источник питания формировал импульсы возбуждения активной среды, в то время как дополнительный источник использовался для формирования импульсов предионизации. Данный подход обеспечивает предварительное заселение метастабильных уровней атомов меди, в результате чего уменьшается инверсная населенность.

На рис. 1 представлено схематичное изображение такой экспериментальной установки, которая изначально задумывалась и использовалась для разделения функций наработки атомов металла и их возбуждения между разными источниками питания. Для удобства будем называть основной и дополнительный источники питания как источник питания 1 (ИП1) и источник питания 2 (ИП 2).

Источники питания (ИП1, ИП2) выполнены по схеме с импульсным зарядом рабочей емкости [8]. Каждый из источников питания содержит газоразрядный коммутатор (VL1, VL2), переключение которых инициируется высоковольтным модулятором [10]. Принцип действия и конструкция высоковольтного модулятора аналогичны полезной модели [11]. Главной особенностью высоковольтного модулятора является возможность регулировки временного сдвига между импульсами запуска газоразрядных коммутаторов (VL1, VL2) в наносекундном диапазоне. В момент переключения коммутаторов (VL1, VL2) в обязательном порядке

должны быть закрыты транзисторные ключи соответствующего источника питания (ИП1, ИП2). За счет переключения высоковольтных коммутаторов (VL1, VL2) происходит поочередный разряд накопительных конденсаторов (C1, C2) на газоразрядную трубку (ГРТ), что приводит к возбуждению активной среды. Частота следования импульсов (ЧСИ) возбуждения активной среды устанавливается в плате управления (ПУ) с помощью персонального компьютера (ПК).

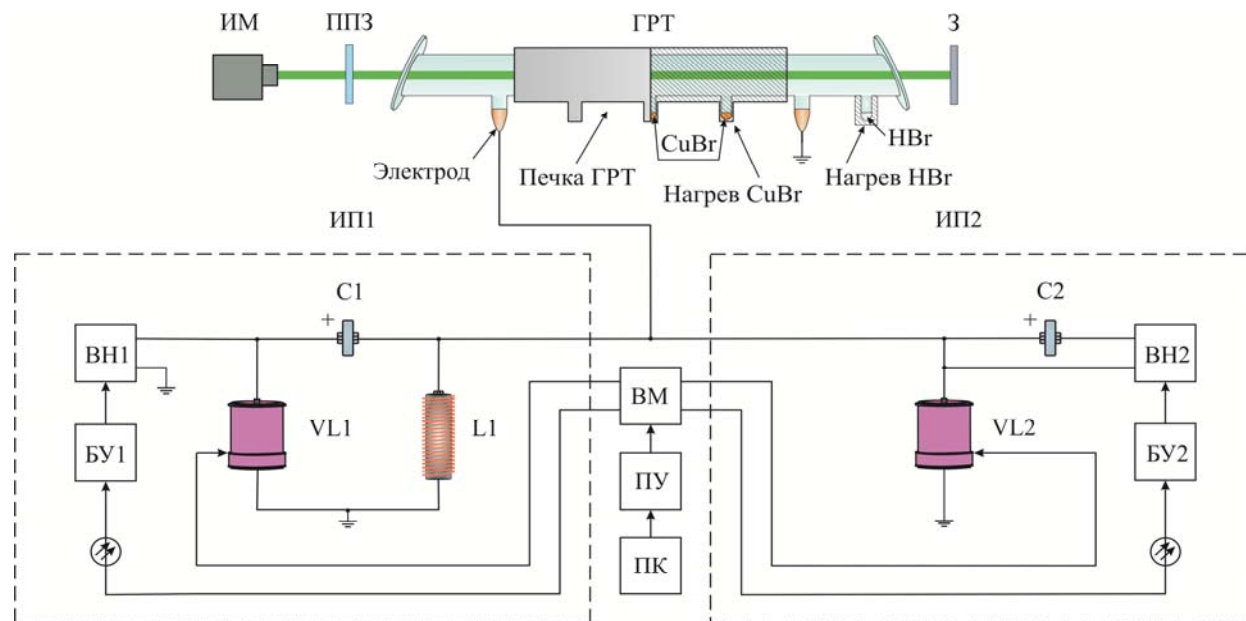


Рис. 1. Экспериментальная установка: ИП1, ИП2 – источники питания 1 и 2; БУ1, БУ2 – блок управления 1 и 2; ВН1, ВН2 – формирователь высоковольтного напряжения 1 и 2; C1, C2 – накопительные емкости 1 и 2; VL1, VL2 – высоковольтные коммутаторы; L1 – зарядная индуктивность; ПК – персональный компьютер; ПУ – плата управления; ВМ – высоковольтный модулятор; ГРТ – газоразрядная трубка; З – зеркало; ППЗ – полупрозрачное зеркало; ИМ – измеритель мощности

Номинальный режим работы основного источника питания (ИП1) обеспечивается при напряжении 280 В, при котором напряжение на аноде тиратрона VL1 составляет приблизительно 14 кВ. В ходе экспериментальных работ уровень напряжения ИП1 остается неизменным. Дополнительный источник питания работает при уровне напряжения в диапазоне (0÷240) В, который варьируется в зависимости от условий эксперимента. Предельное значение напряжения 240 В соответствует анодному напряжению тиратрона VL2.

Таким образом, реализована система накачки, которая может быть использована как для традиционного способа возбуждения активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов (в импульсно-периодическом режиме), так и для реализации более специфических нетипичных режимов возбуждения и генерации соответственно.

Нетипичный режим генерации

ИП1 позволяет реализовать импульсно-периодический режим работы исследуемой активной среды на парах бромида меди. На рис. 2, а представлены импульсы напряжения ($U_{ГРТ}$) и тока ($I_{ГРТ}$) через ГРТ, а также импульс генерации (L). В рассмотренном примере ИП2 не функционирует. Если же во время накачки активной среды, то есть при ее работе в импульсно-периодическом режиме, инициировать работу ИП2, это приведет к формированию импульсов предионизации (тока и напряжения), в результате чего мощность импульса генерации снижается (рис. 2, б), а при определенном уровне амплитуды импульсов напряжения предионизации генерация может быть подавлена полностью. Такой механизм объясняется заселением метастабильного уровня [12]. Однако в ходе экспериментальных исследований был обнаружен нетипичный режим работы рассматриваемой активной среды: при длительности паузы между импульсом предионизации и импульсом возбуждения менее 300 нс, а также при определенном уровне мощности ИП2 наблюдается формирование еще одного дополнительного импульса излучения перед основным импульсом генерации. Данную паузу будем называть в дальнейшем временной задержкой t_3 , а обнаруженный нетипичный режим будем называть режимом сдвоенных импульсов.

На рис. 3 представлено несколько осциллограмм импульсов излучения при фиксированной временной задержке t_3 и различной мощности ИП2. Импульс генерации 1 формируется за счет работы основного источника питания (ИП1), а импульс генерации 2 – за счет дополнительного источника питания (ИП2). Примечательно, что соотношение амплитуд импульсов генерации зависит от уровня мощности ИП2. Если в данном случае обозначить мощность ИП2 как P_1 , P_2 и P_3 для трех приведенных случаев соответственно, то будет справедливо записать, что $P_1 < P_2 < P_3$.

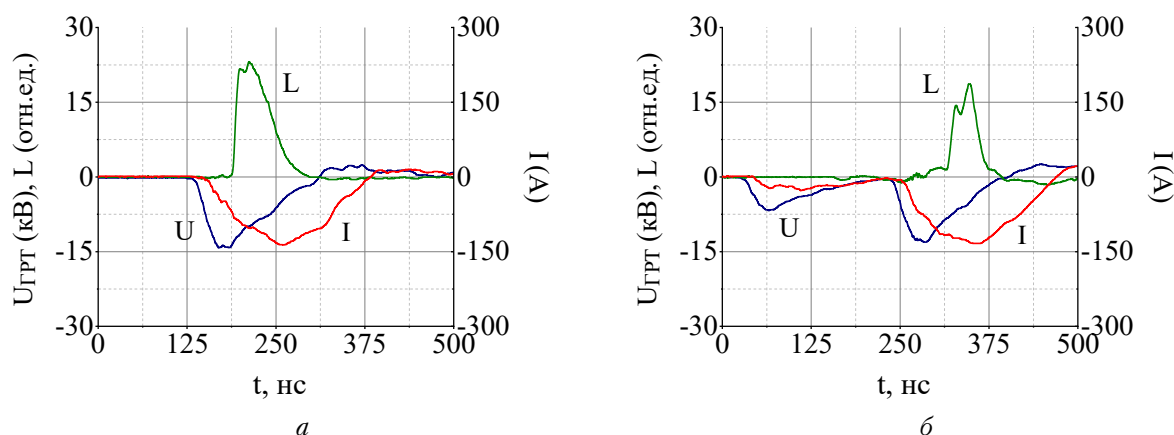


Рис. 2. Импульсы напряжения ($U_{ГРТ}$) и тока ($I_{ГРТ}$) газоразрядной трубки, а также импульсы генерации (L) при импульсно-периодическом режиме работы (а) и при режиме подавления генерации (б)

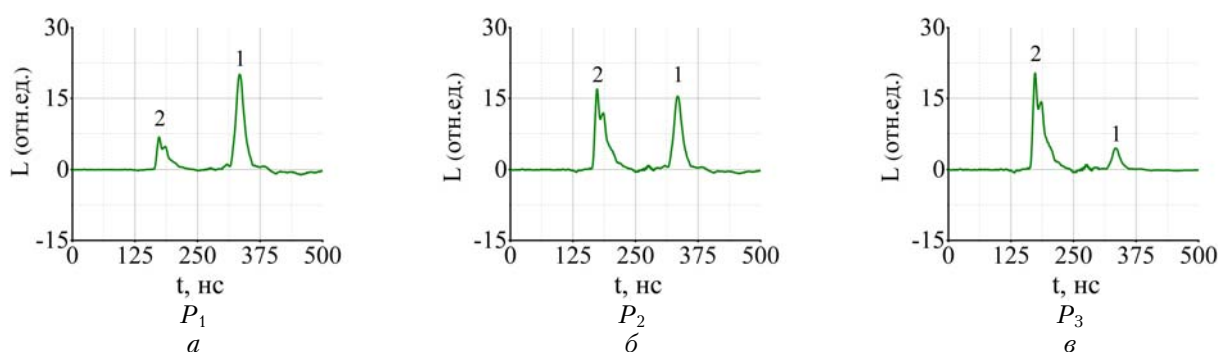


Рис. 3. Импульсы генерации (L) в режиме двойных импульсов при различном уровне напряжения дополнительного источника питания (ИП2)

С точки зрения фундаментального исследования и практического применения наибольший интерес представляет случай, когда амплитуды импульсов генерации равны (рис. 3, б). Следует отметить, что при варьировании временной задержки t_3 требуется различный уровень мощности ИП2 для выравнивания амплитуд импульсов генерации. Временная задержка варьировалась в диапазоне (50÷300) нс. На рис. 4 представлены примеры осциллограмм импульсов генерации, полученных при различном значении временной задержки t_3 . По мере уменьшения временной задержки t_3 сперва увеличивалась амплитуда импульсов излучения, а затем — их общая площадь под графиком.

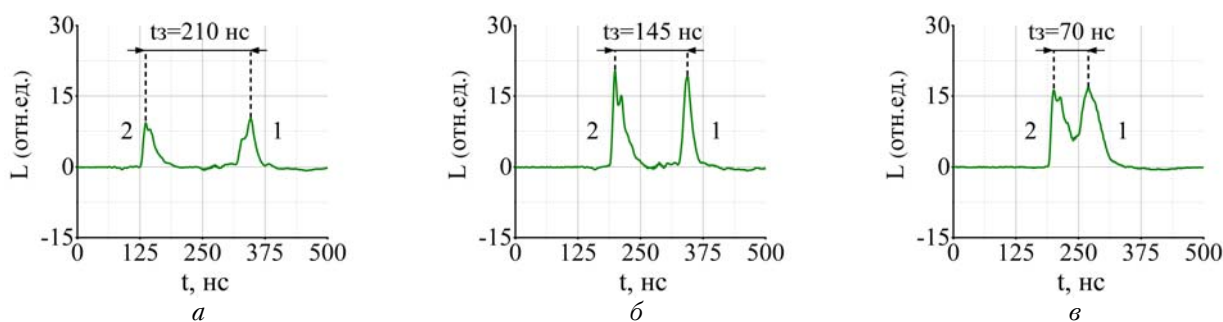


Рис. 4. Импульсы генерации (L) в режиме двойных импульсов при различной временной задержке

В ходе экспериментального исследования было установлено, что при фиксированной временной задержке t_3 определяющую роль в формировании двух импульсов генерации играет уровень напряжения импульсов предионизации. Уровень напряжения, при котором амплитуды импульсов генерации равны, будем обозначать как U_1 . Уровень напряжения, при котором происходит полное подавление импульса генерации, инициированного ИП2, будем обозначать как U_2 . При прочих равных условиях всегда соблюдается условие: $U_2 > U_1$. Кроме того следует отметить, что увеличение временной задержки t_3 между импульсами генерации способствует уменьшению уровней напряжения U_1 и U_2 , что показано на рис. 5, а.

Таким образом, очевидно, что при уменьшении временной задержки t_3 требуется больший уровень напряжения, чтобы выровнять амплитуды основного и дополнительного импульсов излучения (генерации) и, следовательно, чтобы полностью подавить основной импульс излучения. Зависимости, представленные на рис. 5, а были получены при мощности основного источника питания $P = 1792$ Вт ($U = 280$ В, $I = 6,4$) и температуре активного вещества (бромид меди) $T_{\text{CuBr}} = 515$ °С. Подобные экспериментальные исследования были воспроизведены при варьировании указанных параметров. Например, снижение температуры активного вещества до 485 °С привело к падению мощности генерации активной среды в импульсно-периодическом режиме на 10%, однако зависимость напряжения U_1 от временной задержки t_3 оказалась практически полностью идентична полученной ранее при температуре 515 °С. Гораздо более существенное влияние на уровень напряжения U_1 оказывает мощность ИП1. Очевидно, что при снижении мощности ИП1 требуется меньший уровень напряжения импульсов предионизации для выравнивания амплитуд основного и дополнительного импульсов генерации — данное утверждение подтверждают зависимости, представленные на рис. 5, б.

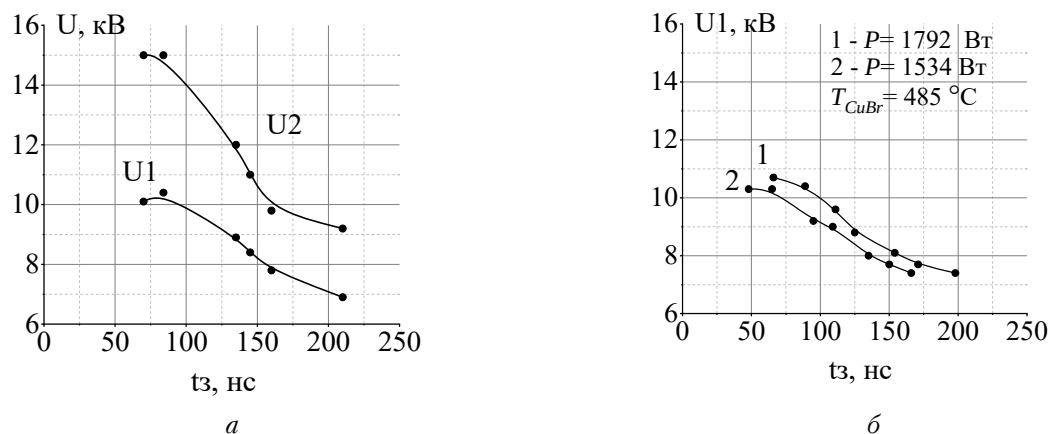


Рис. 5. Зависимости напряжений U_1 и U_2 от временной задержки t_3 между импульсами генерации (а); зависимости напряжения U_1 от временной задержки между импульсами излучения t_3 при различной мощности основного источника питания (ИП1) (б)

Одним из наиболее интересных моментов исследуемого режима двоек импульсов является соотношение мощности излучения P' с мощностью генерации P_r в импульсно-периодическом режиме в зависимости от временной задержки t_3 . Введем следующий коэффициент преобразования η :

$$\eta = \frac{P'}{P_r} 100\%.$$

Таким образом, коэффициент η показывает сколько процентов составляет мощность излучения в режиме двоек импульсов от мощности генерации P_r в импульсно-периодическом режиме.

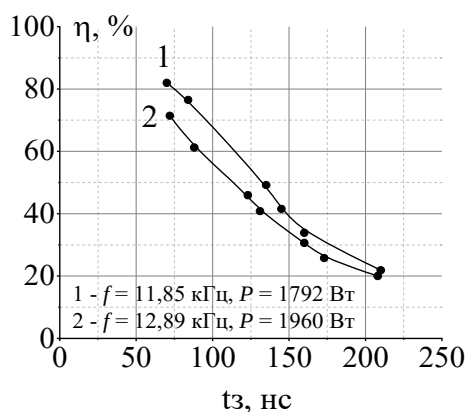


Рис. 6. Зависимости коэффициента преобразования η от временной задержки Δt при различной ЧСИ возбуждения

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при уменьшении временной задержки t_3 коэффициент преобразования η увеличивается при прочих равных условиях. Такие зависимости представлены на рис. 6 при различной ЧСИ и, как следствие, различной мощности накачки (как основного, так и дополнительного источника питания). Видно, что увеличение мощности накачки основного источника питания (приблизительно на 10%) способствует снижению коэффициента преобразования η (кривая 2 лежит ниже кривой 1).

Заключение

Разработана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять накачку активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов как в традиционном импульсно-периодическом режиме, так в более специфическом нетипичном режиме. При длительности паузы между импульсом предионизации и импульсом возбуждения менее 300 нс может быть сформирован дополнительный импульс излучения перед основным импульсом генерации. Для выравнивания амплитуды импульсов генерации требуется варьировать мощность дополнительного источника питания. Для оценки преобразования мощности генерации в импульсно-периодическом режиме в мощность излучения двух импульсов генерации был введен коэффициент η , определяемый как отношение мощностей в указанных режимах. Экспериментально установлено, что при уменьшении временной задержки наблюдается рост коэффициента преобразования η . Таким образом, варьируя энергетические параметры импульсов предионизации и накачки, а также временную задержку между ними можно осуществлять регулировку энергетических параметров импульсов генерации, что может быть использовано на практике. Данный нетипичный режим генерации обнаружен впервые.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
2. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Прохоров А.М., Фатеев Н.В. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 224 с.
3. Григорьянц А.Г., Гусев А.Л., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди для прецизионной обработки изделий электронной техники // Международный журнал: «Альтернативная энергетика и экология». 2013. Т. 129, № 7. С. 86–98.
4. Ponomarev I.V., Shakina L.D., Topchiy S.B., Klyuchareva S.V., Pushkareva A.E. Treatment of pyogenic granuloma with copper vapor laser radiation // Vestnik dermatologii i venerologii. 2021. V. 97, N 2. P. 41–49. DOI: 10.25208/vdv1209.
5. Импульсно-периодический лазер на парах химических элементов: Пат. 2618477 С1. Россия, МПК H01S 3/227. Юдин Н.А., Юдин Н.Н.; ТГУ, НИ ТГУ; Заявл. 24.12.2015; Оpubл. 03.05.2017. Бюл. № 13.
6. Импульсно-периодические лазеры на парах химических элементов с управляемыми параметрами генерации: Пат. 2237955 С2. Россия, МПК H01S 3/09. Юдин Н.А.; Институт физики полупроводников СО РАН; Заявл. 10.02.2004; Оpubл. 10.10.2004.
7. Юдин Н.А. Физические процессы в активных средах лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов и их взаимосвязь с параметрами разрядного контура: Автореф. дис. ... доктора физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2009. 38 с.
8. Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А. Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1112–1115.
9. Trigub M.V., Troitskii V.O., Karasev N.V. Atypical excitation mode of CuBr + Ne and CuBr + Ne + HBr active media // Optical and Quantum Electronics 55(10). 2023. DOI: 10.1007/s11082-023-05086-z.
10. Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С. и др. Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 30–35. DOI: 10.1134/S0032816218060307.
11. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Димаки В.А. и др. Высоковольтный модуль тор. Патент на полезную модель № 185671. Дата государственной регистрации 13.12.2018. Правообладатель: Институт оптики атмосферы СО РАН.
12. Kulagin A.E., Trigub M.V. Kinetics of the CuBr vapor active medium under non-typical excitation conditions // Appl. Phys. B. 2023. V. 129, N 5. P. 67. DOI: 10.1007/s00340-023-08010-1.

N.A. Vasnev, N.V. Karasev, V.O. Troitskii, M.V. Trigub. Atypical CuBr-laser lasing mode.

An experimental setup for active media on metal atoms self-terminating transitions pumping was developed. It is possible to change the parameters of the pump pulses, which allows implementing new (atypical) lasing features. During the experimental studies, a new atypical generation mode was discovered, which was named the double-pulse lasing mode. This mode appears when the time delay between the preionization and excitation pulses is less than 300 ns. In this case, radiation pulses were obtained from both the preionization and the main excitation pulses. The change of the lasing pulse energy is possible by varying the energy of the preionization pulse. It was found that to obtain radiation pulses with the same amplitude, different energy levels of the additional power source are required depending on the time delay between the pulses. To estimate the power conversion in this mode, the coefficient η was introduced, which is the ratio of the radiation power in the double-pulse mode to the generation power in the pulse-periodic mode. It was experimentally shown that with decreasing time delay the coefficient η increases.