09

CuBr+Ne+HBr-лазер с субмикросекудной задержкой между импульсами генерации

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

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
E-mail: trigub@iao.ru

Поступило в Редакцию 21 января 2026 г.
В окончательной редакции 11 февраля 2026 г.
Принято к публикации 11 февраля 2026 г.

Представлены результаты разработки и реализации CuBr+Ne+HBr-лазера, формирующего последовательность из двух импульсов с задержкой менее 100 ns. Для этого была разработана система возбуждения, обеспечивающая формирование последовательности импульсов возбуждения с регулируемыми временны́ми и энергетическими параметрами. Экспериментально показана возможность получения импульсов излучения одинаковой амплитуды. Установлена зависимость амплитуды каждого импульса излучения от соотношения энергий импульсов возбуждения.

Ключевые слова: CuBr-лазер, источник возбуждения, высоковольтный модулятор, временна́я задержка, нетипичный режим.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62737.20631

В настоящее время развитие лазеров на основе самоограниченных переходов в парах металлов сосредоточено на повышении эффективности их возбуждения и частотно-энергетических характеристик, а также на расширении практического использования в различных областях науки, технологий и медицины [1]. Основные направления, обеспечивающие решение указанных задач, можно разделить на модификацию режимов работы активной среды (оптимизация кинетики процессов плазмы) [2,3] и на модификацию параметров импульсов возбуждения (оптимизация параметров импульсов накачки) [4]. В частности, в работе [5] показана возможность повышения частотно-энергетических характеристик при изменении скорости нарастания импульса напряжения на газоразрядной трубке (GDT). Также изменение параметров импульсов возбуждения позволяет управлять характеристиками излучения за счет использования дополнительного импульса — так называемого импульса предыонизации [6]. Такой подход может быть особенно эффективен для сред на парах галогенидов металлов, что было также продемонстрировано в ряде работ. В частности, было показано, что за счет введения дополнительного импульса возбуждения удается управлять энергетическими, временны́ми и пространственными параметрами генерации [7], а также изменять длительность импульса излучения [8].

В настоящей работе представлены результаты разработки и апробации методики получения импульсов излучения CuBr-лазера с задержкой менее 100 ns. Получение подобного режима генерации интересна как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения разработки лазерных систем визуализации. Реализация такого режима удается за счет модификации параметров работы активной среды, а также за счет использования специальной системы возбуждения [9,10].

Для экспериментального исследования был изготовлен активный элемент на парах бромида меди со следующими параметрами: длина активной зоны 90 cm, диаметр 5 cm, давление буферного газа (Ne) составляло 30 Torr. Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока Pearson Current Monitor 8450, датчика напряжения Tektronix P6015A и осциллографа LeCroy WJ-324. Для формирования импульсов возбуждения применялись тиратроны ТГИ1-1000/25. Для регистрации импульсов излучения использовались фотоэлементы коаксиальные (ФЭК 22-СПУ-М).

Схема экспериментальной установки, поясняющая принцип работы, показана на рис. 1. Она состоит из GDT, системы возбуждения и системы регистрации параметров работы. Для упрощения на рисунке не приведены измерительные элементы. На рисунке введены следующие обозначения: PS1, PS2 — источники питания; CU1, CU2 — блоки управления; HV1, HV2 — формирователи высоковольтного напряжения; $C1$, $C2$ — накопительные емкости; VL1, VL2 — высоковольтные коммутаторы; $L1$ — зарядная индуктивность; $R1$ — балластное сопротивление; PC — персональный компьютер; CB — плата управления; HVM — высоковольтный модулятор; GDT — газоразрядная трубка; CuBr — порошок бромида меди; HBr — водородсодержащая добавка; H_{GDT} — печка активного объема; H_{CuBr} — нагревательный элемент бромида меди; H_{HBr} — нагревательный элемент водородсодержащей добавки, M — зеркало; STM — полупрозрачное зеркало; PM — измеритель мощности. Ключевой особенностью высоковольтного модулятора является возможность регулировки временно́го сдвига

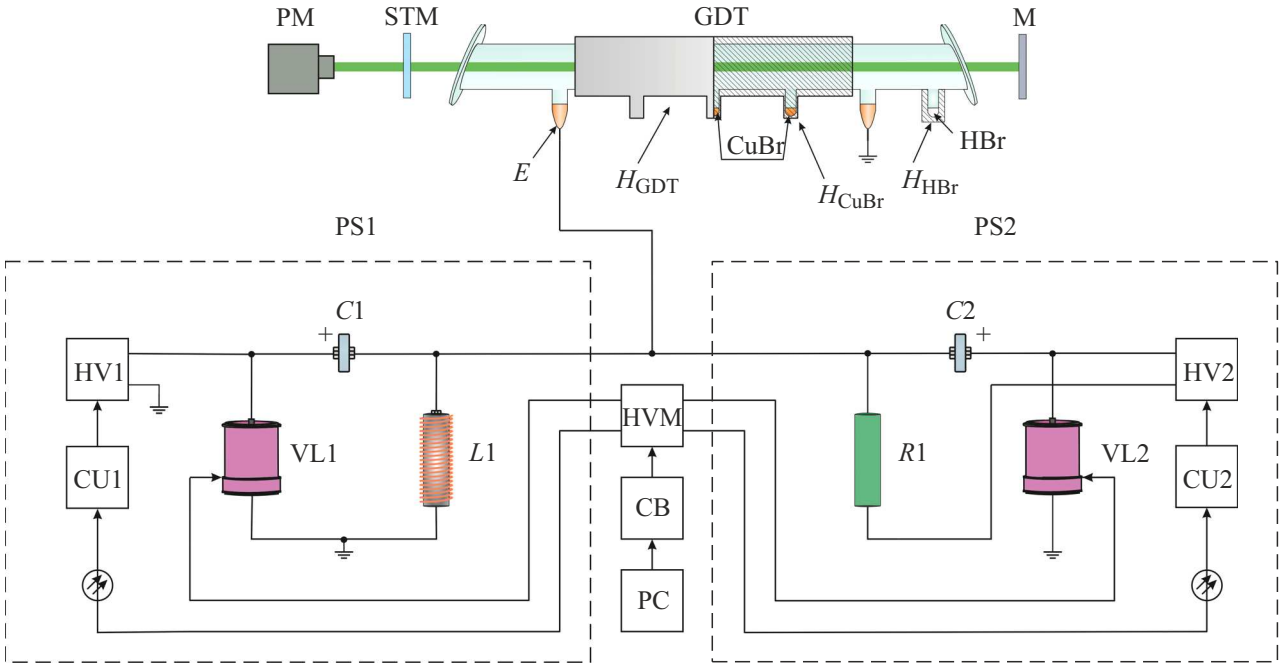

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

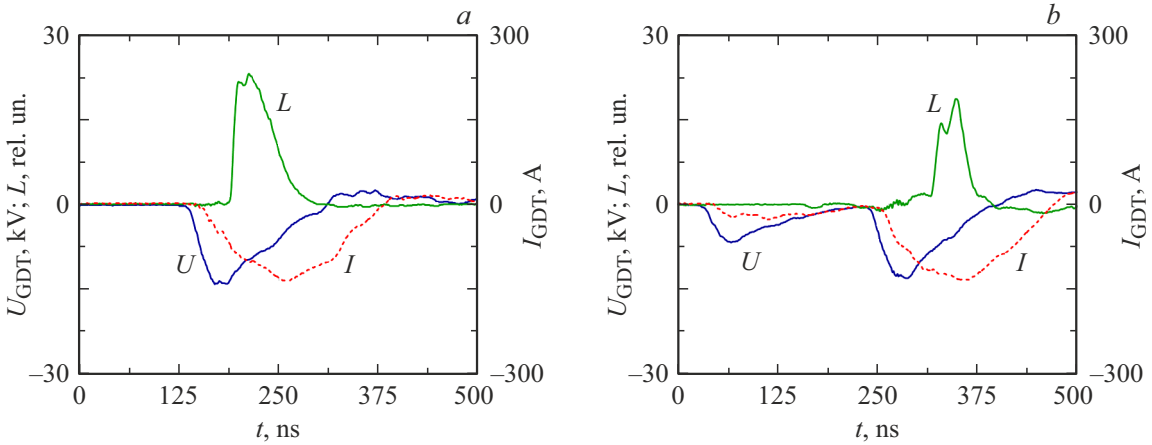

Рис. 2. Импульсы накачки и генерации. Пояснение в тексте.

между импульсами запуска газоразрядных коммутаторов (VL1, VL2) в наносекундном диапазоне. С помощью PC и CB осуществляется управление основными блоками системы возбуждения.

Режим работы активного элемента подбирался таким образом, чтобы обеспечить максимум средней мощности генерации при работе только PS1. В этом случае температура стенки составляла 870 °C, температура контейнеров с бромидом меди — 515 °C, а температура генератора HBr — 160 °C. Использование водородсодержащей добавки является необходимым условием для повышения импеданса GDT. PS1 позволяет реализовать импульсно-периодический режим работы исследуемой активной среды на парах бромида меди. Мощность накачки (P_{ext}) от PS1 составила приблизительно 1.8 kW, а частота следования импульсов $f = 11.85$ kHz. Мощность генерации в импульсно-периодическом режиме, в указанном режиме работы PS1, который не менялся на протяжении всего эксперимента, составила 10 W. На рис. 2, *a* представлены импульсы напряжения (U) и тока (I) через GDT, а также импульс генерации (L) в момент отсутствия импульса от PS2. PS2 формирует импульс предыонизации с той же f, что и PS1 (11.85 kHz), в результате чего энергия импульса генерации снижается (рис. 2, *b*), а при определенном соотношении амплитуды импульсов предыонизации от PS2 и возбуждения от PS1 генерация может быть подавлена полностью. Например, при амплитуде импульса возбуждения 15 kV достаточно сформировать импульс предыонизации амплитудой 9 kV с паузой между им-

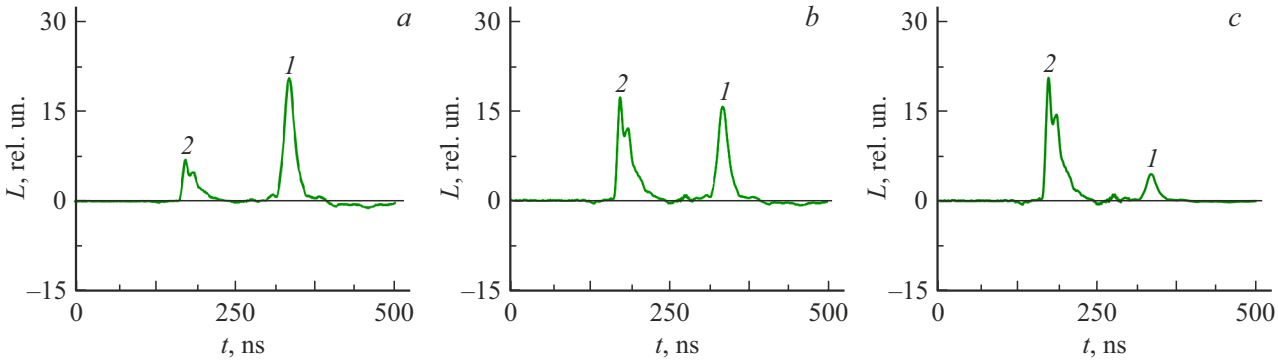

Рис. 3. Импульсы генерации (L) в режиме сдвоенных импульсов при различном уровне напряжения и, соответвенно, мощности дополнительного источника питания (PS2). a — P_1, b — P_2, c — P_3.

пульсами 230 ns, чтобы полностью подавить генерацию, т. е. амплитуда импульса предыонизации приблизительно на 30 % меньше, чем амплитуда импульсов возбуждения (следует подчеркнуть, что эта величина не является постоянной и зависит от длительности паузы между импульсами напряжения). Данная зависимость обусловлена заселением метастабильного уровня атомов активного вещества (меди).

В ходе экспериментальных исследований был обнаружен нетипичный режим работы рассматриваемой активной среды: при длительности паузы между импульсом предыонизации и импульсом возбуждения менее 300 ns, а также при определенном уровне мощности PS2 наблюдается формирование еще одного дополнительного импульса излучения перед основным импульсом генерации. Данную паузу будем называть в дальнейшем временнóй задержкой t_d, а обнаруженный нетипичный режим будем называть режимом сдвоенных импульсов.

На рис. 3 представлены импульсы генерации при фиксированной временнóй задержке t_d и различной энергии импульса, формируемого источником PS2. Импульс генерации *1* формируется за счет работы основного источника питания (PS1), а импульс генерации *2* — за счет дополнительного источника питания (PS2). Видно, что соотношение амплитуд импульсов генерации зависит от параметров импульса предыонизации дополнительного источника возбуждения PS2 (при неизменном уровне мощности PS1). Если в данном случае обозначить мощность PS2 как $P1$, $P2$ и $P3$ для трех приведенных случаев соответственно, то будет справедливо записать, что $P1 < P2 < P3$. Экспериментальные исследования показали, что с уменьшением временнóй задержки t_d требуется увеличивать мощность PS2 для формирования дополнительного импульса генерации с амплитудой, равной амплитуде основного импульса генерации. Мощность PS2 варьировалась от 200 до 500 W.

Далее была установлена зависимость соотношения мощности излучения P' генерации в режиме сдвоенных импульсов и мощности генерации P_G в импульсно-периодическом режиме в зависимости от временнóй задержки t_d. Данное соотношение обозначим как η и назовем коэффициентом преобразования (рис. 4):

$$\eta = \frac{P'}{P_G}.$$

В работе впервые продемонстрирована возможность формирования импульсов генерации одинаковой амплитуды с временнóй задержкой менее 100 ns. Для этих целей разработана система возбуждения и определены параметры импульсов возбуждения, обеспечивающие указанный режим генерации.

Известно, что характерное время релаксации нижнего (метастабильного) уровня атома меди составляет единицы-десятки микросекунд. Именно этот факт во многом ограничивает предельные частоты следования импульсов генерации данной среды. В наших экспериментах мы показали, что при определенном режиме возбуждения возможно достижение генерации с задержкой до 72 ns, что соответствует частоте ~ 14 MHz. Подчеркнем, что этот режим не является типичным (импульсно-периодическим). Мы полагаем, что в рам-

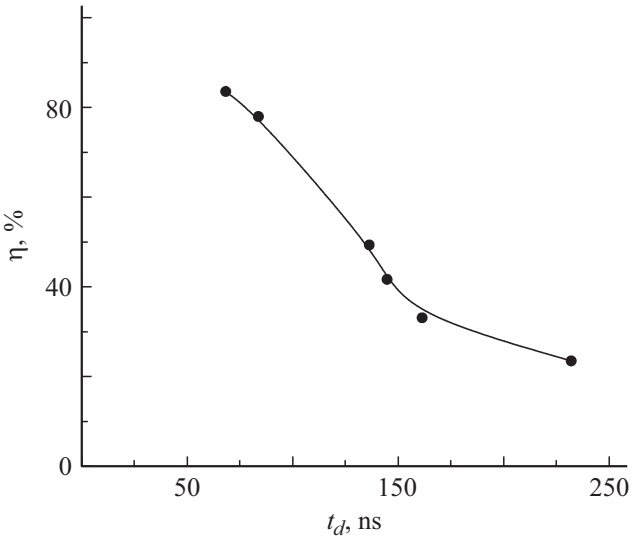

Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования η от временнóй задержки t_d.

ках первого импульса происходит частичное снятие инверсии (скорее всего, не во всем объеме активной среды). Второй импульс обеспечивает дополнительное возбуждение, что создает инверсию и формирование второго импульса генерации. Аналогичный эффект был описан в экспериментальной работе [11], авторы которой наблюдали формирование последовательности импульсов генерации медного лазера с задержкой порядка 220 ns. В наших экспериментах мы также зафиксировали тот факт, что генерация первого и второго импульсов наблюдается в разных частях объема GDT. Также экспериментально показано, что возможна реализация режима, в котором амплитуды импульсов (первого и второго) будут одинаковыми. Проведено исследование зависимости соотношения мощности излучения P' в режиме сдвоенных импульсов и мощности генерации P_G в импульсно-периодическом режиме в зависимости от временнóй задержки t_d. Дальнейшее направление работ будет связано с исследованием кинетики процессов в активной среде.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта госбюджета Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (FWRU-2026-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] I.V. Ponomarev, S.B. Topchiy, A.E. Pushkareva, Lasers Med. Sci., **40** (1), 428 (2025). DOI: 10.1007/s10103-025-04651-0
[2] M.V. Trigub, D.V. Shiyanov, P.I. Gembukh, Infrared Phys. Technol., **153**, 106331 (2026). DOI: 10.1016/j.infrared.2025.106331
[3] I.K. Kostadinov, K.A. Temelkov, S.I. Slaveeva, G.P. Yankov, Opt. Quantum Electron., **56** (7), 1234 (2024). DOI: 10.1007/s11082-024-07201-0
[4] M.A. Lavrukhin, P.A. Bokhan, P.P. Gugin, D.E. Zakrevsky, Opt. Laser Technol., **170**, 110174 (2024). DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110174
[5] M.A. Lavrukhin, P.A. Bokhan, P.P. Gugin, D.E. Zakrevsky, Opt. Laser Technol., **149**, 107625 (2022). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107625
[6] М.В. Тригуб, В.О. Троицкий, Письма в ЖТФ, **46** (8), 40 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49308.18095 [M.V. Trigub, V.O. Troitskii, Tech. Phys. Lett., **46** (4), 393 (2020). DOI: 10.1134/S106378502004029X].
[7] M.V. Trigub, V.O. Troitskii, V.A. Dimaki, Opt. Laser Technol., **139**, 106929 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106929
[8] Н.В. Карасев, В.О. Троицкий, В.А. Димаки, М.В. Тригуб, Оптика атмосферы и океана, **37** (8), 699 (2024). DOI: 10.15372/AOO20240810 [N.V. Karasev, V.O. Troitskii, V.A. Dimaki, M.V. Trigub, Atmos. Ocean. Opt., **37** (6), 905 (2024). DOI: 10.1134/S1024856024701161].
[9] Н.А. Васнев, Н.В. Карасев, В.О. Троицкий, М.В. Тригуб, *Способ визуализации объектов наблюдения с помощью лазерной проекционной системы с двухканальной регистрацией*, патент на изобретение № 2841276 (рег. 05.06.2025).
[10] Н.А. Васнев, Н.В. Карасев, В.О. Троицкий, М.В. Тригуб, *Лазерная проекционная система с двухканальной регистрацией изображений*, патент на изобретение № 2841288 (рег. 05.06.2025).
[11] В.А. Герасимов, В.В. Герасимов, ЖТФ, **81** (1), 153 (2011). [V.A. Gerasimov, V.V. Gerasimov, Tech. Phys., **56** (1), 147 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211010105].