09

Параметрическое исследование CuBr-лазера с субнаносекундным фронтом импульса возбуждения до частоты следования импульсов 100 kHz

© *П.А. Бохан*[1], *П.П. Гугин*[1], *Д.Э. Закревский*[1,2], *В.А. Ким*[1], *М.А. Лаврухин*[1]

[1] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2025 г.
В окончательной редакции 17 ноября 2025 г.
Принято к публикации 17 ноября 2025 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований генерационных характеристик лазера на самоограниченных переходах атома меди (активная среда $CuBr + Ne + H_2$) при возбуждении импульсами с субнаносекундными фронтами. В режиме цуга импульсов в газоразрядной трубке диаметром 1.1 cm получена установившаяся в нем средняя погонная мощность генерации 65 W/m при частоте следования импульсов до 100 kHz с эффективностью генерации относительно энергии, запасенной в рабочей емкости, равной 0.6 %.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, высокая частота следования, субнаносекундный фронт импульса.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62454.20524

В связи с бурным развитием полупроводниковых и твердотельных лазеров с диодной накачкой лазеры на парах меди были вытеснены из большинства приложений. Однако остается несколько областей, где их использование востребовано, в частности в скоростных проекционных системах с усилителями яркости [1]. Для этого лучше всего подходят лазеры на галогенидах меди, в которых метастабильные состояния меди релаксируют за единицы микросекунд [2], и поэтому они способны функционировать на частотах следования импульсов в сотни килогерц [3]. Для дальнейшего расширения этих приложений необходимы компактные лазеры с высокой средней мощностью. Значительного улучшения выходных характеристик лазеров на самоограниченных переходах можно добиться при уменьшении длительности переднего фронта импульса возбуждения до ~ 1 ns и менее. Это было показано для Cu (I)-, Ba (II)- и Ca (II)-лазеров (см. работу [4] и ссылки в ней). Для CuBr-лазеров такие исследования не проводились. Исследование такой возможности являются целью настоящей работы.

Эксперименты проводились с парогазовой смесью $CuBr + Ne + H_2$. Кварцевая газоразрядная трубка (ГРТ) имела межэлектродное расстояние 25 cm и внутренний диаметр вкладыша из BeO-керамики 1.1 cm (возбуждаемый объем 24 cm^3). Перед заземленным электродом разрядного канала располагался контейнер с навеской из CuBr, очищенного методом вакуумной дистилляции. Рабочая температура поддерживалась с помощью внешнего нагревателя, смонтированного снаружи обратного токопровода из нержавеющей стали. Возбуждение среды осуществлялось цугом импульсов отрицательной полярности с частотой заполнения f до 100 kHz, состоящим из 40 импульсов. Формирование импульсов осуществлялось путем импульсной зарядки емкости $C = 160$ nF от транзисторного генератора с последующим ее разрядом через ГРТ и эптрон — коммутирующий прибор на основе комбинации плазменного катода и щелевого разрядного канала [5]. Диаметр катода эптрона на основе SiC-керамики 28 mm, длина активной части 20 mm. Щелевой разрядный канал длиной 50 mm и сечением 15×0.3 mm имел вид меандра. В эптроне давление рабочего газа (гелия) составляло $\sim 15-20$ Torr, время коммутации на активную нагрузку $R = 68\,\Omega$ было менее 0.5 ns при напряжении на электродах эптрона выше 15 kV. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью осциллографа Tektronix MDO3104 с полосой пропускания 1 GHz и частотой дискретизации 5 GHz. Исследования проведены в режиме слабой прокачки смеси $CuBr + Ne + H_2$ при оптимальном давлении газовых компонентов 30 и 1 Torr соответственно.

При разогреве ГРТ лазерная генерация возникает на зеленой линии ($\lambda = 510.6$ nm) при температуре контейнера с CuBr $T \sim 400\,^{\circ}$C и состоит из нескольких импульсов в середине цуга. В качестве примера на рис. 1, *a*–*c* приведена эволюция параметров лазерной генерации по мере разогрева ГРТ при $f = 60$ kHz. Для лучшего восприятия сигнал с фоторегистрирующего прибора ФЭК 32 в режиме полного цуга искусственно растягивался путем повышения нагрузочного сопротивления до $5-20\,$kΩ. Эксперименты показали, что уже при $T = 407\,^{\circ}$C генерация начинается с 12-го импульса, к 22-му достигает максимума, а к 36-му исчезает. Генерирует по-прежнему только зеленая линия с длительностью на полувысоте $\tau \approx 3.5$ ns. Дальнейший разогрев ГРТ приводит к расширению области

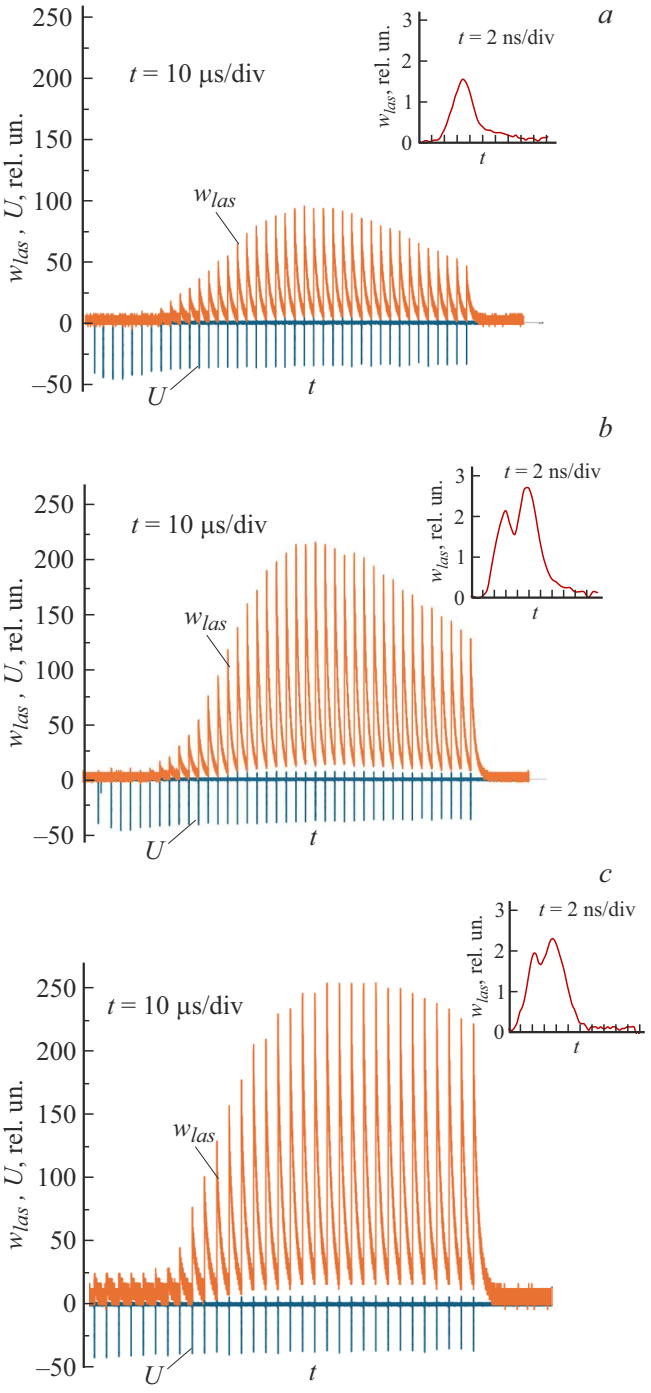


Рис. 1. Эволюция параметров лазерной генерации при разогреве ГРТ. $T = 427$ (a), 527 (b) и 571 °C (c). На вставках — форма импульса генерации ($f = 60$ kHz).

существования генерации в цуге. Импульсы лазерной генерации возникают начиная с более ранних импульсов накачки и продолжаются до конца цуга. При $T = 427$ °C (рис. 1, a) наблюдается затягивание заднего фронта импульса генерации за счет появления желтой линии с $\lambda = 578.2$ nm и расширение импульса по полувысоте до $\tau \approx 3.8$ ns. Мощность генерации в максимуме втрое превышает мощность при $T = 407$ °C и в конце цуга в ~ 2 раза слабее, чем в середине. При $T = 467$ °C мощность линии с $\lambda = 578.2$ nm достигает мощности линии с $\lambda = 510.6$ nm, вследствие чего импульс генерации расширяется до $\tau \approx 7.45$ ns.

Осциллограммы импульсов напряжения U на ГРТ, тока I через нее и генерации w_{las} представлены на рис. 2. Импульс тока состоит из двух ясно различающихся стадий. На первой стадии, длящейся 4–5 ns, наблюдаются резкие пики длительностью ~ 1.5 ns, вызванные процессом заряда-разряда собственной емкости ГРТ. Уменьшение частоты f увеличивает длительность первой стадии. С другой стороны, увеличение f, наоборот, ее сокращает, и при $f > 80$ kHz она сливается со второй стадией, во время которой осуществляется пробой ГРТ. Скорость нарастания тока dI/dt на второй стадии при $f = 60$ kHz составляет $dI/dt \approx 40$ A/ns, а при $f = 100$ kHz увеличивается до ~ 55 A/ns. При $T = 527$ °C уже преобладает желтая линия, происходит незначительное удлинение импульса генерации до $\tau \approx 7.65$ ns (рис. 1, b). При $T = 571$ °C генерация достигает максимума при дальнейшем усилении желтой линии относительно зеленой, причем к концу цуга энергия импульса составляет ~ 90 % от уровня энергии в максимуме (рис. 1, c). При $T = 617$ °C генерация уже в ~ 1.6 раза слабее, чем при $T = 571$ °C, однако после выхода на максимум она сохраняет свои параметры до конца цуга, в том числе и при повышении f до 100 kHz и увеличении количества импульсов в цуге до 100, при небольшом уменьшении длительности до $\tau = 6.8$ ns. В обобщенном виде эволюция параметров генерации при повышении температуры представлена на рис. 3, a.

На рис. 3, b приведены зависимости средней установившейся мощности генерации от исходного напряжения $P_{las}(U)$ на рабочей емкости при $f = 75$ kHz и мощности генерации от частоты следования импульсов $P_{las}(f)$ при $U = 18$ kV (температура контейнера с CuBr $T = 617$ °C). На рис. 3, c в тех же условиях показана зависимость эффективности генерации относительно энергии, запасаемой в рабочей емкости. Как следует из этих результатов, энергия и эффективность генерации растут быстрее, чем энергия накачки w (из расчета $w = CU^2/2$), и быстрее, чем частота следования импульсов f при $U = 18$ kV. На частоте $f = 100$ kHz достигнуто значение $P_{las} = 16.1$ W из расчета $P_{las} = w_{las} f$, где w_{las} — энергия генерации к концу цуга, при эффективности от запасаемой энергии ~ 0.6 %, удельной излучаемой энергии $w_{las} \approx 6.7\,\mu$J/cm^3 и пиковой мощности 10^3 W/cm^3. Эволюция формы импульса генерации при изменении частоты до $f = 85$ kHz представлена на рис. 4, она слабо изменяется до $f = 100$ kHz в основном благодаря дальнейшему усилению зеленой линии относительно желтой. Одновременно расширяется область существования лазерной генерации в цуге, при $f = 100$ kHz она начинается с 6–7-го импульса и достигает плато к ~ 30-му импульсу. С резонатором,

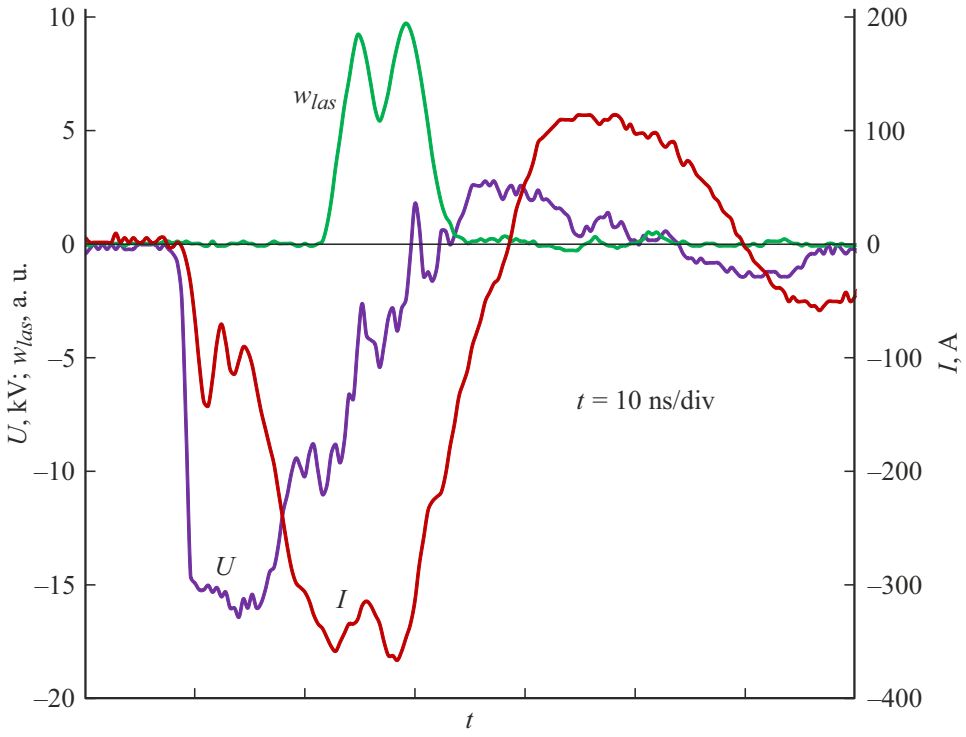


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U, тока I и генерации w_{las} ($T = 467\,^{\circ}$C, $f = 60$ kHz).

состоящим только из одной плоскопараллельной пластинки, излучается $\sim 70\,\%$ от мощности в режиме использования резонатора, состоящего из глухого зеркала и плоскопараллельной пластинки, что благоприятно для использования в проекционных системах.

Поведение характеристик генерации интерпретируется следующим образом. Отсутствие генерации в начале цуга объясняется малой степенью диссоциации паров CuBr, а в конце цуга при пониженных температурах — практически полной ионизацией паров меди в послеимпульсной плазме и вытеснением рабочей смеси в буферные зоны ГРТ из-за сильного нагрева в зоне разряда (приращение температуры $\Delta T \sim 70\,^{\circ}$C за импульс). Так, для условий, соответствующих рис. 1, *a*, концентрация электронов к концу импульса возбуждения, согласно осциллограмме (рис. 2) и соотношению $n_e = j/ev_e$ (j — плотность тока, v_e — дрейфовая скорость в неоне [6]), составляет $n_e \sim 1.5 \cdot 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-3}$ при концентрации паров CuBr $\sim 2 \cdot 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-3}$. С учетом уменьшения дрейфовой скорости из-за влияния паров CuBr величина n_e может быть еще выше. По мере разогрева генерация продолжается до конца цуга, однако на стационарное значение она выходит уже при рабочей температуре выше оптимальной для генерации в первой трети цуга, что объясняется вытеснением смеси из-за разогрева и достижения оптимальной для генерации концентрации паров CuBr. Вследствие этого эффекта происходит и усиление зеленой линии относительно желтой (рис. 4) при увеличении частоты следования импульсов.

Таким образом, показано, что использование для накачки CuBr-лазера импульсов с субнаносекундным временем нарастания импульса накачки позволяет поднять рабочую частоту лазера по крайней мере до 100 kHz и увеличить до 100 количество импульсов в цуге без уменьшения энергии генерации в ГРТ диаметром 1.1 cm. При длине разрядной зоны 25 cm достигнута средняя мощность генерации в цуге ~ 16.1 W при погонной мощности ~ 65 W/m, что сравнимо с лучшими достижениями для ГРТ большого диаметра. Малая длительность импульса генерации, обусловленная большой удельной мощностью накачки, позволяет достигнуть 70 % уровня генерации в режиме сверхсветимости, когда резонатор образован одной плоскопараллельной кварцевой пластинкой, что благоприятствует использованию в проекционных системах с усилителями яркости.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда РНФ № 24-19-00037 (https://rscf.ru/project/24-19-00037/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

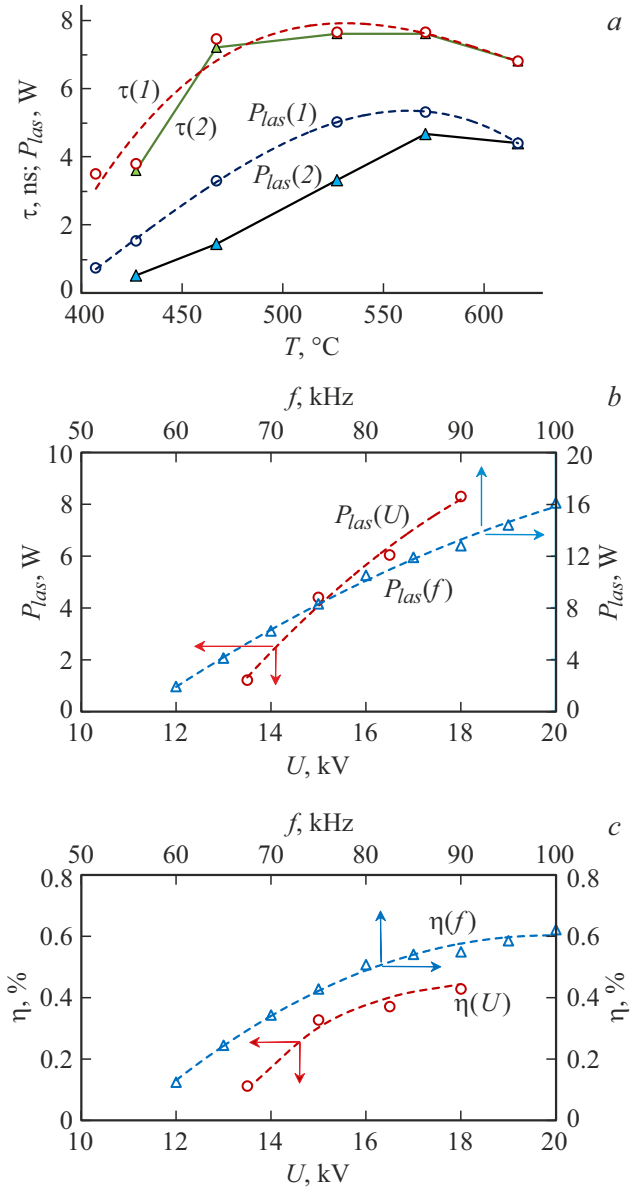


Рис. 3. *a* — зависимости $P_{las}(T)$ и $\tau(T)$ в середине (*1*) и конце (*2*) цуга; *b* — зависимости $P_{las}(U)$ и $P_{las}(f)$: $f = 75$ kHz, $U = 18$ kV, $T = 617\,^{\circ}$C; *c* — зависимости $\eta(U)$ и $\eta(f)$: $f = 75$ kHz, $U = 18$ kV, $T = 617\,^{\circ}$C.

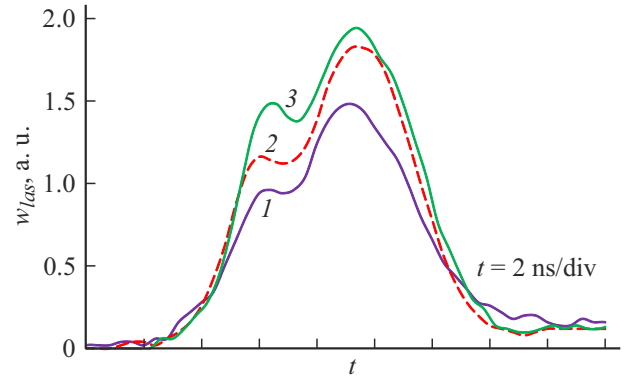


Рис. 4. Эволюция формы импульса генерации при $f = 75$ (*1*), 80 (*2*) и 85 kHz (*3*). $U = 18$ kV.

Список литературы

[1] Г.С. Евтушенко, М.А. Казарян, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб, Д.В. Шиянов, *Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов* (STT, Томск, 2016).

[2] П.А. Бохан, Д.Э. Закревский, ЖТФ, **67** (5), 54 (1997). [P.A. Bokhan, D.E. Zakrevskii, Tech. Phys., **42** (5), 504 (1997). DOI: 10.1134/1.1258660].

[3] В.О. Нехорошев, В.Ф. Федоров, Г.С. Евтушенко, С.Н. Торгаев, Квантовая электроника, **40** (10), 877 (2012). [V.O. Nekhoroshev, V.F. Fedorov, G.S. Evtushenko, S.N. Torgaev, Quantum Electron., **40** (10), 877 (2012). DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014897].

[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] P.A. Bokhan, E.V. Belskaya, P.P. Gugin, M.A. Lavrukhin, D.E. Zakrevsky, I.V. Schweigert, Plasma Sources Sci. Technol., **29**, 084001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab9d91

[6] J. Dutton, J. Phys. Chem. Ref. Data, **4**, 577 (1975). DOI: 10.1063/1.555525