

О влиянии добавки HBr на характеристики излучения лазера на парах CuBr

А.Г. Филонов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 20.01.2010 г.

Проведен анализ экспериментальных результатов, полученных при исследовании влияния добавки HBr на мощность генерации лазера на парах бромида меди. Показано, что положительный эффект добавки носит пороговый характер: увеличение мощности генерации происходит только после превышения определенного уровня вводимой в разряд мощности. Рассмотрены физические причины снижения мощности генерации в присутствии добавки HBr при работе лазера в режиме «пониженного» энерговыклада. Приведены результаты исследования поведения порога в зависимости от концентрации добавки. Показано, что существует оптимальная концентрация HBr, при которой КПД работы лазера максимален.

Ключевые слова: лазер, бромид меди, бромоводород; laser, copper bromide, bromine hydrogen.

Введение

Задачи лазерного зондирования атмосферы обуславливают определенный интерес к работе лазера на парах бромида меди с добавкой HBr в связи с получением повышенных средних мощностей генерации [1]. Действительно, в так называемых «гибридных» лазерах получено 200 Вт с одного активного элемента. Механизм влияния HBr, подробно рассмотренный в работах [2, 3], заключается в явлении диссоциативного «прилипания» электронов низких энергий к молекуле добавки и резком снижении концентрации свободных электронов в активной среде за межимпульсный промежуток, в частности в заметном снижении их концентрации к приходу импульса возбуждения. При этом происходит, во-первых, снижение заселения метастабильных уровней атома меди, во-вторых, за счет замедления развития разряда в начальный момент, выражающегося в сдвиге импульса напряжения и импульса тока относительно друг друга [4], создается возможность приложить более высокое напряжение к рабочему объему. Как первый, так и второй факторы создают возможность получения более высокого уровня инверсии населенностей и, как следствие, приводят к увеличению мощности генерации.

В работах [4, 5] подробно исследуются условия наиболее эффективного увеличения мощности генерации CuBr-лазера с использованием добавки HBr. Сообщается, что разработанный реверсивный генератор HBr [6] позволяет оперативно обеспечить необходимую концентрацию добавки в отпаянной лазерной трубке с возможностью ее регулировки при каждом включении. Таким образом, сочетается высокая выходная мощность генерации со стабильной

и долговременной работой лазера, что является существенно важным в его эксплуатационных характеристиках.

Практически во всех работах говорится о положительном влиянии добавки HBr, т.е. ввод в активную среду небольшого количества бромоводорода приводит к увеличению мощности генерации. В работе [7] указывается на то, что присутствие HBr формирует дополнительный канал потерь потребляемой энергии, затрачиваемой на возбуждение молекул добавки. Соответственно происходит некоторое снижение мощности, идущей на возбуждение активной среды. Не затрагивая процессов, проходящих в самой активной среде, этот эффект приводит в определенных условиях к снижению мощности генерации в случае его превышения над положительным влиянием. Сама же активная среда и в этом случае испытывает только положительное влияние добавки. Однако это не всегда так. Для более полного понимания физических процессов, проходящих в активной среде при введении добавки HBr, рассмотрим это влияние более подробно.

Экспериментальная установка

Важной особенностью экспериментальной установки является использование лазера на парах CuBr, в котором осуществляется внешний нагрев активного объема. Дело в том, что, как правило, лазеры на парах металлов и их солей работают в режиме самонагрева. При этом для поддержания температурного режима используется теплоизолятор определенной эффективности. Его эффективность задается необходимостью поддержания рабочей температуры стенки разрядного канала при определенной вводимой в разряд мощности, в частности для лазера на парах CuBr она составляет 600–800 °С [8].

* Александр Григорьевич Филонов (qel@asd.iao.ru).

Так как мощность генерации однозначно связана с мощностью, потребляемой активным элементом, то для получения заданного ее значения с необходимостью в разряд вводится вполне определенная, а часто и просто максимально возможная мощность источника питания. Соответственно теплоизолятор должен обеспечивать рабочий температурный режим в этих вполне однозначных условиях. И, как следствие, при уменьшении вводимой мощности активная среда автоматически выходит из рабочего диапазона температуры, т.е. остывает. Условно можно сказать, что лазер такой конструкции не работает в условиях «пониженного энерговыклада» [5], что делает практически невозможным исследование его в этом режиме.

Использование внешнего не зависящего от разряда нагревателя, автоматически поддерживающего рабочую температуру стенки разрядного канала в рабочем диапазоне, существенно расширяет диапазон вводимой в разряд мощности, при которой идет генерация. На практике генерация в таком приборе начинается с напряжения, достаточного для пробоя разрядного промежутка. Ранее в [8] отмечено, что успешная работа лазера такой конструкции происходила в диапазоне от 150 до 1500 Вт потребляемой мощности. Более того, использование внешнего нагрева газоразрядной трубки [5, 9] хотя и не приводит к увеличению мощности генерации, однако позволяет осуществить работу лазера в дуговом и ждущем режимах, что важно для практического использования лазера в технологических установках. И, как следствие, такая конструкция лазера позволила более детально исследовать работу CuVg-лазера.

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из газоразрядной трубки (ГРТ), выполненной из оптически чистого кварца (внутренний диаметр 38 мм, толщина стенки 2 мм). Расстояние между электро-

дами составляло 900 мм. Контейнеры с расположенным в них бромидом меди представляли собой кварцевые отростки от ГРТ и обеспечивали равномерное распределение паров CuVg в рабочем режиме по активному объему. Бромид меди располагался достаточно далеко от разрядного канала, так что температура разрядного канала не влияла на температуру CuVg, что обеспечивало независимую регулировку его давления с помощью нагревателей 6. В лазере использовался реверсивный генератор НВг 9, который позволял устанавливать оптимальное давление НВг с помощью нагревателя 8. Температурная камера (термостат) обеспечивала поддержание необходимой рабочей температуры стенки разрядного канала.

Изменение вводимой в разряд мощности влияет на температуру стенки разрядного канала, но наличие обратной связи с помощью хромель-алюмелевой термопары и блока управления температурой позволяло удерживать ее температурной камерой в рабочем диапазоне. Блок управления температурой также задавал и поддерживал рабочую температуру контейнеров с бромидом меди и генератора НВг. Блок питания обеспечивал необходимое регулируемое напряжение на рабочем конденсаторе C_p , заряд которого осуществлялся через индуктивность L_s . Цуговый и импульсно-периодический режимы задавались источником питания посредством запуска коммутатора Т (тиратрон ТГИ1-1000/25). В качестве резонатора использовались плоскопараллельные глухое алюминиевое зеркало и стеклянная пластинка как выходное зеркало. В качестве буферного газа использовался Ne давлением 50 мм рт.ст. Средняя мощность генерации регистрировалась измерителем мощности ИМО-2, импульсы генерации — фотоприемником ФК-19 с помощью осциллографа Tektronix TDS 3032.

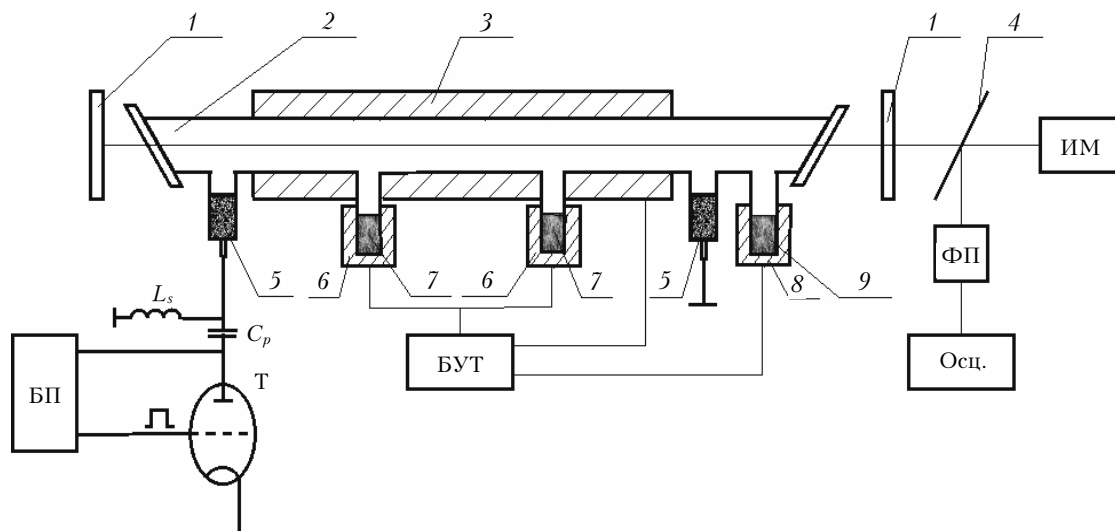


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — резонатор; 2 — газоразрядная трубка; 3 — термостат; 4 — светоделительная пластинка; 5 — электроды; 6 — нагреватели контейнеров с бромидом меди; 7 — контейнер с бромидом меди; 8 — нагреватель генератора НВг; 9 — генератор НВг; C_p — рабочая емкость; L_s — зарядная индуктивность; Т — тиратрон ТГИ1-1000/25; БП — блок питания; БУТ — блок управления температурой; Осц. — осциллограф Tektronix TDS 3032; ФП — фотоприемник ФК-19; ИМО — измеритель мощности ИМО-2

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Зависимость мощности генерации от вводимой в разряд мощности в условиях поддержания рабочей температуры внешним источником на уровне 680°C показана на рис. 2 (вводимая в разряд мощность рассчитывалась по $C_p U^2 f / 2$, где C_p — величина рабочей емкости; U — напряжение на рабочей емкости; $f = 20$ кГц — частота следования импульсов возбуждения). Рабочая емкость во всех экспериментах составляла ~ 450 пФ.

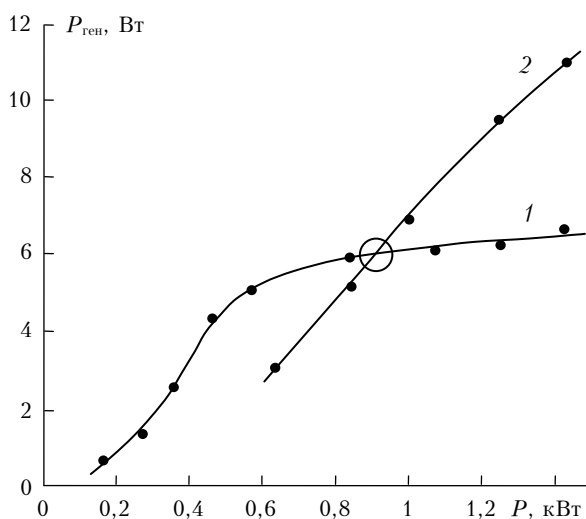


Рис. 2. Поведение мощности генерации в зависимости от вкладываемой в разряд мощности: 1 — без НВг; 2 — с НВг. $f = 20$ кГц

Как видим, *во-первых*, генерация начинается практически с напряжения, достаточного для пробы разрядного промежутка и работа лазера осуществляется в широком диапазоне вводимых мощностей. *Во-вторых*, сравнение поведения мощности генерации CuBr—Ne-лазера в зависимости от вводимой в разряд мощности без (рис. 2, кривая 1) и с НВг (рис. 2, кривая 2) показывает существенное влияние добавки НВг, приводящее к выигрышу мощности генерации. Однако при малых вводимых мощностях картина меняется: введение добавки НВг приводит к относительному снижению мощности генерации, т.е. добавка НВг приводит к выигрышу по мощности генерации только после превышения определенного уровня мощности накачки. Этот уровень соответствует точке пересечения двух кривых. На рис. 2 она обозначена кружком. Причина такого поведения мощности генерации, выявляющегося при работе лазера в режиме «пониженного энерговыклада», требует выяснения.

В работе [10] при исследовании цугового режима работы лазера показано, что скорость восстановления брома меди (соответствующая скорости ухода паров меди из активного объема) существенно возрастает при введении в активный объем добавок НВг.

Рассмотрим поведение амплитуды импульсов генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами в присутствии добавки НВг. При этом работа лазера происходит следующим образом: непрерывная последовательность запускающих импульсов ($f = 20$ кГц) представляется последовательностью цугов из 10 импульсов с изменяющейся между ними паузой от 50 мкс (непрерывный режим) до 1100 мкс. Поведение амплитуды импульсов одного цуга отражено на рис. 3. Естественно, что оно присуще всем цугам.

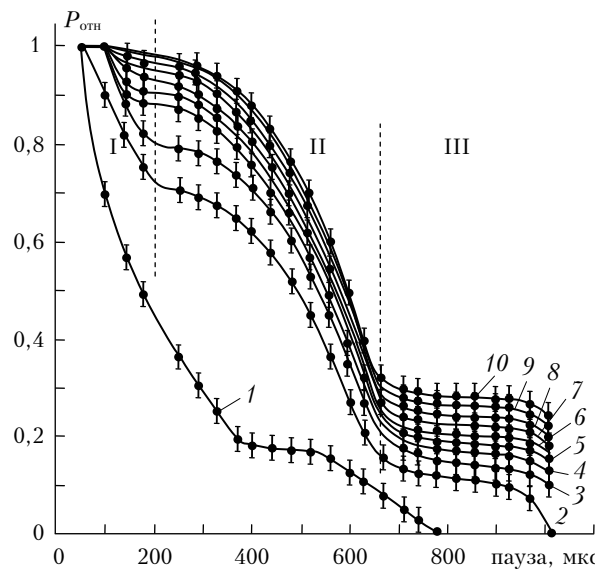


Рис. 3. Поведение амплитуды импульсов генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами в присутствии добавки НВг. Импульсы в цуге расположены через 50 мкс. Энергия в импульсе возбуждения 53 мДж

С ростом паузы наблюдается общее падение амплитуды импульсов генерации, что связывается с уходом паров меди из разрядного объема. Однако это падение не одинаково для разных импульсов и зависит от их положения в цуге. Поведение амплитуды первого импульса связано с общей релаксацией активной среды и повторяет поведение, полученное ранее другими авторами [5]. По ходу этой кривой определяется константа ухода атомов меди из активного объема вследствие восстановления брома меди. И в нашем случае она составляет $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Поведение амплитуды второго и последующих импульсов можно разделить на три области. Первая область — достаточно отчетливо выражена на кривой второго импульса и уменьшается у последующих, является отображением общей релаксации, физический процесс которой выражен поведением амплитуды первого импульса: т.е. кривая 1 и начала последующих кривых связаны с общим уходом паров меди из активной среды в связи с ростом паузы между цугами. Эту область мы обозначили римской цифрой I.

Монотонность убывания амплитуды импульсов нарушена уже на кривой поведения амплитуды второго импульса (кривая 2), на которой хорошо выражено изменение поведения амплитуды импульса

генерации, вызванное прохождением первого импульса. Очевидно, что это явление обусловлено ростом концентрации чистой меди: поскольку первый импульс произвел диссоциацию определенной части паров CuBr, то в активном объеме появились дополнительные пары чистой меди. При этом очевидны процессы накопления, проявляющиеся в поведении амплитуд последующих импульсов генерации: дополнительно образованные пары меди не успевают релаксировать за межимпульсный интервал 50 мкс. Эту область мы обозначили цифрой II.

При этом мы можем сказать, что происходит самоиндикация состояния активной среды: мы видим как падение, так и рост концентрации паров чистой меди в активной среде, хотя и опосредованно, через амплитуду импульса генерации. На этом основании и следуя [11], мы допускаем, что, *во-первых*, за время переднего фронта импульса возбуждения концентрация паров меди не меняется, а *во-вторых*, поскольку генерация осуществляется на переднем фронте импульса возбуждения и за относительно короткое время, то амплитуда импульса генерации отображает состояние концентрации паров меди. То есть как область I, так и область II отображают состояние концентрации паров меди. При этом выделяется область, которую мы обозначили цифрой III. Мы видим процесс с явно выраженным накопительным эффектом. И если за 10 импульсов величина процесса составила порядка ~30% от максимальной амплитуды импульсов генерации, то легко представить состояние среды через 20 тыс. импульсов, что соответствует рабочей частоте следования импульсов возбуждения 20 кГц. Для выяснения процесса, выраженного областью III, рассмотрим поведение амплитуды импульсов генерации в среде CuBr без добавки HBr (рис. 4).

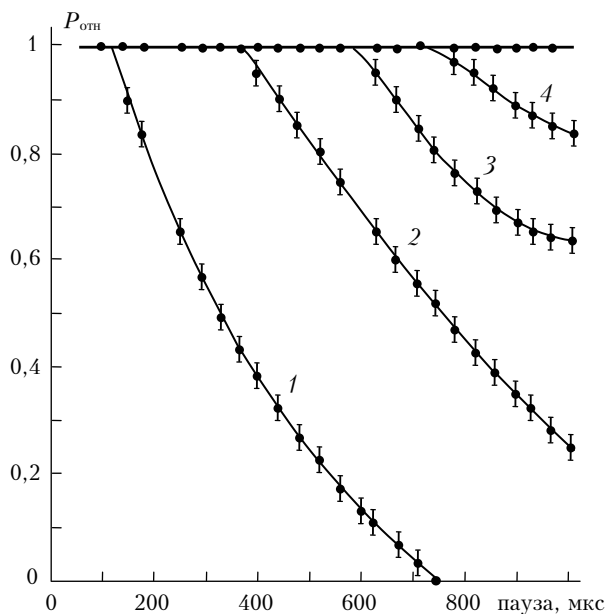


Рис. 4. Поведение амплитуды первых импульсов генерации в цуге из 10 импульсов в зависимости от величины паузы между цугами. Импульсы в цуге расположены через 50 мкс. Энергия в импульсе возбуждения 53 мДж

Как видим, ситуация резко изменилась, идет простое монотонное убывание амплитуд импульсов генерации, причем существенно медленнее. Только при паузе в 1000 мкс начинает уменьшаться амплитуда четвертого импульса. На последующих амплитудах импульсов она вообще не отразилась. Сравнимая рис. 3 и 4, разница в которых — это добавка HBr, можно сказать, что, если исходить из того, что по-прежнему происходит самоиндикация активной среды, при уходе HBr из активной среды резко возрастает концентрация паров чистой меди. И наоборот, что то же самое, добавка в активную среду HBr приводит к резкому увеличению скорости ухода паров чистой меди. Мы предполагаем две причины, по которым это может происходить.

Во-первых, добавка HBr в активную среду приводит к увеличению скорости рекомбинации паров меди в CuBr. Пары меди быстрее уходят из активного объема, и тогда в исследуемом диапазоне становятся видны в активной среде процессы как появления, так и ухода паров меди. *Во-вторых*, в присутствии HBr эффективно идут процессы диссоциативного прилипания медленных электронов и они быстрее уходят из активного объема [3]. Соответственно время их воздействия на активную среду уменьшается. Уменьшается их вклад в диссоциацию молекул CuBr, и тогда в исследуемом диапазоне паузы становятся видны процессы появления и убывания паров чистой меди. В пользу этой версии говорят результаты работы [1, с. 274], в которой отмечается, что для диссоциации паров галогенида меди напряжение диссоциирующего импульса не играет роли, важна только энергия в импульсе диссоциации. Исходя из этого, мы можем предположить, что область III сформирована электронами, оставшимися после прохождения импульса тока, и отображает процесс их ухода из активного объема. При этом вполне естествен в этом процессе накопительный эффект, явно выраженный в области III. В этом случае мы должны сказать, что поведение амплитуды первого импульса цуга в отсутствие HBr отображает поведение концентрации остаточных электронов (см. рис. 4).

Из сравнения поведения амплитуды первых импульсов генерации в цуге из 10 импульсов с ростом паузы (рис. 5) следует, что концентрация паров чистой меди в присутствии HBr убывает существенно быстрее, а если брать ее среднее значение в режиме регулярных импульсов, то она снижается. Как следствие этого процесса, введение добавки HBr приводит к уменьшению средней мощности генерации, что, естественно, является отрицательным фактором.

Уменьшение концентрации чистой меди можно компенсировать увеличением мощности, вкладываемой в разряд. При этом увеличение мощности генерации происходит за счет увеличения концентрации паров меди и улучшения параметров разряда, что и формирует положительный фактор.

Момент компенсации воздействия этих двух факторов соответствует пересечению двух кривых на рис. 2. Назовем этот момент перехода пороговой точкой.

Подводя итог, мы можем сказать, что на самом деле HBr производит двойное действие на активную

среду лазера на парах CuBr. Воздействие на электронную составляющую плазмы [3] вследствие механизма «прилипания» электронов приводит к росту мощности генерации. Однако, как видим, рассмотренный выше механизм обуславливает снижение мощности генерации. Полагаем, что соотношение этих двух факторов и определяет поведение мощности генерации в зависимости от вкладываемой в разряд энергии.

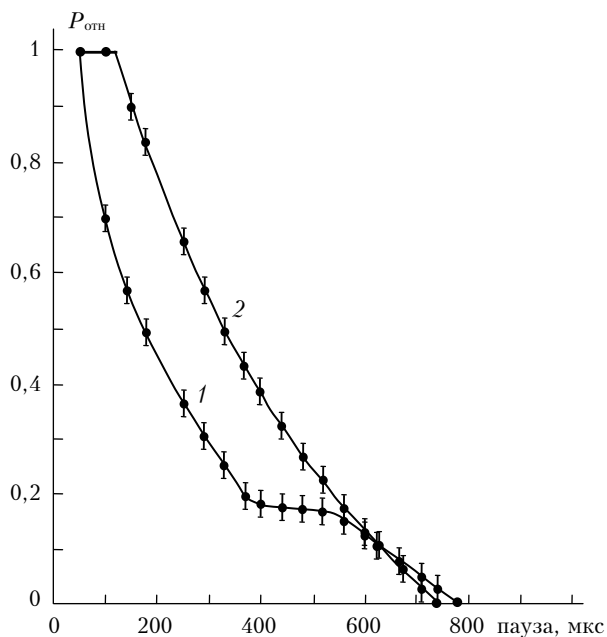


Рис. 5. Сравнение поведения амплитуды первых импульсов в цуге из 10 импульсов с увеличением паузы между цугами в присутствии НВг (1) и без НВг (2). Энергия в импульсе возбуждения 53 мДж. $f = 20$ кГц

При симметричном равном воздействии этих факторов можно ожидать, что при увеличении концентрации НВг кривая 1 будет приближаться к кривой 2 (см. рис. 2), вращаясь в точке их пересечения. Для выяснения этого были проведены эксперименты по выявлению зависимости поведения мощности генерации от потребляемой мощности при постепенном увеличении давления НВг. Для дозировки НВг использовался реверсивный источник [6]. Работа генератора НВг подробно описана в [4], где отмечается, что типичное оптимальное давление НВг составляет 0,1–0,2 торр, при этом давление НВг эффективно регулируется температурой реверсивного генератора. Однозначное соответствие температуры генератора и давления НВг позволяет не только оптимизировать мощность генерации по максимальному значению, но и проследить изменение характера роста мощности генерации в зависимости от величины добавки. Оптимальная величина добавки достигалась при температуре контейнера с НВг 130 °С. Результаты поведения пороговой точки отражены на рис. 6.

Кривая 1 показывает поведение мощности генерации без добавки НВг, особенностью которого является хорошо выраженный режим насыщения:

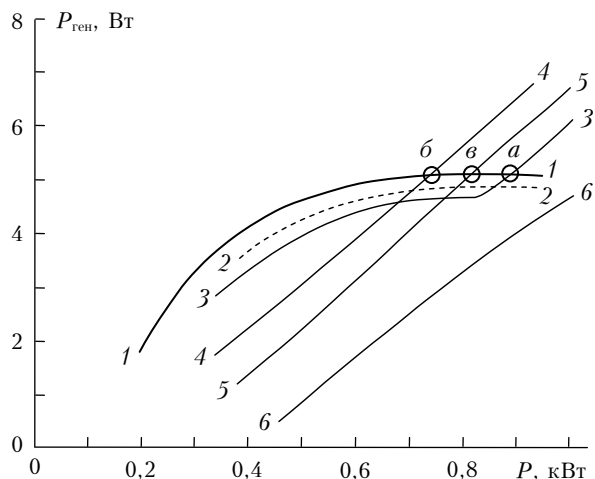


Рис. 6. Поведение мощности генерации в зависимости от величины добавки НВг. Температура контейнера с НВг: 1 – без включения контейнера; 2 – 60; 3 – 80; 4 – 130; 5 – 160; 6 – 170 °С. $f = 20$ кГц

увеличение вкладываемой мощности фактически не приводит к росту мощности генерации.

Кривая 2 соответствует добавке НВг, которая существенно ниже оптимальной (температура контейнера с НВг составила 60 °С). Из поведения этой кривой следует, что, во-первых, воздействие этих двух факторов далеко не симметрично, и, во-вторых, первое, что чувствует активная среда, – это снижение концентрации паров меди. Как видим, идет простое снижение мощности генерации. Увеличение концентрации НВг (кривая 3, температура контейнера 80 °С) приводит к тому, что при определенной, относительно высокой вводимой в разряд мощности компенсируется действие отрицательного фактора и появляется пороговая точка *a* (см. рис. 6). То есть проявляется положительное воздействие НВг. Слабое положительное влияние примеси проявляется, когда убыль концентрации паров меди скомпенсирована увеличением вкладываемой в разряд мощности. Вследствие этого пороговая точка соответствует относительно высокой потребляемой мощности. Кривая 4 (температура контейнера 130 °С) соответствует оптимальной концентрации НВг, при которой компенсация отрицательного фактора происходит при минимальной вкладываемой мощности (точка *б*). При этом условии КПД работы лазера максимальный. Дальнейшее увеличение концентрации НВг (кривые 5 и 6, температуры контейнера 160 и 170 °С соответственно) сдвигает пороговую точку в сторону больших вкладываемых мощностей (точка *в*) с соответствующим снижением КПД. Естественно, это связано с тем, что с увеличением концентрации НВг снижается концентрация паров меди и для компенсации этих потерь требуется более высокая вкладываемая в разряд мощность. Таким образом, мы можем сказать, что существует оптимальное давление НВг, при котором требуется минимальная вкладываемая в разряд мощность, приводящая к положительному эффекту, причем этот режим соответствует максимальному КПД лазера.

Заключение

В статье впервые рассматривается отрицательное воздействие HBr на состояние активной среды лазера на парах CuBr, выражающееся в относительном снижении мощности генерации в режиме «пониженного» энергоклада по сравнению с работой лазера без добавки HBr. На основе анализа экспериментальных результатов работы лазера в дуговом режиме обсуждаются два механизма, которые могут приводить к подобному эффекту: уменьшение концентрации межимпульсных электронов и увеличение скорости ухода паров меди в результате восстановления CuBr при возрастании концентрации паров HBr. Показано, что в силу этих причин влияние добавки HBr носит пороговый характер: положительный эффект достигается только после превышения определенного уровня вводимой в разряд мощности. Из анализа поведения данного порога в зависимости от вводимой в разряд мощности следует, что существует концентрация добавки HBr, при которой КПД лазера максимален.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научн. книга, 1998. 544 с.
2. Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I. Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper HBrID lasers // IEEE. J. Quantum. Electron. 1997. V. 33. N 6. P. 919–927.
3. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах

металлов и их соединений // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 7. С. 596–600.

4. 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.
5. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энергокладом в разряд // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 1. С. 85–93.
6. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шестаков Д.Ю., Шиянов Д.В. Пат. РФ № 2295811. МПК 7 H01S 3/22. 2007. Бюл. № 9.
7. Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyonov D.V. CuBr laser excited by a capacitively coupled longitudinal discharge // IEEE. J. Quantum. Electron. 2009. V. 45. N 2. P. 171–177.
8. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Лазер на парах бромида меди со стабилизацией температуры стенок активного объема // Изв. ТПУ. 2009. Т. 315. № 4. С. 152–155.
9. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование дугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // Изв. ТПУ. 2009. Т. 314. № 4. С. 111–114.
10. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю. Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, дугового и ждущего режимов // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 6. С. 119–122.
11. 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.

A.G. Filonov. On the effect of HBr addition on the CuBr vapor laser radiation characteristics.

The paper presents the analysis of the experimental results obtained when investigating the HBr addition effect on the CuBr vapor laser generation power. It is shown that the positive effect of HBr addition is of a threshold nature: the increase of generation power occurs only after the excess of a definite level of the power introduced in a discharge. We considered the physical reasons of the generation power decrease in the presence of HBr addition at laser operation in the “reduced” energy contribution mode. The paper presents the results of the investigation of the threshold behavior depending on the addition concentration. It is shown that there exists the optimal HBr concentration when the laser operation efficiency is maximal.