

О.С. Андриенко<sup>1</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1,2</sup>, О.В. Жданеев<sup>1,2</sup>, В.Б. Суханов<sup>1</sup>,  
Д.В. Шиянов<sup>1</sup>

## Влияние добавок HBr в активную среду лазеров на парах меди и галогенида меди

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

<sup>2</sup> *Томский политехнический университет*

Поступила в редакцию 9.01.2004 г.

Проведены исследования выходных параметров лазерных систем CuBr(Cu)+HBr, которые показывают, что введение добавки HBr в активную среду CuBr-лазера приводит к увеличению мощности излучения и кд, сравнимому с увеличением, полученным в CuBr-лазере с добавками H<sub>2</sub>. Установлено, что в газоразрядных трубках (ГРТ) диаметром менее 2 см происходит дополнительное образование паров рабочего вещества за счет срыва со стенок ГРТ атомов меди бромводородом.

Результаты моделирования кинетики активной среды лазера на парах меди с добавками HBr показывают, что для объяснения улучшения характеристик необходимо привлекать процессы химического перевода меди из твердой фазы в газовую.

### Введение

В настоящее время основное внимание в исследовании лазеров на парах металлов приковано к лазерам, активная среда которых модифицирована посредством использования различных галогено-содержащих соединений рабочего металла с последующим добавлением водорода в активную среду либо активных примесей [1, 2]. Указанная модификация позволяет повысить как энергетические, частотные характеристики, так и качество пучка этих лазеров. Этот факт определяет их интенсивное применение в современных системах высокоскоростной записи оптической информации, микрообработки материалов, зондирования параметров атмосферы, лазерного разделения изотопов и т.д. [2–4].

Поскольку из всех лазеров на парах металлов медный лазер является самым эффективным источником излучения в видимой области спектра, то на данный момент наиболее распространенными типами активных сред с модифицированной кинетикой являются:

1. Лазеры на парах меди с добавками водорода.
2. Лазеры на парах бромида (хлорида) меди с добавками водорода.
3. Лазеры на парах меди с добавками галогеноводородов (HBr, HCl).
4. Гибридные лазеры на парах меди (HvBrID, HvClID).
5. Лазеры на парах меди с другими добавками (Cs, Zn, Sc, Ni, Ag и т.д.).

Первое сообщение о повышении энергетических характеристик и увеличении диапазона оптимальных частот лазера на парах меди при использовании добавки молекулярного водорода появилось еще в 1980 г. [5]. А совсем недавно сообщалось о начале промышленного освоения на ГПП

«Исток» отпаянных активных элементов «Kristall LT-30, -40, -50, -70Cu» с введенной примесью водорода, что позволило повысить среднюю мощность излучения в 1,5 раза [6]. Добавка водорода в активную среду лазеров на парах галогенидов меди привела не только к двукратному увеличению мощности генерации, но и значительному увеличению эффективности [7]. Максимальный практический кд этого класса лазеров составляет 3% [8].

Использование идеи введения водорода в активную среду лазеров на солях металлов было развито в гибридных лазерах, в которых молекулы галогеноводорода, прокачиваясь через рабочую зону ЛПМ, взаимодействуют с металлической медью и образуют молекулы CuBr с их последующей диссоциацией [9]. Это дает возможность, как и в CuBr-лазере, работать при температурах стенки ГТР в три раза меньше, чем в лазере на парах чистой меди. Именно с такой разновидностью ЛПМ была достигнута максимальная мощность излучения с одного активного элемента более 200 Вт, кд более 3% [10] и получена наивысшая удельная средняя мощность генерации 2 Вт/см<sup>3</sup> [11].

Поскольку на тот момент существовало предположение о том, что положительные изменения обусловлены присутствием молекул галогенов, то в [12] было проведено сравнение характеристик лазеров на парах чистой меди с добавками H<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>, HBr и HBr + H<sub>2</sub>. Было показано, что добавки бромводорода позволяют увеличить мощность генерации более чем в два раза. Это привело к созданию нового вида ЛПМ с улучшенной кинетикой, в которых одновременная прокачка HCl + H<sub>2</sub> позволила почти в три раза повысить мощность генерации по сравнению с мощностью ЛПМ такого же размера без примесей [13].

К сожалению, остается много вопросов, касающихся причин увеличения энергетических и частотных характеристик этих трех разновидностей ЛПМ. Но суть основной гипотезы сводится к наличию в активной среде молекул галогеноводорода, имеющих большое сечение диссоциативного прилипания, что способствует снижению предимпульсной концентрации электронов.

Использование других добавок в качестве активных примесей (Ag, Cs, Sc, Ni, Zn и т.д.) [14–16] пока имеет лишь научный интерес, так как добавки  $H_2$  более эффективно влияют на параметры лазеров.

Несмотря на то что наивысшие генерационные характеристики получены с гибридными лазерами и с лазерами с улучшенной кинетикой, эти системы являются проклятыми и их практическое применение ограничено. А использование смеси  $Ne + H_2$  в отпаянных Cu- и CuBr-лазерах эффективно лишь в течение некоторого времени, так как в дальнейшем водород внутри ГРТ вступает в химические реакции и его концентрация уменьшается.

В последнее время появилась возможность использования в отпаянных лазерных трубках селективных реверсивных генераторов водорода типа СРНВ, выпускаемых на предприятии «Импульсные технологии» г. Рязань [17].

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния добавки галогеноводорода (HBr) на энергетические характеристики лазеров на парах меди (Cu, CuBr), в анализе полученных нами результатов теоретического исследования влияния HBr на характеристики лазера на парах чистой меди и экспериментальных результатов, впервые полученных при исследовании отпаянной системы CuBr + HBr с использованием специально разработанного генератора HBr.

## Техника эксперимента

Исследования энергетических характеристик CuBr-лазеров с добавками HBr проводились с газоразрядными трубками, масштабируемыми по длине и диаметру активной зоны. Кроме того, использовались два варианта конструктивного исполнения этих ГРТ, отличающихся по способу подачи паров рабочего вещества в активную зону: с независимым подогревом контейнеров с CuBr [18] и саморазо-

гревной вариант [19]. Параметры этих ГРТ приведены в таблице.

ГРТ имели встроенный реверсивный генератор HBr, функциональное назначение которого заключалось не только в подаче HBr в активную среду лазера, но и откачке его обратно в генератор. Концентрация HBr регулировалась в широких пределах температурой нагревателя, а оптимум добавки определялся по максимуму мощности излучения. При постоянной температуре нагревателя концентрация HBr устанавливается на определенном уровне.

Возбуждение ГРТ осуществлялось по традиционной схеме прямого разряда рабочей емкости типа КВИ-3 на ГРТ с помощью коммутатора [18]. При накачке ГРТ № 1–4 с коммутируемыми мощностями до 3 кВт использовался тиратрон ТГИ1-1000/25 с водяным охлаждением. При коммутировании мощностей более 3 кВт для ГРТ № 5 накачка осуществлялась по схеме поочередного запуска двух тиратронов ТГИ1-1000/25 также с водяным охлаждением. С целью повышения напряжения на трубках с большим межэлектродным расстоянием (ГРТ № 4, 5) в схему поочередного запуска включался импульсный кабельный трансформатор, как в работе [20]. Трансформатор намотан на 10 ферритовых кольцах  $100 \times 60 \times 15$ . Его обмотка выполнена кабелем с фторопластовой изоляцией ПВТФЭ, число витков 3.

Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации производилась с помощью пояса Роговского, малоиндуктивного делителя на резисторах типа ТВО и коаксиального фотоэлемента ФК-22 соответственно. Импульсы выводились на осциллограф Tektronix TDS-3032. Мощность излучения контролировалась измерителем мощности ИМО-2, а температура стенки ГРТ – хромель-алюмелевой термопарой.

Первые измерения энергетических характеристик исследуемых трубок проводились следующим образом. ГРТ выводилась на стационарный режим работы без добавок HBr, и фиксировалась мощность генерации (значения приведены в таблице). Затем включался нагреватель генератора HBr и осуществлялась подача HBr в ГРТ, об оптимуме концентрации которого на начальной стадии подачи судили визуально по диаметру шнура разряда.

Габаритные и энергетические параметры исследуемых ГРТ

№ ГРТ	Диаметр, см	Длина, см	Мощность накачки, Вт	Мощность излучения, Вт		
				без $H_2$ и HBr	с $H_2$	с HBr
1	1,1	16	400–500	0,15	0,8	0,8
2	1,6	36	800	0,5	2,5	2,5
3	2,6	76	1400–1500	5	10	10,5
4	3,6	120	2500–3000	13	25 (36)	26 (38)
5	5,3	145	4000–5000	22	41 (55)	~40 (55)

Примечание. В скобках приведены значения мощности излучения, полученные по схеме с импульсным кабельным трансформатором. Давление буферного газа  $Ne$  15–30 торр, частота следования импульсов 17–22 кГц для всех ГРТ. ГРТ № 1, 2 – с независимым подогревом контейнеров, ГРТ № 3–5 – саморазогревная конструкция.

## Результаты и обсуждение

Эксперименты показали, что выходы лазера на стационарный режим с ГРТ малых (менее 2 см) и больших (более 2 см) диаметров сильно отличаются. Постепенная подача HBr в разряд ГРТ № 1, 2 (при мощностях излучения в стационарном режиме в чистом Ne 0,15 и 0,5 Вт соответственно) приводила сначала к увеличению выходных параметров, а затем к их снижению из-за переизбытка паров рабочего вещества. Об этом можно было судить визуально по выносу рабочего вещества в приэлектродные и торцевые зоны. Дальнейшая подача HBr приводила к срыву разряда, поэтому возникала необходимость снижения температуры нагревателей контейнеров с CuBr. Только после этого мощность излучения достигала максимума — 0,8 и 2,5 Вт. Так, например, чтобы достичь максимума с ГРТ № 2 (2,5 Вт), выходная мощность устанавливалась на 0,3 Вт подбором температуры печей контейнеров с CuBr и затем осуществлялась подача HBr.

Испытания ГРТ № 3–5 показали, что поведение генерации не имеет тенденций, свойственных предыдущим трубкам. Подача HBr без изменения слоя теплоизоляции на контейнерах с CuBr приводила к постепенному увеличению мощности с 5, 13, 22 до 10,5, 26 и 40 Вт соответственно. Использование импульсного кабельного трансформатора позволило дополнительно повысить мощность генерации в ГРТ № 4, 5 до 38 и 55 Вт.

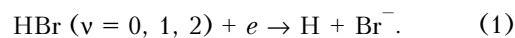
Для анализа механизмов влияния примеси бромводорода на генерационные характеристики лазера на парах меди была разработана подробная нестационарная кинетическая модель активной среды Cu–Ne–H<sub>2</sub>–HBr (Cu–Ne–H<sub>2</sub>–Br<sub>2</sub>). Модель позволяет вычислять и проводить исследование изменений значений населенностей уровней атомов меди, неона и брома, плотности ионов этих элементов, температуры электронов и интенсивности лазерного излучения на двух длинах волн ( $\lambda = 510,6; 578,2$  нм). Подробное описание модели приведено в работе [21]. В модели учитывались основное и два первых колебательных состояния молекулы бромводорода, основное состояние молекулы брома. Для атомарного брома в модели учтены основное, первое возбужденное состояния и основные состояния отрицательных и положительных ионов. Также рассматривалось основное состояние молекулы CuBr. Всего в модели учитывалось около 240 кинетических реакций.

Очевидно, что проводить прямую аналогию результатов моделирования лазера на парах меди с добавками бромводорода с экспериментальными данными, полученными для лазера на парах бромида меди (с такими же добавками), нельзя. Вместе с тем, как мы знаем, между гибридными лазерами, лазерами с улучшенной кинетикой и лазерами на парах бромида меди имеется много общего. Так, лазер на парах меди с добавками HBr отличается от гибридного только тем, что отсутствует прокачка рабочей смеси, а в лазере с улучшенной кинетикой рабочие

температуры практически соответствуют обычному высокотемпературному лазеру на парах меди.

При исследовании кинетики активной среды лазера на парах меди с добавками бромводорода было показано [21], что даже использование завышенной константы восстановления молекулы HBr не обеспечивает высокую равновесную концентрацию бромводорода. Несмотря на это введение бромводорода существенно модифицирует кинетику активной среды лазера. Основное влияние на работу лазера оказывают два процесса: изменение концентрации атомов меди и изменение концентрации электронов.

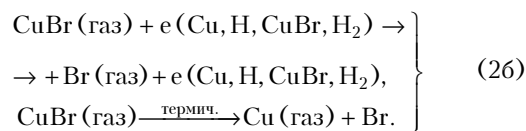
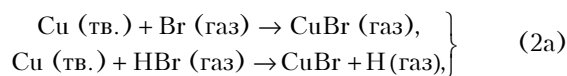
Введение добавки бромводорода приводит к значительному уменьшению предимпульсной концентрации электронов в течение межимпульсного периода в процессах:



Увеличение концентрации атомов меди в активной среде при введении добавки бромводорода происходит за счет двух параллельных процессов:

1) увеличения температуры газоразрядной трубки вследствие уменьшения концентрации электронов при добавлении бромводорода в активный элемент лазера;

2) появления дополнительных атомов меди за счет перевода меди из твердого состояния в газообразное:



К сожалению, в литературе отсутствуют какие-либо сведения о механизмах процессов взаимодействия металлической меди с молекулами галогеноводородов, их сечениях и скоростях для типичных экспериментальных условий. Тем не менее мы можем использовать полученные нами экспериментальные данные по увеличению концентрации атомов меди при введении добавки бромводорода в активную среду лазера на парах бромида меди. Появление избыточной концентрации атомов рабочего вещества в разрядной зоне ГРТ № 1, 2 мы связываем именно с протеканием процессов типа (2a): помимо того что пары CuBr поступают в разряд из контейнеров, атомы Br и молекулы HBr дополнительно срывают атомы меди со стенок ГРТ, появившихся там вследствие металлизации трубки. Однако отметим, что в ГРТ больших диаметров № 3–5 не было замечено этого явления. Мы полагаем, что в ГРТ большого диаметра указанные в (2a) процессы оказываются менее эффективными. Так, вводимая энергия в единицу объема в трубках большого диаметра существенно меньше, и, как следст-

вие, диссоциация молекул HBr ниже, соответственно ниже и концентрация активного брома. И основной процесс дополнительной наработки бромида меди  $[\text{Cu}(\text{тв.}) + \text{Br}(\text{газ}) - \text{CuBr}(\text{газ})]$  становится пренебрежимо малым. Кроме того, с переходом к большим диаметрам ГРТ увеличивается длина диффузии молекулы HBr к стенке ГРТ, где протекают реакции типа (2а,б), а также наблюдается значительная радиальная неоднородность температуры газа [22]. В этих условиях, по-видимому, основную роль в улучшении генерационных характеристик лазера играет процесс диссоциативного прилипания электронов к молекуле HBr.

Помимо этих процессов, при добавлении бромоводорода в активную среду происходят [21] уменьшение степени истощения населенности основного состояния атома меди и изменение электрических характеристик разряда.

Введение добавки HBr приводит к уменьшению как предимпульсной концентрации электронов, так и их максимальной концентрации в течение импульса возбуждения (рис. 1), а также обуславливает некоторое увеличение максимальной температуры электронов и некоторое замедление ее спада в течение первого этапа послесвечения (первые 20 мкс) (рис. 2). Добавление HBr, как и в случае добавления хлороводорода, связано с уменьшением, по сравнению с добавкой водорода, влияния упругих кулоновских столкновений в послесвечении из-за уменьшения концентрации положительных ионов в плазме вследствие протекания реакций ионной рекомбинации с участием отрицательного иона брома. Тем не менее существенного уменьшения предимпульсной температуры электронов при добавлении бромоводорода в активную среду не происходит.

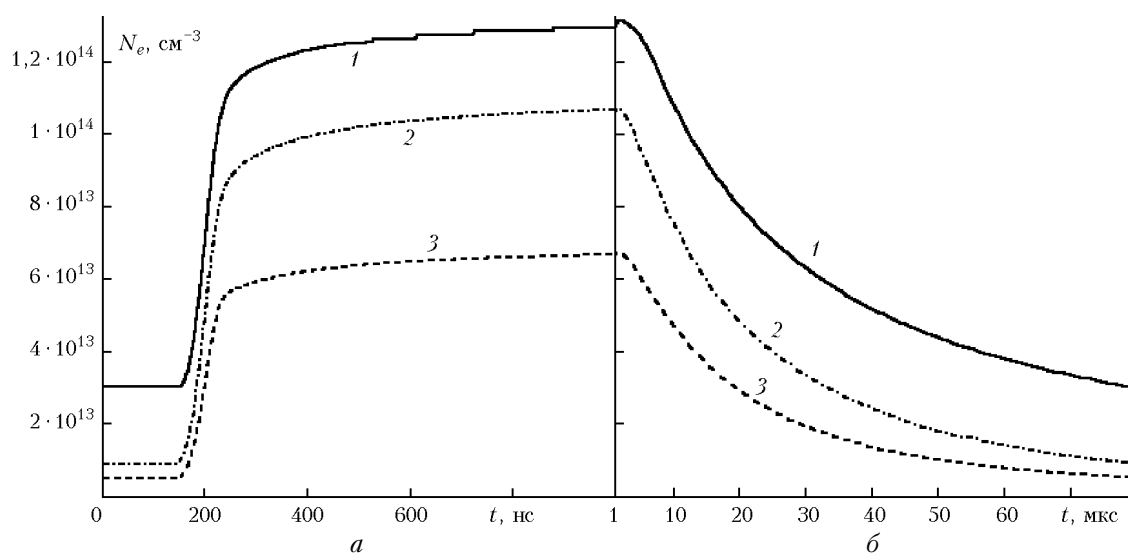


Рис. 1. Временные зависимости концентрации электронов в течение импульса накачки (а) и межимпульсного периода (б): кривая 1 —  $N_{\text{HBr}} = 0\%$ ,  $N_{\text{Cu}} = 0,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_{\text{max}} = 840 \text{ А}$ ; кривая 2 —  $N_{\text{HBr}} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Cu}} = 0,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_{\text{max}} = 840 \text{ А}$ ; кривая 3 —  $N_{\text{HBr}} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Cu}} = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_{\text{max}} = 610 \text{ А}$

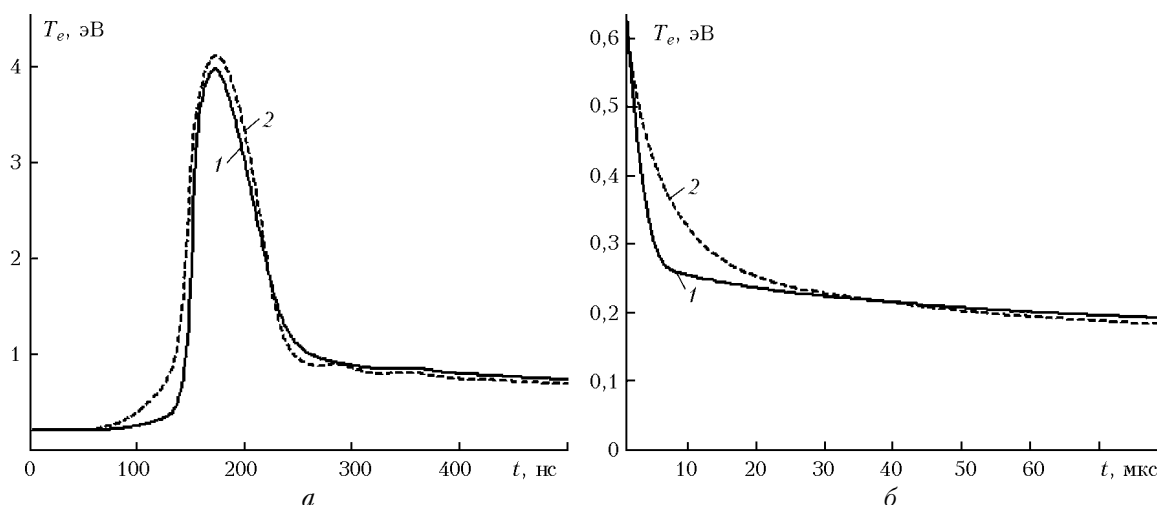


Рис. 2. Временные зависимости температуры электронов в течение импульса накачки (а) и межимпульсного периода (б): кривая 1 —  $N_{\text{HBr}} = 0\%$ ,  $N_{\text{Cu}} = 0,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_{\text{max}} = 840 \text{ А}$ ; кривая 2 —  $N_{\text{HBr}} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Cu}} = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $I_{\text{max}} = 610 \text{ А}$

Так же как и в случае введения хлороводорода, введение бромводорода сопровождается увеличением степени диссоциации молекулярного водорода, что приводит к уменьшению концентрации колебательно-возбужденных молекул водорода и к увеличению проводимости плазмы активного разряда. Изменения временной зависимости (в основном в период позднего послесвечения) температуры электронов и степени релаксации населенности метастабильных уровней атома меди связаны, по-видимому, именно с перечисленными выше факторами влияния добавок бромводорода на молекулярный водород.

В течение первого этапа периода послесвечения (с 1 до 20 мкс) наблюдается замедление релаксации концентрации атомов меди в метастабильных состояниях. Это связано с уменьшением количества тушащих столкновений электронов с атомами меди в метастабильных состояниях вследствие уменьшения концентрации электронов. При этом значимого уменьшения предимпульсных концентраций атомов меди в метастабильных состояниях не происходит.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты позволяют судить о том, что добавки НВг в активную среду Си- и СиВг-лазеров эффективно

увеличивают выходные энергетические и частотные параметры до уровня, сравнимого с параметрами Си-, СиВг-лазеров с добавками  $H_2$ . Ранее нами были проведены измерения выходных характеристик данных ГРТ с добавками  $H_2$  в отпаянном и неотпаянном вариантах. В случае неотпаянной ГРТ  $H_2$  закачивался в трубку через магистраль из баллона. В отпаянном режиме работала ГРТ № 4, к которой припаивался генератор водорода типа СРНВ1. Сравнение мощностей излучения и кпд этих лазеров показывает их практически полную идентичность. На рис. 3 приведены импульсы тока, напряжения и генерации для ГРТ № 3 в чистом Ne с добавками  $H_2$  и НВг при одинаковых условиях возбуждения и одинаковой температуре стенки ГРТ.

Сравнение работы исследуемых ГРТ с использованием генераторов  $H_2$  и НВг позволяет заключить, что генератор НВг лишен недостатка водородного генератора при использовании его в СиВг-лазере, связанного с отсутствием процесса обратного ухода  $H_2$  в генератор в случае его избыточной концентрации в разряде. На рис. 4 показана эволюция импульсов тока ( $1'-3'$ ) и напряжения ( $1-3$ ), зафиксированных через определенные моменты времени, во время ухода НВг из разряда.

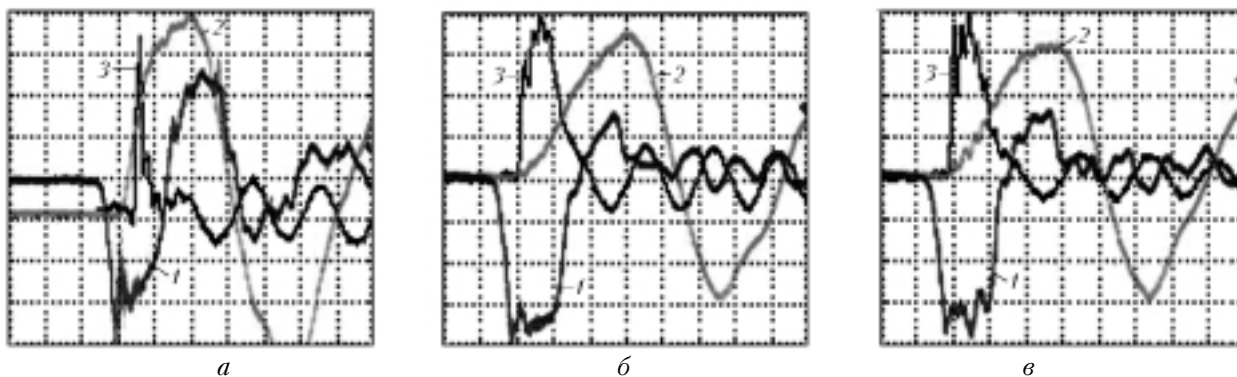


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и генерации (3) для ГРТ № 3: а – в чистом Ne; б – с добавкой  $H_2$ ; в – с добавкой НВг при емкости рабочего конденсатора 825 пФ, частоте следования импульсов накачки 17,2 кГц, давлении буферного газа Ne либо Ne+HBr (Ne+ $H_2$ ) 20 торр. Напряжение и ток источника питания: а – 6,2 кВ и 0,22 А; б, в – 6,2 кВ и 0,21 А. Мощность генерации при этих условиях равнялась: а – 5 Вт, б – 10 Вт и в – 10,5 Вт

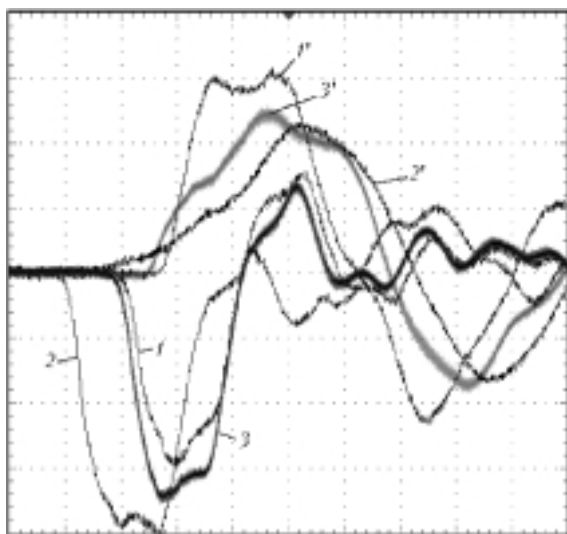


Рис. 4. Эволюция импульсов тока  $1'-3'$  и напряжения  $1-3$  в процессе ухода НВг из разряда ГРТ № 3 в генератор НВг:  $1'$ , 1 – импульсы, соответствующие работе лазера в чистом Ne без примесей;  $2'$ , 2 – с концентрацией добавленного НВг выше оптимальной;  $3'$ , 3 – через 20 мин после отключения нагревателя генератора НВг

Из рис. 4 видно, что форма импульсов возвращается к первоначальному виду  $1'$ , 1, соответствующему работе ГРТ в чистом Ne без примесей. Скорость ухода НВг из разряда обратно в генератор зависит от его концентрации в генераторе.

Стоит отметить, что генератор НВг может в дальнейшем использоваться для обезгаживания ГРТ от атмосферных газов и продуктов наработки, которые негативно влияют на генерационные свойства

лазера. Например, в CuBr-лазерах по мере наработки ГРТ происходит накопление свободного брома. Результаты экспериментов [12, 23], наряду с численными расчетами [21], свидетельствуют о негативном влиянии добавок брома на характеристики лазера на парах меди. Так, при введении атомарного брома в концентрации  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  согласно расчетам происходит уменьшение средней мощности приблизительно на 10%. Отметим, что согласно результатам [21] практически весь введенный бром находится в атомарном состоянии (при добавлении добавки молекулярного брома в концентрации  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  предимпульсная концентрация молекулярного брома согласно расчетам составляла всего  $4,57 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ). Возможно, что выбор условий работы генератора бромводорода поможет снизить концентрацию брома в разряде.

### Срок службы активного элемента

Первые результаты по использованию CuBr–HBr-лазеров показывают, что им присущи особенности, характерные для HуBrID-лазеров. В частности, возникает проблема появления дендритов в канале ГРТ с малыми диаметрами после нескольких десятков часов работы [9], которые ограничивают апертуру активной зоны. Для устранения этого явления авторы [9] предлагают контролировать концентрацию водорода и температуру трубки, тщательно подобрав теплоизоляцию, чтобы избежать локальных перегревов. В нашем случае мы проводили профилактическую работу. В ГРТ закигался разряд в чистом Ne без паров рабочего вещества, причем потребляемая мощность немного превышала мощность, требующуюся для стационарной работы. После прогрева ГРТ в таком режиме в течение некоторого времени происходило удаление дендритов в холодные зоны (ловушки).

### Заключение

В работе проведены исследования выходных параметров лазерных систем CuBr(Cu) + HBr. Эксперименты с пятью ГРТ различных габаритов показали, что введение добавки HBr в активную среду CuBr-лазера приводит к увеличению мощности излучения и КПД (до двух раз), сравнимому с увеличением, полученным с данными ГРТ в CuBr + H<sub>2</sub>-лазере. Анализ электрических характеристик (амплитуда, длительность импульсов накачки) при одинаковых условиях возбуждения CuBr + HBr- и CuBr + H<sub>2</sub>-лазеров также показал их полную идентичность.

Наряду с этим было обнаружено, что получение паров рабочего вещества в активной зоне CuBr + HBr-лазера с диаметром ГРТ менее 2 см происходит не только за счет нагрева порошка CuBr, но и за счет срыва со стенок ГРТ атомов меди бромводородом (бромом) в реакциях типа (2), что напоминает принцип действия HуBrID-лазера. Схожесть с гибридным лазером также проявляется в отложениях дендритов в канале ГРТ. В ГРТ с диа-

метром более 2 см увеличение концентрации паров рабочего вещества за счет этого эффекта не наблюдалось. Вероятнее всего, из-за того, что вследствие большой длины диффузии молекулы HBr к стенке процесс (2) оказывается неэффективным, а улучшение обеспечивает процесс диссоциативного прилипания электронов к молекулам HBr.

В статье также приведены результаты моделирования кинетики активной среды лазера на парах меди с добавками HBr и Br<sub>2</sub>. Результаты расчетов подтверждают экспериментально наблюдаемое нами снижение средней мощности генерации при накоплении в активной среде примеси брома.

Для объяснения улучшения генерационных характеристик лазеров на парах меди и бромида меди при добавлении бромводорода необходимо привлечь дополнительные механизмы, например процессы (2а,б) химического перевода меди из твердой фазы в газовую. Это подтверждает выводы работы [21].

Апробирование генератора HBr показало, что концентрация добавки HBr в лазере может контролироваться в широких пределах. Данный генератор отличается от известных генераторов H<sub>2</sub> при использовании их в CuBr-лазерах свойством реверсивности. Избыток концентрации HBr, приводящий к снижению мощности излучения, легко устраняется отключением нагревателя генератора.

Работа выполнена при поддержке грантов КЦФЭ № А03-2.9-638 и Томского политехнического университета.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.Э. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
2. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
3. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
4. Little C.E., Sabotinov N.V. (Eds.) Pulsed Metal Vapor Lasers. New York: Kluwer Academic Publishers, 1996. V. 5. 479 p.
5. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 6. С. 1264–1269.
6. Kazaryan M.A., Kolokolov I.S., Lyabin N.A., Paramonov V.S., Prokhorov A.M., Ugolnikov S.A., Chursin A.D. The influence of hydrogen efficiency of a copper vapor laser with sealed-off active elements // Laser Phys. 2002. V. 12. № 10. P. 1281–1285.
7. Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency // Opt. Commun. 1985. V. 56. № 4. P. 279–282.
8. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper Bromide Laser of 120-W Average Output Power // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33. № 5. P. 705–709.
9. Jones D.R., Little C.E. Kinetics of copper HуBrID lasers // Proc. SPIE. 1995. V. 2619. P. 52–67.
10. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A high efficiency 200W average power copper HуBrID laser // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. № 10. P. 2385–2390.

11. Sabotinov N.V., Akerboom F., Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A copper HyBrID laser with 2 W/cm<sup>3</sup> specific average output power // IEEE J. Quantum Electron. 1995. V. 31. № 4. P. 747–753.
12. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. Investigation of the effects of bromine and hydrogen bromide additives on copper vapor laser performance // Opt. Commun. 1997. V. 135. P. 164–170.
13. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. Enhanced performance of elemental copper-vapor lasers by use of H<sub>2</sub>–HCl–Ne buffer-gas mixtures // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 9. P. 706–708.
14. Ohzu A., Kato M., Maruyama Y. Influence of Cs and Ag metal vapor on output characteristics of a HyBrID copper vapor laser // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 23. P. 2979–2981.
15. Kimura H., Chinen M., Nayuki T. Improvement of the lasing performance of copper vapor laser by Sc atoms as energy donors // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 71. № 3. P. 312–314.
16. Fujii K., Uno K., Tawada F., Hishida T., Nishizawa M., Suzuki M., Oouchi K. Pulse broadening in a Ne-CuBr–Zn laser system by optical resonance pumping // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. № 11. P. 1859–1861.
17. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М., Климовский И.И. Излучатели лазеров на парах металлов, снабженные генератором водорода с большим сроком службы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1027–1029.
18. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой повторения импульсов до 300 кГц // Квант. электрон. 1999. Т. 28. № 3. С. 220–222.
19. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Саморазогреваемый CuBr-лазер // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 1053–1055.
20. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Оптика атмосф. и океана. 1989. Т. 2. № 11. С. 1228–1229.
21. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdanev O.V. Analysis of influence of hydrogenate bromide admixtures on copper vapor laser performance // Laser Phys. 2004. V. 14. (в печати).
22. Kusner M.G., Warner B.E. Large-bore copper vapor lasers: Kinetics and scaling issues // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 6. P. 2970–2982.
23. Астаджов Д.Н., Вучков Н.К., Петраш Г.Г., Саботинов Н.В. Лазеры на парах металлов и их галогенидов // Тр. ФИАН. 1987. Т. 181. С. 122–163.

**O.S. Andrienko, G.S. Evtushenko, O.V. Zhdanev, V.B. Sukhanov, D.V. Shiyanov. Effect of HBr additives to copper vapor and copper halide lasers.**

The investigation of the output parameters of CuBr(Cu)+HBr laser systems shows that HBr additives in the CuBr laser active medium result in the increase of the laser output power and efficiency comparable with that for the CuBr laser with H<sub>2</sub> additives. It is found that an additional generation of working substance vapor takes place in the gas-discharge tubes (GDT) less than 2 cm in diameter due to expulsion of copper atoms from the GDT walls by HBr. Results of modeling of the kinetics of the copper vapor laser's active medium with HBr additives show that the improvement of the laser generation characteristics can be explained through the processes of chemical transformation of copper from the solid phase to the gaseous one.