

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.8

**Повышение эффективности возбуждения CuBr-лазера
за счет модификации разрядного контура**

М.В. Тригуб^{1,2}, В.В. Власов¹, Д.В. Шиянов¹, В.Б. Суханов¹, В.О. Троицкий^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 1.08.2017 г.

Представлен метод повышения эффективности возбуждения CuBr-лазера путем модификации разрядного контура. Для этого в разрядном контуре использовался импульсный кабельный автотрансформатор, эффективность применения которого была продемонстрирована для Cu-лазеров. Оценена эффективность возбуждения CuBr-лазера с помощью четырех разрядных контуров при неизменной мощности, потребляемой источником питания от сети, и одинаковых режимах работы активного элемента лазера. С использованием автотрансформатора и обострительного конденсатора мощность генерации была увеличена с 14 до 21 Вт. Повышение эффективности возбуждения обусловлено наличием задержки между началом развития тока через газоразрядную трубку и импульсом напряжения, а также изменением энерговклада в среду. Предложенный метод может быть использован в практических задачах для увеличения эффективности накачки лазеров на парах галогенидов металлов.

Ключевые слова: CuBr-лазер, эффективность возбуждения, энерговклад, импульсный трансформатор; CuBr laser, efficiency, energy input, cable pulse autotransformer.

Введение

Лазеры на самоограниченных переходах металлов обладают набором характеристик, которые резко выделяют их на фоне других. Высокая спектральная яркость, большой набор линий излучения, в том числе в видимом диапазоне спектра, высокочастотный режим работы (свыше 500 кГц) [1] и качество излучения, близкое к дифракционному, позволяют оставаться данному типу лазеров незаменимым прибором в ряде приложений, например в задачах активной фильтрации изображений [2], прецизионной микрообработке материалов и изделий [3], загоризонтной связи [4] и др. Следует отметить, что спрос на такие лазеры ограничен ввиду их относительно малой эффективности (практический КПД не превышает 10% [5]), малого срока службы и сложности эксплуатации. Поэтому увеличение выходной мощности излучения, срока эксплуатации и КПД до сих пор остается приоритетным направлением развития лазеров на парах металлов, а успешное решение этих задач позволит, на наш взгляд, расширить область их использования.

Для этих целей применяются различные методы [5–14]. В ряде работ, анализ которых представлен в [6], приведены сведения о влиянии апертуры газоразрядной трубки (ГРТ) на эксплуатационные характеристики лазеров на парах металлов, сообщается об увеличении мощности излучения за счет увеличения диаметра ГРТ. В свою очередь, это приводит к резкому снижению сопротивления разрядного промежутка, что создает трудности по введению энергии в разряд [9] вследствие рассогласования источника накачки и активной среды. Модификация кинетики активной среды посредством использования вспомогательных веществ в активной зоне, например водорода и водородосодержащих элементов, позволяет увеличить энергетические и частотные характеристики лазеров [1, 10–12] и усилителей на переходах атомов металлов [13, 14]. Однако, как показали исследования, лазер с подобной активной средой имеет нестабильные по времени параметры и требует постоянной корректировки режима работы, в частности, температуры контейнеров с НВ и CuBr при изменении вводимой мощности в активную среду.

Повысить эффективность возбуждения и мощность излучения можно благодаря согласованию источника накачки и активной среды в соответствии с условиями формирования максимальной инверсной населенности [6]. Для этого необходимо создать высокую концентрацию электронов с энергией,

* Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Василий Васильевич Власов (vlasov_vas_vas@mail.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iwo.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iwo.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iwo.ru).

достаточной для возбуждения атома меди, что предполагает увеличение скорости нарастания напряжения и тока возбуждения, а также наличие задержки между ними. Для обострения крутизны тока в [8] был использован импульсный трансформатор. Авторы публикации сообщают, что путем модификации схемы удается укоротить длительность импульса возбуждения и его фронт. Это приводит к увеличению средней мощности излучения практически в 2 раза для лазера на парах меди. Применение импульсных трансформаторов позволило повысить КПД без модификации источников питания и кинетики плазмы активной среды и может быть востребовано при разработке лазерных систем.

Цель настоящей работы – повышение эффективности возбуждения активной среды CuBr-лазера путем модификации разрядного контура с использованием импульсного автотрансформатора и обострительного конденсатора. Проведены экспериментальные исследования влияния топологии разрядного контура на параметры импульсов возбуждения активной среды, энерговклад и среднюю мощность генерации CuBr-лазера.

Экспериментальная установка

В исследовании использовался активный элемент на парах бромида меди с независимыми нагревателями активной среды и контейнеров с CuBr и HBr [15]. Такая конструкция позволяла поддерживать одинаковый тепловой режим работы активного элемента при изменении вводимой мощности в среду, а также поддерживать концентрацию CuBr на одном уровне. Диаметр активной зоны ГРТ составлял 5 см, длина 90 см, излучение формировалось плоскопараллельным резонатором. Исследовалась стандартная схема прямого разряда накопительного конденсатора через тиратрон ТГИ1-1000/25 (рис. 1, а) и схема с импульсным автотрансформатором (Тр) (рис. 1, б). Заряд осуществлялся с помощью источника с импульсным зарядом рабочей емкости [16, 17]. В экспериментах мощность, потребляемая источником от сети, была постоянной и равнялась 1800 Вт. Накопительная емкость (C_n) заряжалась от источника напряжения (ИН) до 12 кВ через зарядную индуктивность L_s . Коммутация емкости на ГРТ осуществлялась через тиратрон ТГИ1 при подаче запускающего импульса, формируемого в блоке запуска (БЗ). Рабочая емкость была 1650 пФ (разброс 20%), частота следования импульсов – 11 кГц; следовательно, энергия, накапливаемая в конденсаторе, составляла 118,8 мДж. Емкость обострительного конденсатора (C_o) равнялась 200 пФ (разброс 20%). Импульсный автотрансформатор реализован на 8 ферритовых кольцах K100×56×15 марки 2000НМ, обмотка выполнена коаксиальным кабелем РК50, число витков – 6, коэффициент трансформации – 2.

Были исследованы четыре варианта разрядного контура: традиционная схема, традиционная схема с обострительным конденсатором, схема с импульсным автотрансформатором и импульсным автотрансформатором с обострительным конденсатором. Для

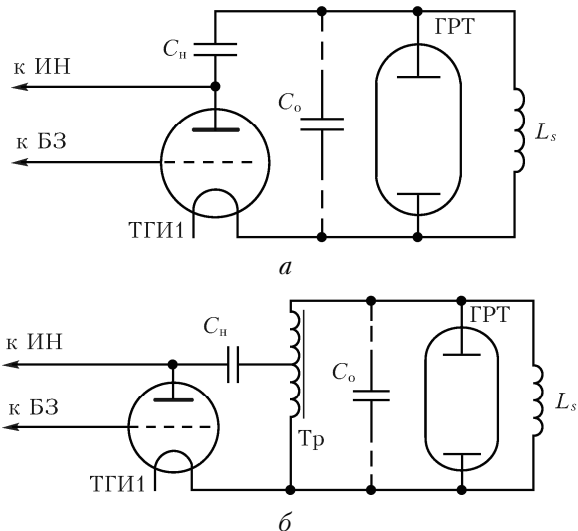


Рис. 1. Схемы возбуждения без автотрансформатора (а) и с автотрансформатором (б)

регистрации параметров импульсов тока через ГРТ, напряжения на ГРТ и импульса излучения применялись соответственно датчик тока Pearson, высоковольтный делитель Tectronix P6052 и коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22. Импульсы регистрировались осциллографом LeCroy WaveJet-324. Измерение мощности проводилось с помощью Ophir 30C-SH.

Результаты эксперимента

Для определения зависимости эффективности возбуждения от параметров разрядного контура регистрировались средняя мощность генерации, импульсы напряжения на ГРТ ($U_{ГРТ}$), тока через ГРТ ($I_{ГРТ}$), излучения (L). Осциллограмма импульса излучения получена в относительных единицах. Путем перемножения мгновенных значений тока и напряжения была определена мгновенная мощность ($P_{ГРТ}$), вкладываемая в ГРТ, временная зависимость которой также представлена на осциллограммах. Эффективность возбуждения оценивалась как отношение энергии излучения к энергии, вкладываемой в активный элемент. Отметим, что полученные значения энерговклада не учитывают реактивных составляющих активного элемента и не могут быть использованы для оценки эффективности ввода энергии в среду. Данный параметр использовался для определения качественных и количественных изменений энерговклада в зависимости от параметров разрядного контура.

Для первого варианта схемы возбуждения (рис. 1, а) были получены осциллограммы, представленные на рис. 2, без обострительного конденсатора (а) и с ним (б). Средняя мощности генерации была 14 Вт, т.е. энергия импульса составляла 1,27 мДж в обоих случаях. Без использования обострительного конденсатора энерговклад в среду, определяемый как площадь под кривой, описывающей мгновенную мощность, до начала импульса генерации $E_{\Sigma} = 30$ мДж (заштрихованная на осцилло-

граммах часть) при общем энерговкладе за импульс возбуждения 123 мДж. Следует обратить внимание на малое время задержки между началом развития тока через ГРТ и импульсом напряжения, что негативно сказывается на уровне инверсной населенности за счет заселения метастабильных уровней атома меди электронами с малой энергией.

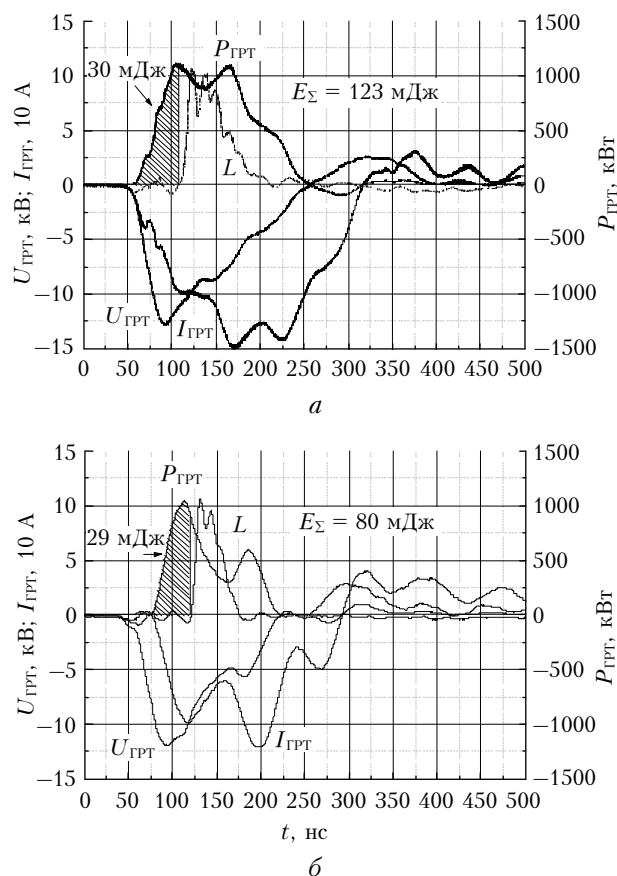


Рис. 2. Осциллограммы $U_{ГРТ}$, $I_{ГРТ}$, L и $P_{ГРТ}$ для схемы без автотрансформатора без обострительного конденсатора (а) и с ним (б)

На рис. 2, б показаны осциллограммы, полученные при включении в контур обострительного конденсатора. Суммарный энерговклад составил 80 мДж, что в 1,5 раза меньше, чем в первом случае. Энерговклад до начала импульса генерации практически не изменился ($E_{\Sigma} = 29$ мДж). Между импульсом напряжения и началом развития тока в ГРТ наблюдается задержка в 25 нс. Эффективность возбуждения, определяемая как отношение энергии излучения к общему энерговкладу, увеличилась с 1 до 1,6% при включении в контур разряда обострительного конденсатора (см. рис. 1, а). Мощность генерации при этом не увеличилась, что делает такой подход к повышению КПД неприемлемым на практике.

Следующим этапом стало исследование схемы, представленной на рис. 1, б с использованием импульсного трансформатора. На рис. 3 приведены осциллограммы для случая без обострительного конденсатора (а) и с ним (б).

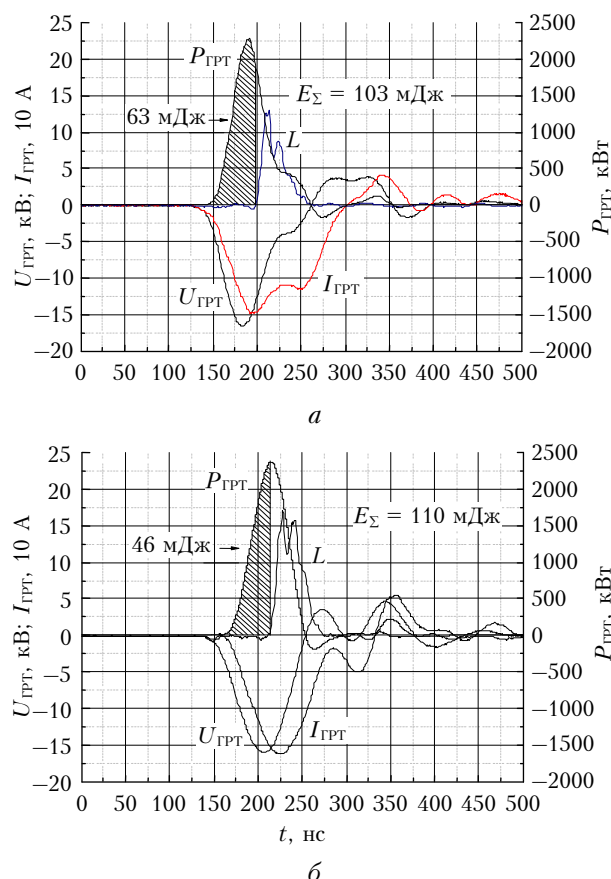


Рис. 3. Осциллограммы $U_{ГРТ}$, $I_{ГРТ}$, L и $P_{ГРТ}$ для схемы с автотрансформатором без обострительного конденсатора (а) и с ним (б)

Видно, что использование автотрансформатора привело к увеличению амплитуды напряжения на ГРТ до 16 кВ, а также к изменению энерговклада в среду и его распределению во времени. В случае без обострительного конденсатора (рис. 3, а) энерговклад за импульс возбуждения составил 103 мДж и вся энергия поступала в активную среду до момента окончания импульса генерации. До начала импульса генерации энергия, поступающая в среду, составляла 63 мДж. Энергия излучения была 1,27 мДж (средняя мощность излучения 14 Вт), а КПД по общему энерговкладу – 1,2%. На рис. 3, б энергия импульса генерации равна 1,91 мДж (средняя мощность 21 Вт) при сохранении общего энерговклада на том же уровне, что и без конденсатора – 110 мДж, следовательно, эффективность возбуждения увеличилась до 1,8%. Обращает на себя внимание тот факт, что энерговклад до начала импульса генерации составил 46 мДж, что на 30% ниже, чем для случая без обострительного конденсатора. Несмотря на это, мощность генерации увеличилась в 1,5 раза. Амплитудные значения импульсов напряжения и тока отличаются незначительно, но в последнем случае замечена задержка начала развития тока относительно начала нарастания напряжения на ГРТ на 22 нс, что практически совпадает с результатом, представленным на рис. 2, б.

Заключение

Использование импульсного автотрансформатора, позволяет увеличить энергозатраты в активную среду до начала импульса генерации практически в 2 раза. При этом происходит некоторое снижение общего энергозатраты в среду ~20%. Без использования обострительного конденсатора повышения мощности генерации не наблюдалось, несмотря на увеличение энергозатраты, амплитуды импульса напряжения и скорости нарастания тока через ГРТ. Включение в контур обострительного конденсатора позволяет обеспечить задержку развития тока через ГРТ относительно начала формирования импульса напряжения на ней. Без применения импульсного трансформатора снижение общего энергозатраты не повлияло на среднюю мощность генерации. В случае с использованием автотрансформатора и включением в контур разряда обострительного конденсатора наблюдалось увеличение мощности генерации в 1,5 раза при снижении энергозатраты до начала импульса генерации на 30%.

Обострительный конденсатор обеспечивает некоторую задержку начала развития тока через ГРТ относительно импульса напряжения, которая в условиях эксперимента составила ~20 нс. В совокупности с увеличением энергозатраты до начала импульса генерации за счет использования импульсного автотрансформатора достигается увеличение эффективности возбуждения лазера в 1,5 раза. Путем незначительной модификации схемы разрядного контура средняя мощность генерации повысилась с 14 до 21 Вт при сохранении мощности, потребляемой источником от сети. При этом практический КПД, рассчитываемый по энергии, запасенной в накопительном конденсаторе, увеличился до 1,6%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-19-00175).

1. Нехорошев В.О., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов до 700 кГц // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 10. С. 877–879.
2. Тригуб М.В., Платонов В.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Осипов В.В. CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 249–253; Trigub M.V., Platonov V.V., Fedorov K.V., Evtushenko G.S., Osipov V.V. CuBr laser for nanopowder production visualization // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 376–380.
3. Asratyan A.A., Bulychev N.A., Feofanov I.N., Kazaryan M.A., Krasovskii V.I., Lyabin N.A., Pogosyan L.A., Sachkov V.I., Zakharyan R.A. Laser processing with specially designed laser beam // Appl. Phys. A: Mater.

Sci. Process. 2016. V. 122, iss. 4. DOI: 10.1007/s00339-016-9797-0.

4. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Кулаев С.П., Тарасенков М.В., Троицкий В.О., Федосов А.В. Бистатическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 111–114.
5. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
6. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 544 с.
7. Петраш Г.Г. Импульсные газоразрядные лазеры // Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 4. С. 645–676.
8. Зубов В.В., Лябин Н.А., Мишин В.И., Мучник М.Л., Паршин Г.Д., Черняков Е.Я., Чурсин А.Д. Исследование лазера на парах меди с большим ресурсом и улучшенными параметрами импульса возбуждения // Квант. электрон. 1983. Т. 10, № 9. С. 1266–1268.
9. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7, № 6. С. 1264–1269.
10. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr–Ne–H₂(HBr)-лазера // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 1. С. 49–52.
11. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. Влияние масштабирования вводимой мощности на характеристики CuBr+Ne- и CuBr+Ne+H₂-лазеров // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 2. С. 221–223.
12. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length // Opt. Commun. 1997. V. 135. P. 289–294.
13. Trigub M.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G. Copper bromide vapor brightness amplifiers with 100 kHz pulse repetition frequency // Opt. Commun. 2016. V. 376. P. 81–85.
14. Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E. High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // Opt. Commun. 2017. V. 383. P. 148–152.
15. Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазеры на парах бромида меди нового поколения // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
16. Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев Г.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Лазер на парах бромида меди малой мощности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 11. С. 890–894.
17. Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А. Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1112–1115.

M.V. Trigub, V.V. Vlasov, D.V. Shiyonov, V.B. Sukhanov, V.O. Troitsky. Enhancement of pumping efficiency of a CuBr laser by means of modification of the discharge circuit.

A technique is suggested for enhancement of the pumping efficiency of a CuBr laser by means of modifications of the discharge circuit with a cable pulse autotransformer. The results of using four different discharge circuits are described. The experiments were carried out under similar operating conditions of the active element and at a constant input power of the pumping source. The output power increases from 14 to 21 W with the use of autotransformer and peaking capacitor. The power increase is a result of a delay between GDT current and pumping voltage and different volume-temporal characteristic of the energy input into a charge. The technique suggested can be used in different applications.