

## О влиянии HBr на кинетику активной среды 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 23.12.2010 г.

На основе анализа результатов экспериментального исследования работы CuBr–Ne–HBr-лазера в цуговом режиме определен механизм взаимозависимости влияния давлений CuBr и HBr на мощность генерации. Выявлены некоторые аспекты кинетики активной среды, связанные с образованием и уходом атомов меди в условиях импульсно-периодического разряда. Показано, что предимпульсные остаточные электроны могут играть активную роль в формировании паров чистой меди с момента приложения напряжения на разрядный промежуток и до начала импульса генерации.

*Ключевые слова:* лазер, пары металла, бромид меди, бромоводород; laser, metal vapors, copper bromide, bromine hydrogen.

### Введение

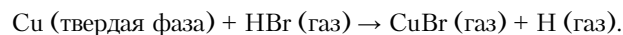
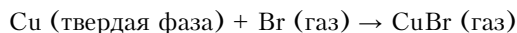
Интерес к лазеру на парах бромида меди вызван его хорошими энергетическими характеристиками [1, 2]. Благодаря современным энергетическим и качественным характеристикам излучения лазера стало возможным использовать его для обработки материалов, зондирования атмосферы, диагностики сред, в медицине. Наиболее существенное улучшение параметров лазера вызвано введением в активную среду добавок, меняющих кинетику формирования инверсии населенностей лазерных уровней и прохождения межимпульсных процессов. В качестве добавок выступают  $H_2$ , HBr и др. Со всем недавно появилось сообщение о положительном влиянии на характеристики генерации лазера добавки  $CH_4$  [1, 3, 4].

Анализ экспериментальных результатов позволил определить механизмы, за счет которых малые добавки производят увеличение мощности генерации. Считается, что в лазере на парах бромида меди в присутствии добавки HBr благодаря процессу диссоциативного прилипания уменьшается концентрация электронов низких энергий в межимпульсный период и перед приходом возбуждающего импульса тока создаются более благоприятные условия как для возбуждения верхнего лазерного уровня, так и для ввода энергии в разряд [5]. Положительное действие водорода сводится в основном к образованию HBr с соответствующим указанным улучшением кинетики.

Наличие достаточно большого количества видов частиц в активной среде, как изначально присутствующих, так и образующихся в процессе разряда и релаксирующих в межимпульсный период,

создает сложную динамическую картину. Это затрудняет отделение процессов, существенно влияющих на процесс формирования эффективной инверсии населенностей, от процессов менее важных, тем более что значение каждого фактора меняется в зависимости от стадии процесса. Соответственно, дальнейшее развитие лазеров на парах бромида меди связано с более глубоким изучением кинетики активной среды, с возможностью более эффективного ее возбуждения и снятия инверсии, ее эффективной рекомбинации.

В [6, 7] отмечается особенность работы лазера на парах бромида меди, заключающаяся в том, что в некоторых случаях для того, чтобы добавка HBr привела к увеличению мощности генерации, приходится предварительно (перед введением в разрядный объем добавки) снижать давление паров CuBr. В противном случае происходит снижение мощности генерации. Авторам работы [6] для получения мощности генерации, существенно выше оптимальной, приходилось устанавливать (за счет снижения температуры печей контейнеров с CuBr) мощность генерации ниже оптимальной, а затем осуществлять подачу HBr. Надо отметить, что в этом случае необходимость снижения давления связывается с появлением дополнительных паров CuBr в результате следующих процессов:



Из работы [7] следует, что для фиксированной потребляемой мощности существует оптимальное значение давления CuBr, превышение которого снижает мощность генерации. Увеличение мощности, вводимой в разряд, приводит к возможности работы лазера при более высоких давлениях CuBr (оптимальное давление при этом возрастает). В [7]

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

отмечается: «Характерно, что при работе в оптимальном режиме для CuVg добавление HNg сразу приводило к снижению мощности генерации. Суммарное значение давления паров CuVg и HNg не должно было превышать некоторого значения  $P_{кр}$ . <...> Существенным является тот факт, что  $P_{кр}$  растет с увеличением потребляемой мощности» [7, с. 154].

Таким образом, как в первом, так и во втором случае просматривается некоторая взаимосвязь давлений CuVg и HNg, объяснить которую с помощью наличия твердой фазы меди и отмеченных выше процессов нам представляется затруднительным. Физику этого эффекта можно найти, рассматривая кинетику активной среды в процессе формирования инверсной заселенности и в межимпульсный период. Этому вопросу и посвящена данная статья.

### Экспериментальная установка

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

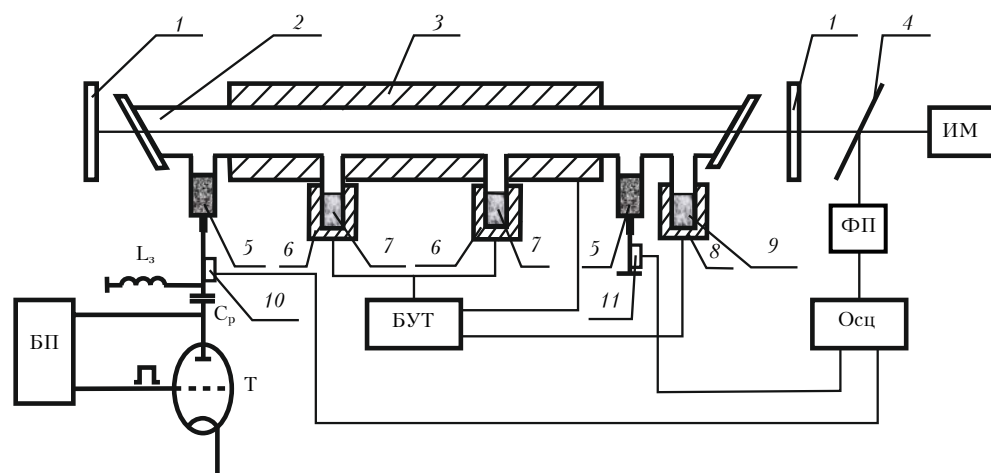


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — резонатор; 2 — газоразрядная трубка; 3 — температурная камера; 4 — светоделительная пластинка; 5 — электроды; 6 — нагреватели контейнеров с бромидом меди; 7 — контейнер с бромидом меди; 8 — нагреватель источника HNg; 9 — источник HNg; 10 — делитель напряжения; 11 — пояс Роговского;  $C_p$  — рабочая емкость;  $L_3$  — зарядная индуктивность; Т — тиратрон ТГИ1-1000/25; БП — блок питания; БУТ — блок управления температурой; Осц — осциллограф Tektronix TDS 3032; ФП — фотоприемник ФК-19; ИМ — измеритель мощности ИМО-2

Расстояние между электродами составляло 900 мм. Буферный газ — 50 торр Ne. Контейнеры с расположенным в них бромидом меди представляли собой кварцевые отростки от ГРТ и обеспечивали равномерное распределение паров CuVg по активному объему. Бромид меди располагался достаточно далеко от разрядного канала, так что температура рабочего объема не влияла на температуру CuVg, что обеспечивало независимую регулировку его давления с помощью нагревателей 6. В лазере использовался реверсивный источник HNg 9, который позволял устанавливать оптимальное давление

HNg с помощью нагревателя 8. Температурная камера 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 задавал и поддерживал рабочую температуру контейнеров с бромидом меди и генератора HNg. Блок питания обеспечивал необходимое регулируемое напряжение на конденсаторе  $C_p$ , заряд которого осуществлялся через индуктивность  $L_3$ . 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. Средняя мощность генерации определялась измерителем мощности ИМО-2. Импульсы генерации регистрировались фотоприемником ФК-19, импульсы тока и напряжения — поясом Роговского и омическим делителем напряжения с помощью осциллографа Tektronix TDS 3032.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для выяснения взаимосвязи давлений CuVg и HNg необходимо рассмотреть воздействие этих компонентов на кинетику активной среды, выражающееся в поведении энергии в импульсе генерации и изменении средней мощности излучения. Наиболее удобен для этого прибор, описанный в [8, 9], представляющий собой лазер на парах бромида меди со стабилизацией температуры стенок

разрядного объема внешним нагревателем. В отличие от «саморазогревных» лазеров на парах металлов и их солей, где теплоизолятор обеспечивает рабочую температуру разрядного канала только при вполне конкретной вводимой в разряд мощности, в данной конструкции за счет наличия отрицательной обратной связи внешний нагреватель поддерживает рабочую температуру в широком диапазоне водимых в разряд мощностей. При увеличении вкладываемой в разряд мощности он уменьшает свою эффективность, а с ее уменьшением — увеличивает, поддерживая температуру стенки разрядного объема на заданном уровне [10]. Такое конструктивное решение существенно расширило диапазон значений вводимой в разряд мощности, при которой происходит генерация, а также позволило эффективно работать в цуговом режиме. Это, в свою очередь, дало возможность вести наблюдение за появлением и изменением генерации в цуге от импульса к импульсу и судить о процессах, происходящих в активной среде лазера.

Воздействие добавки НВг на активную среду с использованием такой конструкции лазера рассмотрено в работе [11]. На основе экспериментальных данных показано, что присутствие добавки НВг увеличивает скорость ухода паров меди (скорость восстановления паров CuVg) в период после прохождения импульса возбуждения. Такое действие при работе лазера в частотном режиме может в определенных условиях приводить к снижению средней мощности генерации. Действие этого фактора выражено и в некотором снижении КПД лазера при работе с малыми вводимыми мощностями при введении добавки НВг [7]. Наличие этого отрицательного фактора наряду с известным воздействием добавки, приводящим к увеличению мощности генерации как положительного фактора, обуславливает существование определенного баланса. При этом формируется пороговое значение величины вводимой в разряд мощности, необходимой для компенсации действия отрицательного фактора.

По аналогии с работой [11], с целью выяснения роли давления CuVg в кинетике активной среды рассмотрим поведение амплитуды импульсов генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами в отсутствие добавки НВг. Цуговый режим формируется следующим образом. Непрерывная последовательность импульсов возбуждения с частотой следования 20 кГц представляется в виде цугов из 10 импульсов с соответствующими паузами между импульсами 50 мкс. Формирование и увеличение паузы между группами импульсов (цугов), состоящих из 10 импульсов возбуждения, приводят к изменению амплитуды импульсов генерации. Поскольку это изменение находится в достаточно жесткой зависимости от изменения концентрации паров чистой меди в активной среде, то оно в определенной мере отражает ее кинетику в импульсно-периодическом процессе работы лазера [11].

Поведение амплитуды первого импульса генерации при увеличении паузы между цугами для

разных вводимых в разряд энергий представлено на рис. 2.

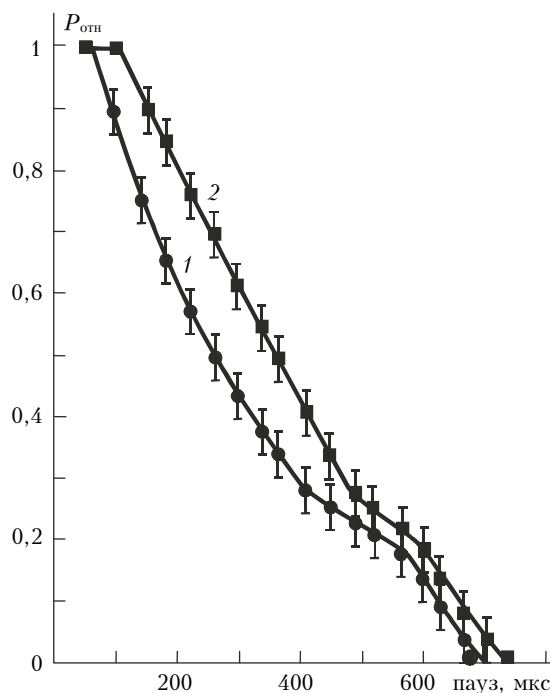


Рис. 2. Поведение амплитуды первого импульса генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами для энергий в импульсе возбуждения: 1 — 53 мДж; 2 — 63 мДж (без добавки НВг)

Энергия, вводимая в разряд за импульс, определяется из соотношения  $E = CU^2/2$ , где  $C$  — рабочая емкость;  $U$  — напряжение на этой емкости. Увеличение вводимой энергии должно приводить к более полной диссоциации паров CuVg с соответствующим увеличением концентрации свободных атомов меди.

Как и предполагалось, увеличение энергии в импульсе возбуждения привело к заметному изменению характера релаксации активной среды в межимпульсный период, которое можно связать, во-первых, с относительным увеличением концентрации паров меди, во-вторых, замедлением процесса ухода паров меди из активного объема (кривая 2 запаздывает относительно кривой 1).

Далее рассмотрим поведение амплитуды первого импульса генерации в цуге при увеличении давления CuVg и сохранении напряжения на разрядном промежутке, а следовательно, энергии, вкачиваемой в разряд. Этот процесс представлен на рис. 3.

Процедура увеличения давления паров брома меди заключалась в увеличении температуры контейнера CuVg от 460 до 500 °С (кривая 1 ниже кривой 2). Предположив, что амплитуда импульсов генерации соответствует концентрации паров меди в активной среде, можно прийти к заключению, что скорость ухода паров меди возрастает).

Существенность данного фактора (на полувысоте время сократилось с 360 до 220 мкс) позволяет качественно определить процессы в активной среде,

происходящие при увеличении давления CuBr. Рост давления бромида меди в условиях импульсного разряда вследствие диссоциации приводит к появлению и росту концентрации атомов меди в активной среде, что обуславливает появление и рост мощности генерации. При малой концентрации CuBr увеличение его давления не влияет существенным образом на процесс ухода атомов меди и мощность генерации растет. Однако, как следует из смещения кривой 2 относительно кривой 1 рис. 3, при достаточно большом значении давления бромида меди его увеличение сопровождается увеличением скорости ухода паров меди из активного объема.

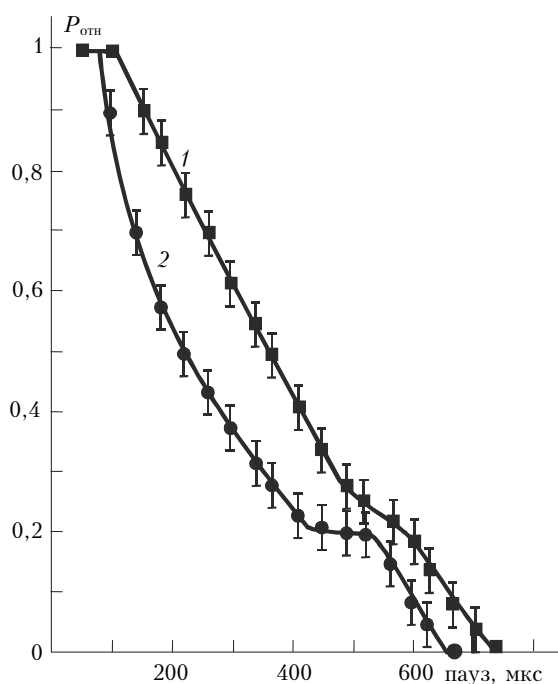


Рис. 3. Поведение амплитуды первого импульса генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами при температуре контейнера с CuBr: 1 – 460 °C; 2 – 500 °C (без добавки HBr)

Как уже отмечалось, в условиях работы лазера в частотном режиме этот процесс при достижении достаточно большого давления бромида меди (или скорости ухода паров меди) приводит к ограничению мощности генерации или даже к ее снижению. Учет этого процесса (наряду с другими факторами [12]) может объяснить наличие максимума в зависимости поведения мощности генерации при увеличении давления паров CuBr для фиксированной вкачиваемой мощности [7]. Увеличение вкачиваемой в разряд мощности приводит к сдвигу максимума в сторону больших давлений CuBr и мощностей генерации, что вполне естественно, поскольку большей мощности соответствует большая концентрация паров меди и для эффективного ухода требуется большее давление CuBr.

Выше мы обращали внимание на то, что увеличение давления HBr также приводит к увеличению скорости ухода паров меди из активного объема.

Таким образом, можно сказать, что увеличение паров CuBr и HBr приводит к одному и тому же процессу: увеличению скорости ухода паров меди из активного объема. Необходимо заметить, что при прочих равных условиях существует определенная, вполне конкретная скорость ухода паров меди и при фиксированной частоте следования импульсов лазер работает на определенном уровне средней мощности генерации. Если скорость ухода паров из активного объема возрастет, то уровень мощности генерации снизится. Такое возможно, если восстановление активной среды не происходит за один импульс возбуждения, что и наблюдается в лазере на парах бромида меди. В реальных условиях воздействие роста давления CuBr и HBr на процесс ухода паров меди складывается, т.е.

$$V_{CuBr} + V_{HBr} + V_d = V_f,$$

где  $V_{CuBr}$  и  $V_{HBr}$  – скорость ухода атомов меди, обусловленная давлением CuBr, и HBr – скорость ухода атомов меди, обусловленная величиной давления HBr;  $V_d$  – скорость ухода атомов меди, вызванная всеми другими факторами;  $V_f$  – результирующая скорость ухода атомов меди, которая определяет уровень средней мощности на определенной частоте следования импульсов возбуждения. Для фиксированных  $V_f$  и  $V_d$  при увеличении скорости  $V_{HBr}$ , чтобы сохранить  $V_f$  или уровень средней мощности, требуется уменьшать  $V_{CuBr}$ . Следовательно, эффект существования  $P_{кр}$  вполне оправдан и давления как примеси, так и рабочего вещества становятся взаимозависимыми по их влиянию на мощность генерации. В работе [11] показано, что при оптимальном по мощности генерации давлении CuBr первое воздействие добавки HBr – это увеличение скорости ухода паров меди (снижение мощности генерации). Соответственно при работе в оптимальных условиях по давлению CuBr требуется предварительно снизить скорость ухода паров меди, т.е. уменьшить давление бромида меди, что объясняет эффект, описанный в работах [6, 7].

Связав амплитуду импульсов генерации с концентрацией атомов меди, можно попытаться определить процесс, за счет которого происходит увеличение скорости ухода паров меди из активного объема при взаимодействии активной среды с добавкой HBr. Рассмотрим поведение амплитуды десятого импульса генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами для двух значений вводимой в разряд мощности: 42 и 53 мДж (рис. 4).

Из характера поведения двух кривых можем заключить, что увеличение энергии в импульсе возбуждения ускоряет восстановление активной среды. Действительно, при существовании предела степени диссоциации (в идеальном варианте – 100%) скорость его достижения будет зависеть от соотношения уровня диссоциации за один импульс возбуждения и уровня ассоциации паров CuBr за межимпульсный период. А это, в частности, зависит от величины энергии в импульсе возбуждения.

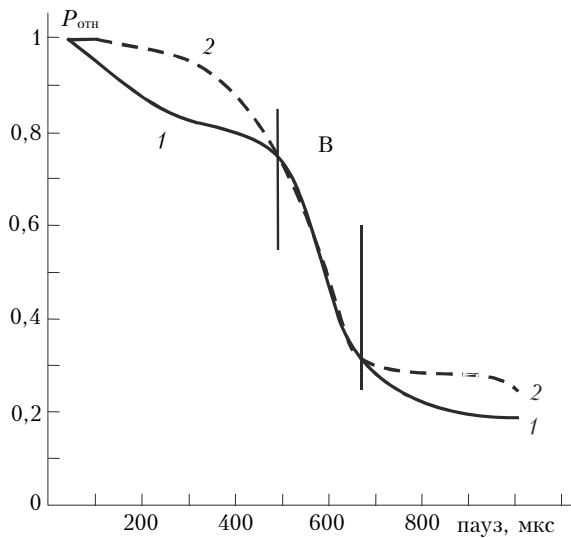


Рис. 4. Поведение амплитуды десятого импульса генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами для энерговкладов: 1 – 43 мДж; 2 – 53 мДж в присутствии добавки НВг

Особенностью представленного поведения кривых является не столько изменение скорости восстановления активной среды, сколько совпадение скорости ухода паров меди для разных величин уровня вводимой в разряд мощности. На рис. 4 он обозначен буквой В. Участки падения практически полностью совпадают.

Изменение энергии в импульсе возбуждения предполагает изменение концентрации электронов, их скорости. Следовательно, положение участка В не зависит (или слабо зависит) от электронной составляющей активной среды. Дело в том, что уход паров меди определяется либо релаксирующими после прохождения разряда электронами, подпитываемыми прямо или опосредованно (за счет диссоциации паров  $\text{CuBr}$ ) концентрацию паров меди, и тогда уход паров меди отслеживает процесс ухода электронов, либо система сама релаксирует после электронного удара: после разряда электроны быстро уходят, а пары меди, соединяясь с парами брома, относительно медленно (как более инерционный процесс) уходят из разрядного объема. Мы полагаем, что этот участок отображает собственно уход паров меди именно посредством реакции восстановления  $\text{CuBr}$ , поскольку он в наших условиях не зависит от напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку.

Таким образом, изменение энергии в импульсе возбуждения не привело к изменению характера поведения концентрации паров меди, что позволило выделить на фоне общего снижения энергии в импульсе генерации процессы, не зависящие от импульса возбуждения. При этом можно говорить о физических процессах, соответствующих разным участкам кривой падения концентрации атомов меди.

Для определения этих процессов рассмотрим поведение амплитуды импульсов генерации в цуге из 10 импульсов в тех же условиях, что и в [11], но

при более низкой энергии в импульсе возбуждения (рис. 5).

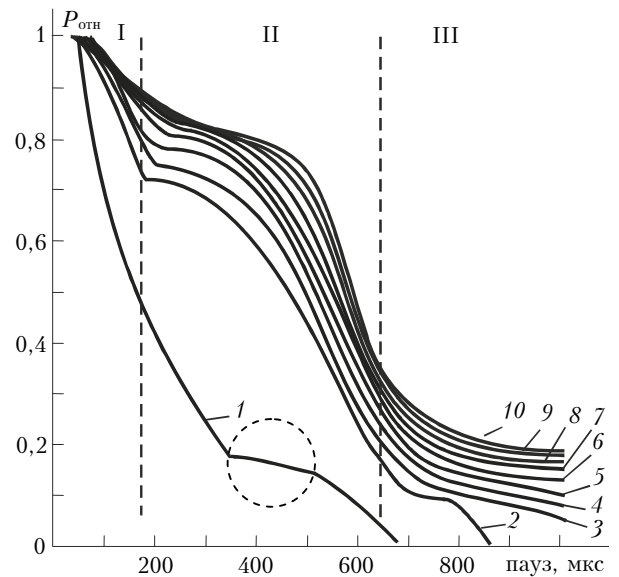


Рис. 5. Поведение амплитуды импульсов генерации в цуге из 10 импульсов при увеличении паузы между цугами в присутствии добавки НВг. Импульсы в цуге расположены через 50 мкс. Энергия в импульсе возбуждения – 43 мДж

Следуя статье [11], разобьем, согласно характеру поведения кривых рис. 5, временную область на 3 зоны. Зона I соответствует общему уходу паров меди из активного объема. Мы полагаем, что в зонах II и III произошло в некоторой степени разделение общего процесса ухода паров меди на два (хотя и наложенных друг на друга) процесса, выявляющих кинетику активной среды. Зона II соответствует (как следует из рис. 4) уходу паров меди за счет реакции восстановления паров  $\text{CuBr}$ . Предполагается, что зона III сформирована остаточными электронами.

Действительно, увеличение напряжения и вводимой в разряд мощности приводит к росту остаточных электронов, что и отражается в расположении кривой 2 над кривой 1 в зоне III (см. рис. 4). Однако, поскольку описываемый процесс происходит через 50 мкс после прохождения импульса возбуждения, то энергии остаточных электронов не хватает для диссоциации паров  $\text{CuBr}$ . Энергия диссоциации бромида меди равна 2,5–3 эВ, в то время как энергия электронов уже на 10-й мкс равна примерно 0,2 эВ [3, 12]. К тому же надо учесть существование паузы между цугами  $\sim 0,8$  мс. Следовательно, указанный участок (и соответственно концентрация паров меди) формируется остаточными электронами за время перед импульсом генерации.

Для пояснения данного положения приведем рис. 6, на котором показано типичное для лазеров на самоограниченных переходах временное расположение импульсов напряжения, тока, импульса генерации, этот период обозначен А.

Остаточные электроны под действием напряжения в начале формирования разряда А производят

достаточно эффективную диссоциацию паров CuBr и формируют зону III. Благодаря этому процессу зона III явно выражена и на кривой спада первого импульса генерации (см. рис. 5, 7, показано штриховой линией).

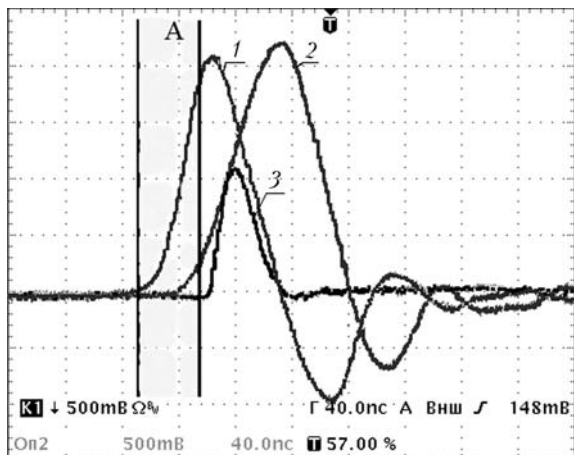


Рис. 6. Типичные импульсы напряжения (1), импульсы тока (2) и импульсы генерации (3). Выделена зона А, в которой напряжение на разрядном промежутке возрастает до максимума, что позволяет остаточным электронам производить эффективную диссоциацию паров CuBr

Таким образом, зоны I и II отображают поведение концентрации паров меди после импульса возбуждения, а зона III — перед импульсом генерации за время, начиная с приложения напряжения на разрядный промежуток до момента генерации остаточными электронами. На рис. 5 отображена суперпозиция двух, разнесенных во времени процессов формирования паров чистой меди: 1) разрядом, ранее прошедшим через активную среду, и 2) остаточными электронами, получившими энергию, достаточную для диссоциации паров, в момент приложения напряжения к разрядному промежутку. Именно по этой причине зоны, представленные на рис. 5 для случая без добавки HBr [11], отсутствуют, поскольку в этом случае остаточных электронов существенно больше и они производят более эффективную диссоциацию паров CuBr перед импульсом генерации. Резкое снижение концентрации предимпульсных электронов в присутствии HBr [3] снижает их роль в формировании паров чистой меди, и происходит количественное перераспределение этих процессов, выраженное в поведении изменения концентрации паров меди и, соответственно, амплитуды импульсов генерации.

Принимая данную трактовку поведения кривых рис. 5, приходим к заключению, что скорость ухода паров меди из активного объема при введении добавки HBr возросла в основном вследствие уменьшения концентрации предимпульсных электронов.

Предложенной моделью кинетики процессов хорошо объясняется поведение амплитуды первого импульса генерации в присутствии добавки HBr при увеличении напряжения на разрядном промежутке (рис. 7).

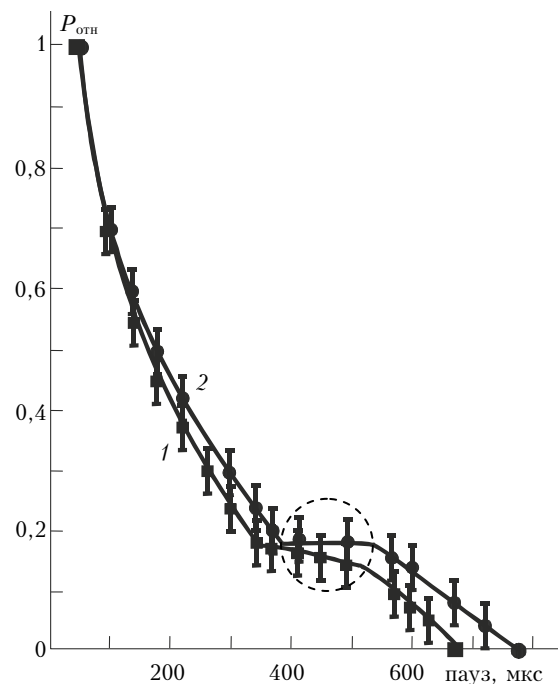


Рис. 7. Поведение амплитуды первого импульса генерации при увеличении паузы между цугами для разных вводимых мощностей в присутствии добавки HBr; 1 — 53 мДж; 2 — 63 мДж

Как видим, существенному изменению подверглась только часть кривой, относящаяся к зоне III. Такое поведение можно объяснить ростом концентрации остаточных электронов. Действительно, увеличение напряжения соответствует увеличению энергии, вводимой в разряд, большему разрядному току, большей степени ионизации активной среды. В результате перед приходом импульса возбуждения плотность остаточных электронов возрастет, что и нашло свое выражение в изменении поведения кривой 2. К тому же этим объясняется разница в поведении кривых, приведенных на рис. 2 и 7. Присутствие добавки HBr резко снижает роль остаточных электронов в формировании атомов меди в начале импульса возбуждения и выражается в существенном снижении их влияния на участке кривых, соответствующих зоне I.

## Заключение

На основе анализа экспериментальных результатов выявлен механизм взаимозависимости давления бромида меди и бромоводорода по их влиянию на среднюю мощность генерации лазера на парах бромида меди. Показано, что увеличение концентрации (увеличение давления) обоих компонентов приводит к увеличению скорости ухода паров чистой меди из активного объема. Поскольку скорость ухода атомов меди в частотном режиме при прочих равных условиях определяет уровень средней мощности генерации, данный процесс обуславливает взаимозависимость этих давлений, что заставляет оптимизировать систему в целом, выбирая условия, при которых мощность генерации будет максималь-

на. Впервые показано, что роль остаточных электронов может не ограничиваться влиянием на электрические параметры плазмы. Они эффективно участвуют в формировании паров чистой меди за время перед импульсом генерации, и эта роль наиболее существенно выражена при работе лазера без добавки HBr, что позволяет непротиворечивым образом объяснить изменение параметров генерации, вызванное введением добавки HBr.

1. 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.
2. 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 // J. Quantum Electron. 1997. V. 33, N 5. P. 705–709.
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., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Андриенко О.С. Влияние добавки метана на характеристики лазера на парах бромиды меди // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 11. С. 1047–1050.
5. 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 // J. Quantum Electron. 1997. V. 33, N 6. P. 919–927.
6. 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.
7. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Филонов А.Г. Лазер на парах бромиды меди со стабилизацией температуры стенок активного объема // Изв. Томского политехн. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 152–155.
8. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю. Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 6. С. 119–122.
9. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромиды меди // Изв. Томского политехн. ун-та. 2009. Т. 314, № 4. С. 111–114.
10. Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазеры на парах бромиды меди нового поколения // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
11. Филонов А.Г. О влиянии добавки HBr на характеристики излучения лазера на парах CuBr // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 608–613.
12. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т. 1 / Под ред. В.М. Батенина. М.: Физматлит, 2009. 544 с.

**A.G. Filonov. On the effect of HBr on the kinetics of the CuBr vapor laser active medium.**

The mechanism of interdependence of the effect of CuBr and HBr pressures on the generation power has been determined on a basis of analysis of results of experimental study of the operation of CuBr–Ne–HBr-laser in the pulse train operating condition. Some aspects of the active medium kinetics have been revealed, which were connected with the formation and departure of copper atoms under conditions of a pulse–periodic discharge. It is shown that prepulse residual electrons can play an active role in the formation of pure copper vapors since the voltage application to a discharge gap and up to the onset of a generation pulse.