

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

Ф.А. Губарев^{1,2}, В.Б. Суханов¹, Д.В. Шиянов¹, Г.С. Евтушенко^{1,2}

**Исследование энергетических характеристик лазера
на парах бромида меди с пониженным энерговыделением
в разряд**

¹Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

²Томский политехнический университет

Поступила в редакцию 5.07.2007 г.

Представлены результаты исследования энергетических характеристик CuBr+HBr-лазеров большого активного объема с внешним нагревом активной зоны газоразрядной трубки при работе с различными схемами возбуждения. Показано, что применение внешнего нагрева в традиционных схемах накачки не оказывает существенного влияния на выходные параметры лазера. Вместе с тем преимуществом такой конструкции лазера является возможность поддержания требуемого температурного режима активной среды независимо от характера накачки, что позволяет получать генерацию в газоразрядных трубках большого объема при малой мощности накачки, а также реализовать цуговой режим работы CuBr+HBr-лазера. На основании экспериментов с цугами показано, что уход меди из разряда в межимпульсный период связан с восстановлением бромида меди. Определена константа скорости восстановления бромида меди в послесвечении разряда, которая составила $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Введение

Известно, что энергетические характеристики лазеров на парах металлов во многом определяются параметрами импульса возбуждения [1–3], которые существенно зависят от особенностей схемы накачки. В работе [2] показано, что применение схем повышения напряжения на газоразрядной трубке (ГРТ) с магнитным сжатием импульса (схемы с импульсным трансформатором и емкостным удвоением напряжения) для накачки лазера на парах меди позволяет более чем в 2 раза повысить эффективность генерации.

Сравнительное исследование особенностей накачки Cu-лазера и CuBr+H₂-лазера, проведенное в работе [4], показало, что при переходе от схемы удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса к прямой схеме накачки мощность генерации CuBr+H₂-лазера снижается незначительно (менее 10%), в то время как мощность генерации Cu-лазера снижается в 2 раза. Применение для накачки CuBr+H₂-лазеров схемы удвоения напряжения Блюмляйна без линий магнитного сжатия импульса и схем с взаимодействующими контурами [5, 6] дает увеличение мощности генерации и кд (по сравнению с прямой схемой), соизмеримое с аналогичным увеличением в случае Cu-лазера [2].

Модельные исследования режима пониженного энерговыделения в разряд путем кратковременного переключения накопительных емкостей, проведенные для лазера на парах меди [7] и бромида меди [8], показали, что снижение энерговыделения в разряд позволяет повысить эффективность генерации лазера.

Такой режим не позволял длительное время поддерживать температуру активной среды, поэтому возникла идея создания так называемого «лазера с пониженным энерговыделением в разряд». Под «пониженным» мы понимаем такой энерговыделением, когда энерговыделения в импульсах накачки недостаточно для поддержания стационарной работы лазера. Следовательно, возникает необходимость применения внешнего нагрева.

Была разработана и реализована конструкция активного элемента лазера на парах бромида меди, позволяющая поддерживать температуру в активной зоне газоразрядной трубки и состав газовой смеси независимо от вводимой в разряд мощности. Такая конструкция дает возможность расширить диапазон условий накачки вплоть до реализации «ждущего» режима, когда импульсы накачки прекращаются на длительное время (единицы секунд – минуты), и цугового режима, когда длительность паузы изменяется от нуля до ~100 периодов следования импульсов.

Идея использования периодически повторяющихся цугов импульсов возбуждения для изучения свойств активной среды, содержащей пары солей меди, была ранее реализована в лазере на парах хлорида меди [9, 10]. В работе [9] цуги формировались согласно условию $f/S = \text{const}$, где f – частота следования импульсов в цуге, S – скважность цугов. Предложенная методика позволяла менять частоту импульсов в цуге, сохраняя при этом уровень вводимой средней мощности. Она давала возможность исследовать длинную последовательность импульсов возбуждения, что выгодно отличало ее от режима возбуждения удвоенными импульсами.

Однако при такой методике невозможно произвольно варьировать параметры цугов, так как при изменении величины f/S изменяется температурный режим лазера.

В работе [10] исследовался CuCl-лазер с ГРТ малого активного объема длиной 30 см, диаметром 8 мм и в таких условиях, когда релаксация активной среды в межимпульсный период определяется диффузионными процессами к стенке. Использовался внешний нагрев, а возбуждение осуществлялось парами цугов с регулируемыми параметрами. Такой способ возбуждения, как и в нашей работе, позволял минимизировать влияние условий возбуждения на температурный режим активного элемента.

Согласно [11] введение оптимальной концентрации бромоводорода (порядка 0,2 торр) в активные элементы лазера на парах бромида меди аналогично введению добавок водорода и существенно улучшает частотные и энергетические характеристики лазера (в два раза и более). Этому способствуют: задержка тока относительно напряжения и возрастание разрядного напряжения на электродах газоразрядной трубки в фазе накачки вследствие более эффективной релаксации и рекомбинации активной среды в межимпульсный период.

Тем не менее некоторая противоречивость результатов, полученных с различными схемами накачки для CuBr+H₂-лазеров, и отсутствие данных для CuBr+HBr-лазеров не позволяют сделать однозначный вывод относительно влияния различных схем накачки на энергетические характеристики CuBr+HBr-лазера. Поэтому одной из задач настоящей работы является экспериментальное исследование энергетических характеристик CuBr+HBr-лазера с пониженным энерговыделением при возбуждении с использованием различных схем накачки. Другой задачей является исследование влияния величины межимпульсного периода (паузы) на характеристики разряда и генерации CuBr+HBr-лазера большого активного объема при возбуждении его периодически повторяющимися цугами электрического разряда. Такой режим представляет интерес не только для исследования свойств активных сред, но и для решения прикладных задач по оперативному управлению излучением лазера.

Техника эксперимента и аппаратура регистрации

Конструкция активного элемента

На рис. 1 приведена упрощенная конструкция исследуемого активного элемента [12].

Кварцевая газоразрядная трубка 1 помещалась в тепловую камеру 2, которая имела средства контроля температуры, позволяющие в автоматическом режиме поддерживать заданную температуру внутри камеры (температуру внешней стенки ГРТ). Контейнеры с рабочим веществом (бромидом меди) 5 были вынесены из тепловой камеры и имели независимый нагрев. ГРТ имела встроенный реверсивный генератор HBr 7, функциональное назначение которого

заключалось не только в поставке HBr в активную среду лазера, но и в откачке бромоводорода обратно в генератор. Концентрация HBr регулировалась в широких пределах температурой нагревателя, а оптимум добавки определялся по максимуму мощности излучения. Типичное значение добавки составляло 0,2–0,3 торр [11].

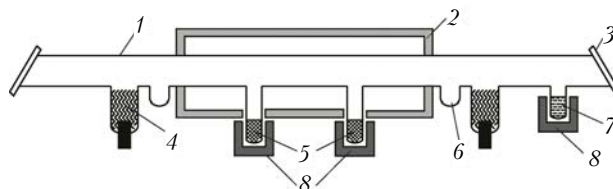


Рис. 1. Конструкция активного элемента CuBr+Ne+HBr-лазера с пониженным энерговыделением в разряд: 1 – ГРТ; 2 – тепловая камера; 3 – окна; 4 – электроды; 5 – контейнеры с порошком бромида меди; 6 – ловушки; 7 – генератор HBr; 8 – нагревательные элементы

При разработке данной конструкции активного элемента предполагалось, что мощность на нагрев ГРТ будет потребляться от нагревателя, в то время как высоковольтные импульсы накачки будут преимущественно осуществлять диссоциацию бромида меди и возбуждение. Как результат – повышение КПД по накачке (относительно мощности, потребляемой от высоковольтного источника).

Исследовались ГРТ различного активного объема: ГРТ № 1 – активная длина 56 см, межэлектродное расстояние 70 см, внутренний диаметр 35 мм, активный объем 540 см³; ГРТ № 2 – активная длина 91 см, межэлектродное расстояние 105 см, внутренний диаметр 38 мм, активный объем 1032 см³. Давление буферного газа неона составляло 30 торр. Часть экспериментов была выполнена с ГРТ большого активного объема (ГРТ № 3) – активная длина 105 см, межэлектродное расстояние 125 см, внутренний диаметр 58 мм, активный объем 2774 см³, давление Ne 20 торр.

Схемы накачки

Для исследования энергетических характеристик CuBr+HBr-лазеров с пониженным энерговыделением в разряд использовались четыре схемы формирования импульсов (рис. 2). Во всех схемах для повышения напряжения на C1 (C2) относительно источника питания использовалась схема резонансной зарядки накопительного конденсатора. В качестве управляемого ключевого элемента применялся импульсный водородный тиратрон ТГИ1-1000/25 с воздушным (при средних коммутируемых мощностях менее 2 кВт) и водяным (более 2 кВт) охлаждением.

В схемах с магнитным сжатием импульса (МСИ), удвоения напряжения Блюмляйна, удвоения напряжения с МСИ тиратрон исключается из разрядного контура. В отличие от прямой схемы временные характеристики коммутатора практически не оказывают влияния на процессы в разрядном контуре. Кроме того, снижаются требования к коммутатору и повышается срок его службы. При формировании импульса в схемах с МСИ длительность протекания

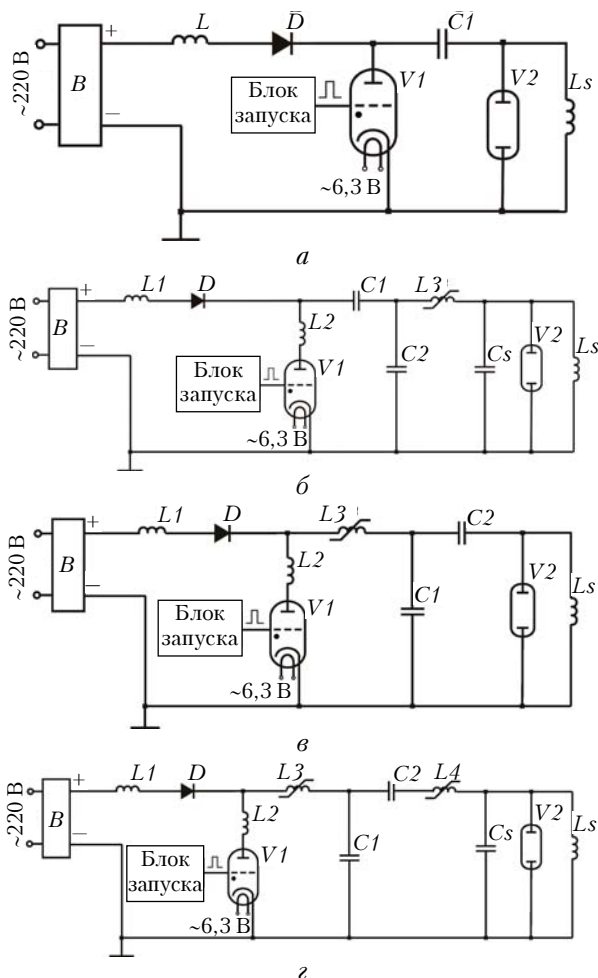


Рис. 2. Схемы накачки $\text{CuBr}+\text{Ne}+\text{HBr}$ -лазера: *a* – схема прямого разряда накопительного конденсатора; *б* – схема с магнитным сжатием импульса без удвоения напряжения [13]; *в* – схема с удвоением напряжения Блюмлайна [5, 13]; *г* – схема удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса [2]

тока через тиратрон и фронта нарастания напряжения составляла 400–600 и 150–200 нс соответственно, что примерно в 2 раза больше типичного времени при работе без магнитных схем сжатия. Вспомогательный дроссель L_3 служил для ограничения тока через тиратрон на время 20–40 нс до полного его отпириания. С помощью воздушного дросселя L_2 задавался период перезаряда емкостей C_1 и C_2 .

Параметры звеньев магнитного сжатия импульса определялись по формулам и методике, описанной в [13–15]. Точные параметры дросселей насыщения подбирались в процессе настройки схемы. В качестве материала магнитопроводов использовались кольцевые ферритовые сердечники, марка феррита 2000НМ. Для обеспечения температурного режима сердечников индуктивности насыщения L_3 , L_4 помещались в емкость с охлаждающей жидкостью (трансформаторным маслом). Калориметрическим методом были определены потери энергии на нагрев магнитопроводов, которые не превышали 150 Вт при потребляемой от выпрямителя мощности 1,8 кВт.

Аппаратура регистрации

Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации производилась с помощью пояса Роговского, малоиндуктивного делителя на резисторах типа ТВО и коаксиального фотоэлемента ФК-22 соответственно. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS3032. Мощность излучения фиксировалась измерителем мощности ИМО-2, а температура стенки ГРТ – хромель-алюмелевой термопарой.

Результаты исследования энергетических характеристик $\text{CuBr}+\text{HBr}$ -лазеров

На рис. 3 представлены зависимости средней мощности генерации $P_{\text{ср}}$ от потребляемой мощности $P_{\text{в}}$ $\text{CuBr}+\text{HBr}$ -лазеров с пониженным энерговыделением в разряд, полученные с различными схемами накачки.

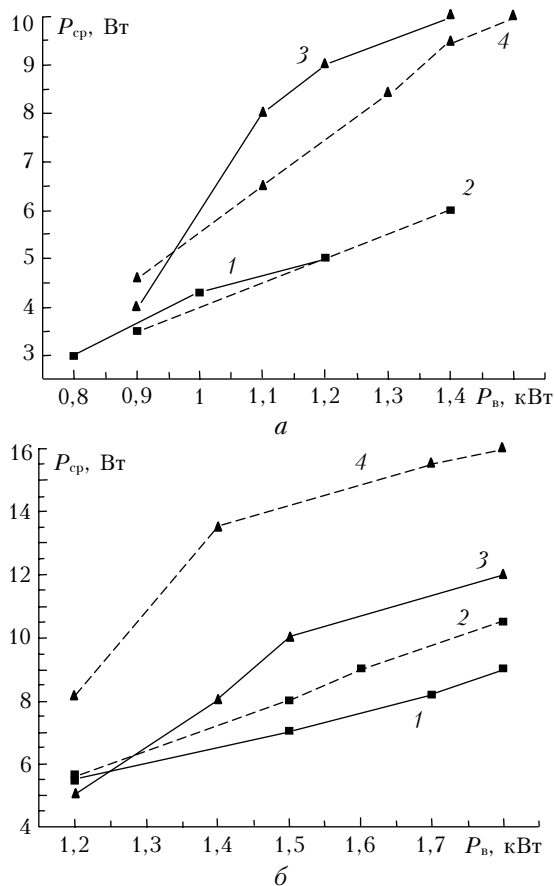


Рис. 3. Зависимость мощности генерации от мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя: *a* – ГРТ1; *б* – ГРТ2. 1 – прямая схема; 2 – схема с магнитным сжатием импульса; 3 – схема удвоения напряжения; 4 – схема удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса

При работе с ГРТ № 1, 2 величина накопительных емкостей C_1 и C_2 составляла 750 пФ, для ГРТ № 3 – 1300 пФ. По осциллограммам напряжения, тока и генерации, измеренной мощности излучения рассчитаны физические КПД лазеров в двух случаях:

Схема накачки	№ ГРТ	Диаметр, мм	$P_{ср}$, Вт	$P_{в}$, кВт	$\eta_{в}$, %	$\eta_{г}$, %	$\eta_{г}$, %
Прямой разряд накопительного конденсатора	1	35	5	1,2	0,42	0,61	0,73
	2	38	9	1,8	0,50	1,2	1,6
	3	58	15	2,4	0,63	—	—
С магнитным сжатием импульса	1	35	6	1,4	0,43	0,70	0,85
	2	38	10,5	1,8	0,58	2,27	2,25
Удвоение напряжения Блюмляйна	1	35	10	1,4	0,70	1,55	2,10
	2	38	12	1,8	0,67	2,56	3,50
Удвоение напряжения с магнитным сжатием импульса	1	35	10	1,5	0,67	2,26	3,10
	2	38	16	1,8	0,90	4,02	5,00
	3	58	24	2,4	1,0	—	—

а) когда учитывалась энергия, вводимая в разряд за все время протекания импульса тока $\eta_{г}$; б) когда в расчет принималась энергия, вводимая в разряд от начала протекания тока до окончания импульса генерации $\eta_{г}$. По выпрямителю $\eta_{в}$ рассчитывался КПД как отношение средней мощности излучения к мощности, потребляемой от выпрямителя. Максимальные значения $P_{ср}$, $P_{в}$, $\eta_{г}$, $\eta_{г}$ и $\eta_{в}$ для каждой из схем приведены в таблице.

Из полученных результатов следует, что наиболее высокие мощности излучения и КПД были получены в схемах с удвоением напряжения. В таких схемах при одинаковой мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя, к ГРТ прикладывается значительно большее напряжение. Поэтому возбуждение верхних рабочих уровней атома меди происходит более эффективно по сравнению со схемами без удвоения напряжения. Особенностью CuVg+HBr-лазеров оказалось то, что реальное удвоение напряжения в схемах удвоения наблюдается только при наличии добавки HBr. Для ГРТ № 1 наибольшая средняя мощность составила 10 Вт при КПД ~0,7%, для ГРТ № 2 — 16 Вт при КПД 0,9%, рассчитанных по потребляемой мощности от высоковольтного выпрямителя (см. таблицу). Мощность излучения 24 Вт при КПД 1%, полученная с ГРТ № 3, не являлась максимальной, поскольку не соответствовала оптимальным условиям по составу газовой смеси.

Из зависимостей мощности генерации от мощности, потребляемой от выпрямителя (см. рис. 3), следует, что для ГРТ большего рабочего объема (рис. 3, б) предпочтительнее использовать схемы с магнитным сжатием импульса. В то время как в случае ГРТ № 1 (рис. 3, а) применение МСИ не оказало положительного влияния на среднюю мощность излучения и КПД. Это можно объяснить тем, что ГРТ большего диаметра имеют большую емкостную составляющую сопротивления, поэтому для обеспечения крутого фронта напряжения на ГРТ ток перезаряда емкостей в разрядном контуре и скорость его нарастания должны быть выше. Однако реализация такой возможности ограничивается скоростью нарастания тока в тиратроне [16].

Наличие в схеме емкостного удвоения напряжения (рис. 2, з) дросселя насыщения $L4$ обеспечивает полный перезаряд емкости $C2$, после чего эквивалентная емкость (последовательное соединение конденсаторов $C1$ и $C2$) включается в разрядный контур. Поэтому в случае с ГРТ № 2 происходит заметное уменьшение переднего фронта и длительности им-

пульса возбуждения при вводе в схему Блюмляйна дросселя насыщения и конденсатора Cs , что, как известно, ведет к улучшению условий генерации. Если сравнивать физические КПД, которые характеризуют эффективность ввода энергии в активную среду, в схемах без МСИ и с МСИ (см. таблицу), то в последнем случае он гораздо выше (в 2 раза и более).

Одним из преимуществ конструкции лазера с внешним нагревом в ходе исследований оказалась возможность получения генерации в трубках большого объема при малой мощности, вводимой от высоковольтного источника накачки. Снижая энергию в импульсах накачки и одновременно увеличивая мощность нагревателя, т.е. поддерживая суммарную вводимую в ГРТ мощность на некотором уровне, можно получать относительно высокую среднюю мощность генерации в режимах, в которых при саморазогревной конструкции активного элемента это было бы затруднительно (см. рис. 3). Несмотря на низкий КПД ($\eta_{в} < 0,2\%$), генерация существовала при мощностях накачки до 500 Вт для ГРТ № 2 и до 300 Вт для ГРТ № 1. При полном отключении внешнего нагрева (уровень теплоизоляции не изменялся) генерация отсутствовала при вводимой мощности 0,8–0,9 кВт для ГРТ № 1 и практически отсутствовала (составляла десятые доли ватта) при 1,2 кВт для ГРТ № 2.

На рис. 4 представлены осциллограммы тока I , напряжения U и генерации $P_{г}$ для режима с максимальными выходными параметрами для схемы удвоения напряжения с магнитным сжатием импульса (ГРТ № 1, 2). Выяснилось, что максимальные мощности излучения и КПД генерации наблюдаются при ярко выраженном колебательном характере напряжения на электродах ГРТ, т.е. при явном расфокусировании ГРТ и схемы накачки. Можно предположить, что разряд в лазере на парах галогенидов меди с активными добавками отличается от разряда в парах чистых металлов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Применение внешнего нагрева позволяет получать генерацию CuVg-лазера при низких мощностях накачки, при которых в его отсутствие генерация не реализуется.
2. Вместе с тем внешний нагрев не приводит к существенному улучшению выходных параметров CuVg+HBr-лазера. Для получения высокого КПД необходимо увеличивать вводимую в разряд мощность в импульсах накачки и снижать мощность нагревателя.

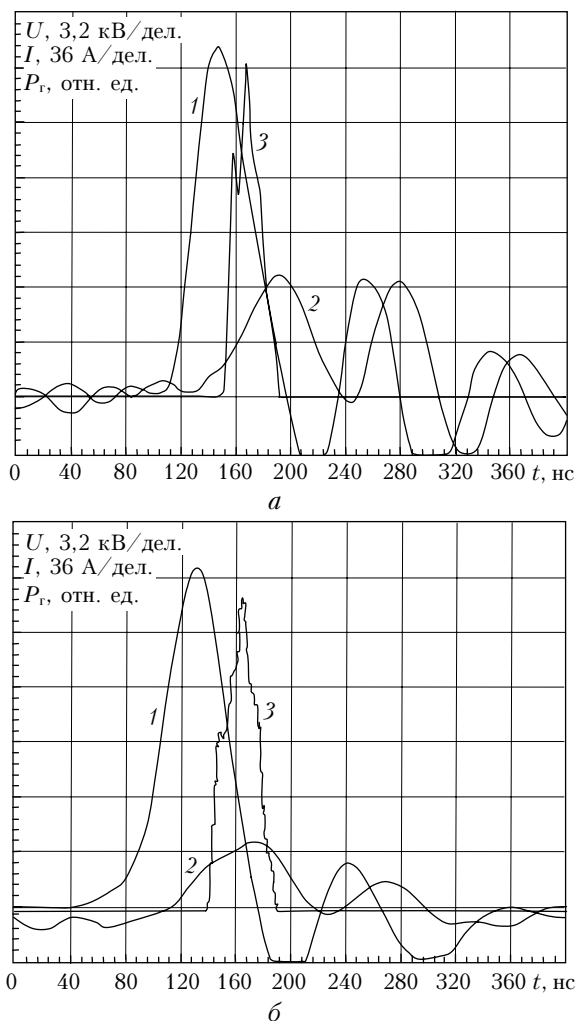


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) для схемы удвоения напряжения с МСИ: а – ГРТ1, б – ГРТ2

3. Для всех схем накачки кнд, рассчитанные до окончания импульса генерации и за время протекания тока, намного превышают кнд по выпрямителю. Вероятно, применение в схемах дополнительных средств обрыва энерговклада, например после окончания генерации, позволило бы снизить вводимую импульсную мощность без потерь кнд.

4. Для дальнейшего повышения выходных характеристик требуется детальное исследование характеристик разряда в лазерах на парах галогенидов металлов, в частности в $\text{CuVg}+\text{NBg}$ -лазере.

Результаты исследования цугового режима накачки

С целью исследования процессов релаксации плазмы в течение межимпульсного периода и соответственно определения влияния величины межимпульсного периода на характеристики разряда и генерации были проведены исследования $\text{CuVg}+\text{NBg}$ -лазера при возбуждении его цугами импульсов электрического разряда. Цуги интересны тем, что позво-

ляют исследовать как область «сверхнизких» частот следования импульсов (задержки между цугами несколько секунд и более), так и область высоких частот следования (> 100 кГц). Первая интересна с точки зрения исследования процессов диффузии атомов меди на стенку и восстановления бромида меди в объеме ГРТ. Вторая открывает возможности исследования причин, ограничивающих частоту следования импульсов и энергетические характеристики лазеров на парах галогенидов металлов. В случае саморазогревного лазера при возбуждении цугами импульсов энерговклад в разряд и, соответственно, температура в активной зоне зависят от параметров цугов (частоты следования, количества импульсов в цуге, времени задержки между цугами).

Конструкция активного элемента с пониженным энерговкладом в разряд позволяла минимизировать влияние параметров накачки на температурный режим лазера. Исследовались ГРТ № 1 при возбуждении по прямой схеме (см. рис. 2, а), величина накопительной емкости 500 пФ. Блок запуска был сформирован из задающего генератора и формирователя импульсов для запуска тиратрона. Задающий генератор позволял формировать периодически повторяющиеся цуги импульсов с регулируемыми параметрами: частотой следования импульсов в цуге, длительностью паузы между цугами, количеством импульсов в цуге. Длительность паузы между цугами могла задаваться от нуля (импульсно-периодический режим) до 5 мс. Максимальная частота следования импульсов в цуге 23,3 кГц определялась из возможностей коммутатора – тиратрона ТГИ1-1000/25. Исследовались режимы работы с частотами импульсов в цуге от 10 до 23,3 кГц.

На рис. 5 представлены типичные осциллограммы напряжения, тока и генерации для цугового режима возбуждения.

Для всех экспериментов характерно, что амплитуда первого импульса в цуге тока и цуге генерации меньше, чем в последующих импульсах, причем рост мощности генерации от импульса к импульсу носит монотонный характер. Длительность импульса генерации практически не меняется и находится на уровне 40 нс (по основанию).

Согласно существующим моделям R-M-лазеров мощность генерации зависит от ряда факторов, в частности, от остаточной концентрации электронов и концентраций атомов меди в основном и метастабильном состояниях к началу импульса возбуждения. Из осциллограмм тока и напряжения (рис. 5, а, б) следует, что концентрация электронов за время паузы падает до меньшего значения, чем за межимпульсный интервал внутри цуга.

Можно предполагать, что концентрация атомов меди в метастабильном состоянии также падает до меньшего значения. Это означает, что к началу первого импульса должны создаваться условия для более эффективной генерации при условии, что концентрация атомов меди в основном состоянии не изменяется (или уменьшается незначительно). Через 2–3 импульса амплитудное значение импульса тока достигает некоторого установившегося значения, что

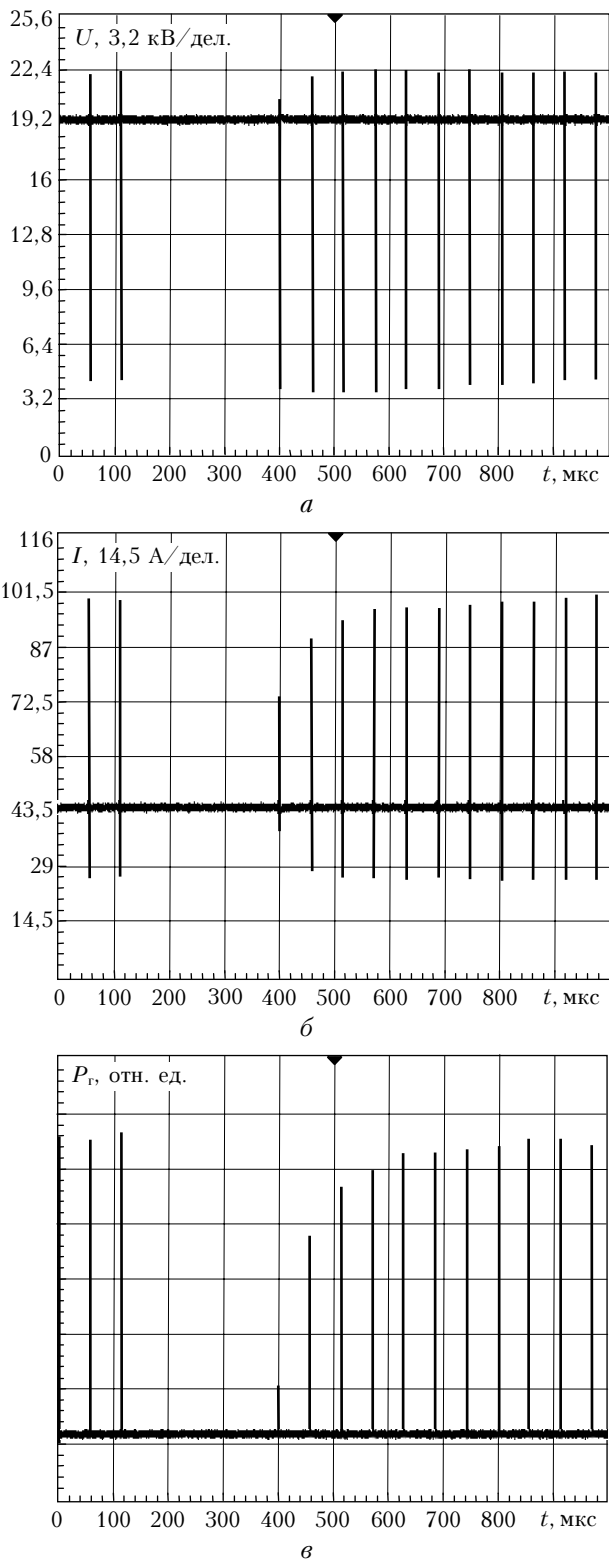


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения (*a*), тока (*б*) и генерации (*в*) в цуговом режиме работы, частота импульсов в цуге 17,5 кГц

свидетельствует об установлении предимпульсной концентрации электронов, однако амплитуда импульса генерации достигает установившегося значения (восстанавливается) значительно позже или не достигает

вообще, что имеет место при больших паузах между цугами и (или) малом количестве импульсов в цуге.

Спад мощности в первом импульсе можно объяснить недостатком свободных атомов меди в разряде, а рост мощности генерации от импульса к импульсу — процессами накопления атомарной меди. На рис. 6, *a* показана зависимость пиковой мощности генерации P_g от номера импульса в цуге для разных частот повторения импульсов возбуждения в цуге при паузе между цугами 280–300 мкс. Количество импульсов в цуге 10–14.

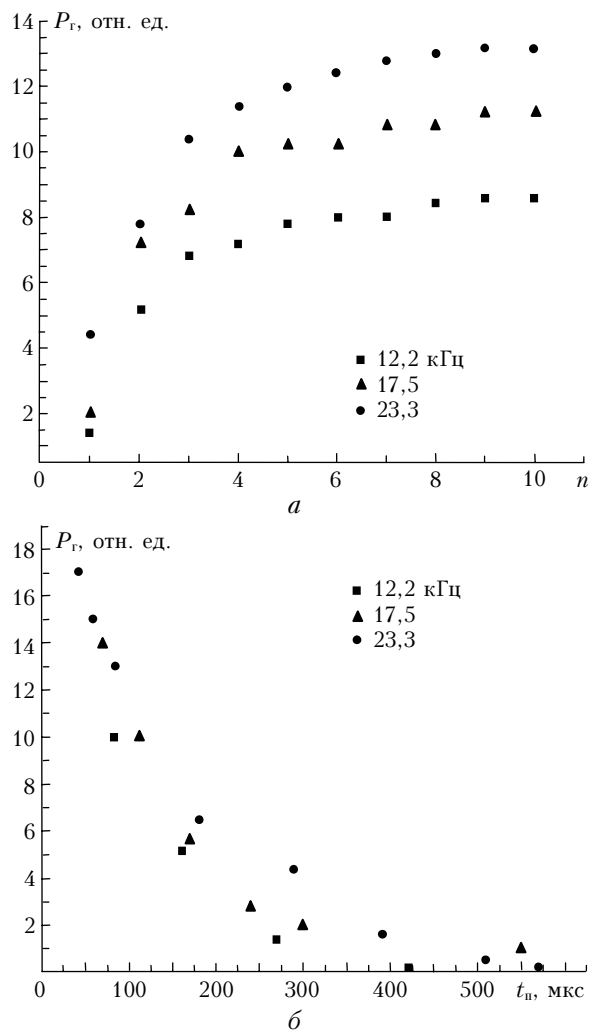


Рис. 6. Зависимость пиковой мощности генерации P_g от номера импульса в цуге (*a*) и пиковой мощности генерации в первом импульсе цуга $P_{1г}$ от паузы между цугами t_n (*б*)

На рис. 6, *б* представлена зависимость пиковой мощности генерации в первом импульсе цуга от паузы между цугами. Амплитудное значение первого импульса в цуге убывает по закону, близкому к экспоненте, причем мощность генерации в 1-м импульсе спадает в e раз за время паузы ~ 200 мкс, а за время 500–600 мкс практически до нуля. На основании этой зависимости произведена оценка константы скорости ухода атомов меди из плазмы разряда. Она определяется процессами соединения меди и брома

в бромид меди и процессом диффузии атомов меди на стенку ГРТ. Оценка составила величину $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Следовательно, при возбуждении активной среды импульсами, следующими с частотой менее 5 кГц, возникают сложности с обеспечением необходимой для эффективной генерации концентрации атомов меди. Значение паузы 600 мкс является пороговым значением, при котором генерация в первом импульсе последующего цуга пропадает. При изменении длительности паузы от 600 мкс до 5 мс генерация наблюдалась начиная со второго импульса при всех исследованных частотах следования импульсов в цуге. Во всем диапазоне задержек между периодически повторяющимися цугами импульсов, начиная с минимальной задержки (последующий цуг является продолжением предыдущего) и до максимально возможной в условиях эксперимента (5 мс), форма огибающей цугов генерации не изменялась и носила монотонный характер. С уменьшением паузы между цугами и (или) с увеличением количества импульсов в цуге происходило только увеличение амплитуды первых импульсов в цугах.

Пауза между цугами и частота импульсов в цуге определяют импульсную мощность, которая установится к концу цуга, и время восстановления. Под временем восстановления понимается время, в течение которого амплитуда импульса генерации достигает установившегося значения. Время восстановления определяется как

$$t_{\text{в}} = (N - 1) T,$$

где T — период следования импульсов в цуге; N — количество импульсов накачки, после которых мощность генерации достигнет установившегося значения. На рис. 7 представлены зависимости времени восстановления амплитудного значения мощности генерации $t_{\text{в}}$ от длительности паузы между цугами $t_{\text{п}}$ для различных частот следования импульсов в цуге.

Согласно полученным зависимостям даже при больших паузах между цугами к моменту прихода первого импульса в цуге в разрядном промежутке имеется остаточная концентрация атомов меди. Чем выше частота повторения, тем эта концентрация выше. Поэтому за меньшее количество импульсов (при одинаковой паузе) пиковая мощность генерации достигает стационарной величины. Видно, что для каждой частоты зависимость времени восстановления от паузы носит нелинейный характер. При этом перегиб на кривых показывает, что при задержках более ~600 мкс плотность меди убывает гораздо медленнее, чем при меньших задержках.

Полученные нами результаты имеют ряд отличий от результатов, представленных в работе [10]. Во-первых, отличается форма огибающей цугов, которая в [10] имеет максимум и спадает к концу цуга практически во всех представленных случаях. С повышением температуры стенок кюветы превышение максимальной пиковой мощности над установившейся в цуге уменьшается, и при некоторой температуре огибающая принимает монотонный вид. Во-вторых, длительность паузы между цугами в наших экспериментах не влияет на форму огибающей цугов.

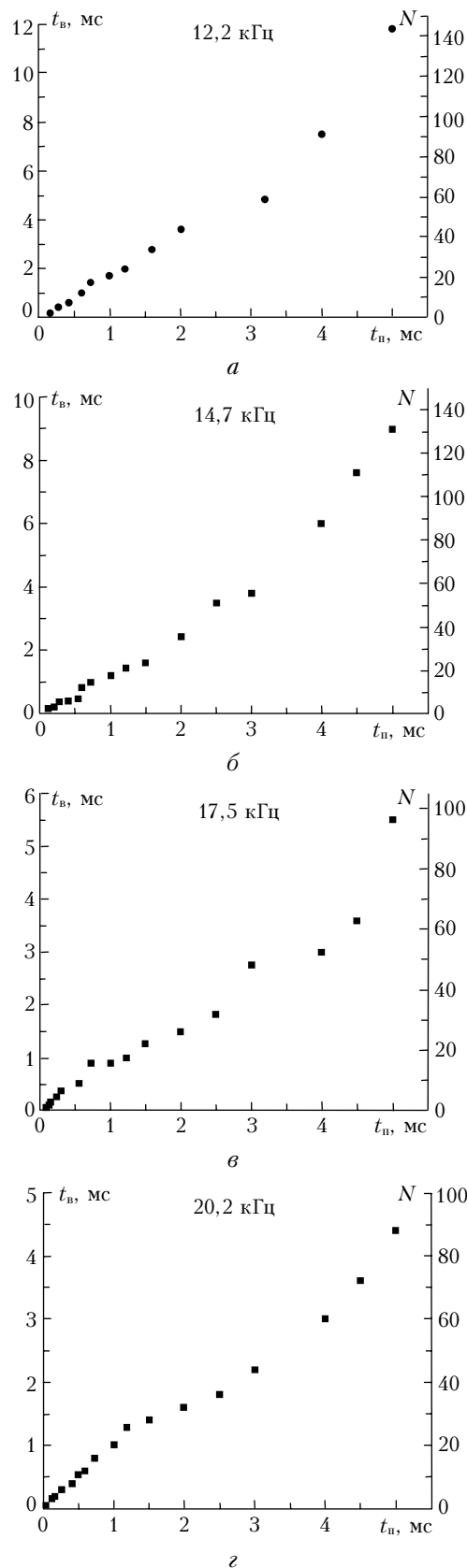


Рис. 7. Зависимость времени восстановления $t_{\text{в}}$ (количества импульсов — N), необходимого для выхода импульсной мощности на максимальное значение, от паузы между цугами $t_{\text{п}}$ при различных частотах следования импульсов в цуге

Выводы

При этом все цуги в последовательности цугов имеют одинаковые форму и установившееся значение мощности генерации. В работе [10] форма огибающей второго цуга и мощность генерации в цуге существенно зависят от времени задержки между цугами и количества импульсов в первом цуге. К сожалению, в работе ничего не говорится о частоте следования пар цугов и соответственно о задержке между вторым цугом в предыдущей и первым цугом в следующей паре. Можно предположить, что эта задержка была намного больше задержки между цугами в паре.

Очевидно, что возбуждение периодически повторяющимися цугами отличается от возбуждения одиночными или парными цугами. Такой характер формирования цугов более корректно воспроизводит режим регулярных импульсов, чем просто пары цугов. В нашем случае, вероятно, отсутствует влияние одного цуга на другой, связанное со временем поставки молекул CuBr в рабочую зону, т.е. в активной зоне всегда присутствует достаточное количество CuBr, а переходные процессы определяются процессами диссоциации молекул CuBr в течение импульса накачки и ухода атомов меди в межимпульсный период. Нами не проводилось специального исследования зависимости параметров цугов от температуры внутри нагревателя и температуры контейнеров с CuBr, однако в процессе разогрева ГРТ до рабочей температуры (780 °С) изменений формы огибающей не наблюдалось.

Отличие полученных в данной работе результатов от результатов работы [10] скорее обусловлено отличием методики и техники эксперимента (размеры и конструкция ГРТ, наличие добавки HBr), чем типом галогенида (CuBr или CuCl). Учитывая сходство свойств CuBr и CuCl, а также результаты работы [17], можно предположить, что при одинаковых условиях накачки, размерах и конструкции ГРТ, наличии (или отсутствии) добавки HBr характер цугов импульсов генерации будет одинаковый.

Проанализируем процесс ухода атомов меди из разряда. В работе [10], где исследовался CuCl-лазер с ГРТ диаметром 8 мм, уход атомов меди связывается преимущественно с диффузией на стенку. Характерное время диффузии атомов меди на стенку в условиях работы [10] составляет ~160 мкс. В данной статье под уходом меди из разряда понимается протекание двух процессов: диффузия атомов меди на стенку и восстановление бромидов меди в объеме ГРТ. Для трубки диаметром 35 мм (давление неона 30 торр, температура газа 1000 К) с использованием данных работ [18–20] нами было оценено время диффузии атомов меди на стенку ГРТ, которое составило ~10 мс. Измеренное по кривым рис. 6 характерное время ухода атомов меди составило ~200 мкс. Это свидетельствует о том, что в нашем случае диффузионные процессы не могут оказывать существенного влияния на уход меди из разряда. Следовательно, преобладают объемные процессы, связанные с восстановлением бромидов меди в межимпульсный период, а определенная нами константа скорости ухода атомов меди из плазмы разряда есть не что иное, как константа скорости восстановления бромидов меди.

Применение внешнего нагрева ГРТ при использовании традиционных схем накачки не оказывает положительного влияния на эффективность лазера. Снижение мощности накачки при соответствующем увеличении мощности нагревателя приводит к уменьшению средней мощности излучения и КПД.

Вместе с тем преимуществом указанной конструкции лазера с пониженным энерговыделением является возможность получения генерации при малой мощности накачки. Настолько малой, что при использовании традиционной конструкции активного элемента реализовать саморазогревной режим в ГРТ CuBr+HBr-лазера большого объема было бы затруднительно.

На основании экспериментов с цугами импульсов определена константа скорости восстановления бромидов меди в послесвечении разряда, которая составила $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего исследования цугового режима возбуждения CuBr-лазера с целью изучения физических процессов в этом лазере.

Авторы выражают благодарность В.М. Климкину за интерес к работе и полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект: РНП.2.1.1.5450) и гранта Института оптики атмосферы СО РАН для молодых ученых.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
2. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
3. Демкин В.П., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. Эффективность лазера на парах меди // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 659–665.
4. Евтушенко Г.С., Костыря И.Д., Суханов В.Б., Тарасенко В.Ф., Шиянов Д.В. Особенности накачки лазера на парах меди и бромидов меди // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 8. С. 704–708.
5. Sabotinov N.V., Kostadinov I.K., Bergmann H.W., Salimbeni R., Mizeraczyk J. A 50-Watt Copper Bromide Laser // Proc. SPIE. 2001. V. 4184. P. 203–206.
6. Vuchkov N.K., Sabotinov N.V., Astadjov D.N. High-efficiency CuBr Laser with Interacting Peaking Circuits // Opt. and Quantum. Electron. 1988. V. 20. P. 433–438.
7. Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Работа лазера на парах меди в режиме пониженного энерговыделения в разряд // Изв. ТПУ. 2005. Т. 308. № 6. С. 66–69.
8. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. CuBr-лазер с пониженным энерговыделением в разряд // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 5. С. 406–408.
9. Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Павленко В.С. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов // Квант. электрон. 1978. Т. 5. № 2. С. 452–454.
10. Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Павленко В.С. Лазер на парах CuCl. Процессы, лимитирующие мощность генерации // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 12. С. 2579–2588.

11. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 7. С. 625–629.
12. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: Патент РФ на полезную модель № 62742. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И. // Оpubл. БИПМ. № 12. 27.04.2007. Приоритет от 30.09.2005.
13. Little C.E. Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK. 1998. 620 p.
14. Иванов Е.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю. Магнитотранзисторный генератор для питания лазера на парах меди // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 1. С. 88–90.
15. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. М.: Сов. радио, 1968. 476 с.
16. Юдин Н.А. Влияние параметров коммутатора на эксплуатационные характеристики лазера на парах меди // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 9. С. 815–819.
17. Казарян М.А., Петраш Г.Г., Трофимов А.Н. Сравнительные характеристики лазеров на парах меди, хлорида и бромида меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 3. С. 583–591.
18. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971. 552 с.
19. Ферцигер Дж., Канер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 554 с.
20. Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Киконова. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

F.A. Gubarev, V.B. Sukhanov, D.V. Shiyarov, G.S. Evtushenko. Investigation of energy characteristics of CuBr + HBr laser with decreased energy contribution into a charge.

Results on energy characteristics of the CuBr+HBr lasers of large active volume with external heating of the active zone by a gas-discharge tube when operating with different excitation schemes are presented. It is shown that application of the external heating in traditional schemes does not affect significantly on the laser output parameters. At the same time, a merit of such laser construction is a possibility of maintaining the required temperature regime in the active medium independently of the pumping character, which allows the generation in gas-discharge tubes of large volume at a low pumping power, as well as realization of the train mode of operation for CuBr+HBr laser. Based on experiments with trains, it is shown that escape of Cu from a charge in the interpulse period is connected with reconversion of CuBr. The constant of the CuBr reconversion rate in the charge afterglow is determined, which equals to $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$.