

УДК 621.373.826

## ЛАЗЕР НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНОК АКТИВНОГО ОБЪЕМА

В.А. Димаки, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, А.Г. Филонов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: qel@asd.iao.ru

*Исследовано влияние теплового режима на энергетические характеристики излучения лазера на парах бромида меди в условиях стабилизации температуры стенок активного объема независимым от разряда источником питания. Представлены характеристики работы лазера в диапазоне потребляемых мощностей 150...1500 Вт. Показано влияние добавок бромоводорода на параметры генерации.*

### Ключевые слова:

*Лазер на парах бромида меди, разрядная трубка, генерация.*

### Key words:

*Copper-bromide vapor laser, discharge tube, generation.*

### Введение

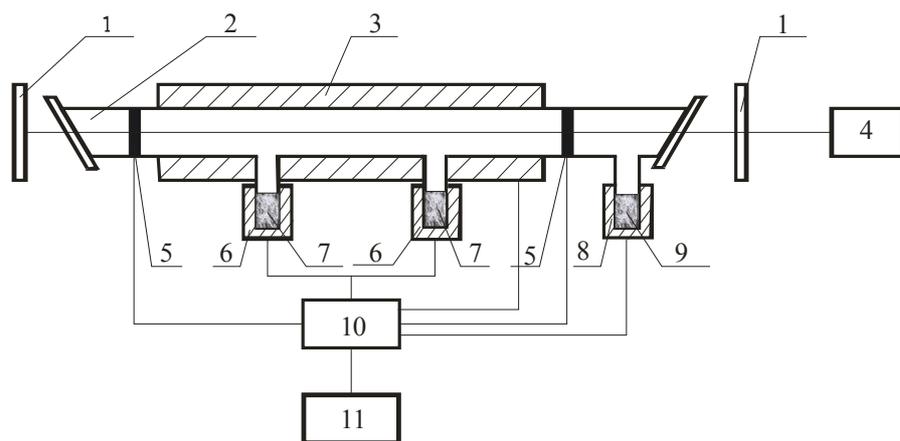
Лазеры на галогенидах меди, в частности, лазер на бромиде меди, как наиболее перспективный, привлекают пристальное внимание разработчиков [1, 2]. Такие лазеры обладают хорошими энергетическими характеристиками и более простой технологией изготовления активного элемента по сравнению с лазером на парах чистой меди. Введение в рабочую среду активных примесей ( $H_2$ ,  $HBr$ ) позволяет перейти к мощностям генерации и сроку службы активного элемента, приемлемым для практических применений, таких, как зондирование атмосферы, обработка материалов, медицина. Кроме того, низкая рабочая температура активного объема позволяет применить внешний нагрев рабочей зоны газоразрядной трубки (ГРТ) [3]. Дело в том, что импульс тока, проходящий через активный объем лазера, работающего в режиме саморазогрева, создает рабочую температуру, обеспечивает диссоциацию паров бромида меди и производит возбуждение лазерной среды. Соответственно, внешний нагрев рабочего объема делает проще оптимизацию работы лазера по мощности генерации. Кроме того, такое исполнение активного элемента позволяет выявить эффекты, ранее скрытые зависимостью температуры среды (в частности, температуры стенки разрядного канала) от вкачиваемой в разряд мощности.

Возможность стабилизации температуры стенки разрядного канала на фиксированных значениях позволяет более тщательно определить и влияние добавки  $HBr$  на мощность генерации. Формирование температуры активного объема независимым источником питания создает условия для работы лазера с малыми вкладываемыми в разряд мощностями при относительно больших рабочих объемах активного элемента. Такой режим также интересен для практического применения. Выяснению особенностей работы лазера на парах бромида меди в этих условиях и посвящена данная работа.

### Экспериментальная установка

В экспериментах использовалась ГРТ – 2, рис. 1, выполненная из оптического кварца с внутренним диаметром 38 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина активной зоны – 900 мм. Резонатор – 1 – плоскопараллельный. Нагревательная камера активного объема – 3 поддерживала температуру стенки ГРТ на заданном уровне. Контроль температуры осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары, расположенной вблизи стенки разрядного канала. Сигнал с термодатчика поступал в цепь регулировки температуры, что позволяло стабилизировать ее на заданном уровне. Температурный режим определялся внешним нагревателем, который задавал температуру стенки ( $T_{ст}$ ) активного объема, и температурой, создаваемой диссипацией энергии разряда. Лазерная установка поддерживала  $T_{ст}$  с точностью  $\pm 10$  °С. При выходе температуры из данного диапазона включалась система стабилизации и возвращала ее к заданному значению. Автоматически учитывалось изменение температуры, создаваемой диссипацией энергии разряда. При изменении мощности, вводимой в разряд, соответствующим образом изменялся режим подогрева, стабилизируя температуру стенки разрядного канала. Измерения производились с учетом того, что температурные изменения обладают большой инерционностью. В экспериментах производились достаточно малые изменения температуры стенки разрядного канала или контейнеров, и переходные процессы заканчивались через 3...4 мин. Снятие значений производилось через 10 мин, что было достаточно для завершения переходных процессов. Импульсно-периодический разряд осуществлялся по прямой схеме между электродами – 5. Величина рабочей емкости ~450 пФ. Давление буферного газа (неона) составляло 6,7 кПа.

Контейнеры с  $CuBr$  – 7 и с регулятором давления  $HBr$  – 9 были вынесены из нагревательной камеры – 3 на достаточно большое расстояние, чтобы



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1) резонатор Фабри-Перо; 2) газоразрядная трубка; 3) нагревательная камера активного объема; 4) измеритель мощности ИМО-2; 5) электроды; 6) нагреватель контейнера с бромидом меди; 7) контейнер с CuBr; 8) нагреватель контейнера с HfBr; 9) контейнер с HfBr; 10) источник питания; 11) блок управления

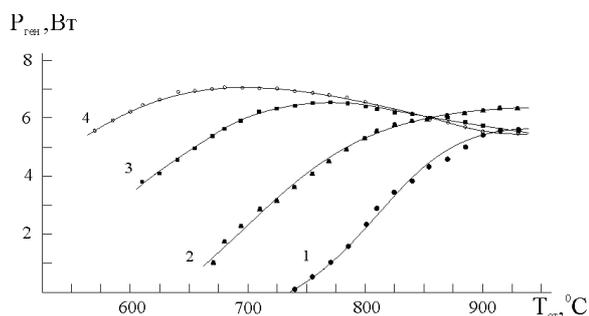
обеспечить независимость давления CuBr и HfBr от температуры активного объема, и подогревались специальными нагревательными элементами – 6, 8. Блок управления – 11 осуществлял работу лазера в режиме импульсного заряда рабочей емкости [4]. Выпрямленное сетевое напряжение с помощью полумостовой схемы, собранной на транзисторах IRG4PH50UD, преобразовывалось в импульсное амплитудой до 270...280 В и подавалось на высоковольтный трансформатор с коэффициентом трансформации 1 : 60, что позволяло заряжать рабочую емкость до напряжения 14...15 кВ. Зарядный импульс подавался с задержкой порядка 10 мкс относительно момента предыдущего разряда рабочей емкости, в течение которой тиратрон ТГИ1-1000/25 находился под нулевым потенциалом. В течение этого времени в тиратроне проходили все переходные процессы, и он надежно закрывался. Вследствие этого работа лазера была стабильной и долговременной. Частота следования импульсов возбуждения устанавливалась на уровне – 20 кГц при скважности ~50 %.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

В лазере на бромиде меди мощность генерации во многом определяется тепловым режимом. Это связано с тем, что генерация существует в определенном температурном интервале. Тепловой режим задается вкачиваемой в разряд мощностью, а также температурой стенок разрядного канала, определяющей отвод тепла из активной среды. Использование внешнего нагревателя с фиксацией температуры стенок  $T_{cm}$  позволяет выявить зависимость мощности генерации от данного параметра. На рис. 2 показано это влияние. При фиксированной потребляемой мощности ~1400 Вт изменялась температура стенки.

Зависимости сняты для различных значений давления паров CuBr, величина которого менялась посредством задания температуры контейнеров. Из по-

ведения кривых следует, во-первых, существенность роли температуры стенки в процессе формирования активной среды, во-вторых, во всех случаях мы видим существование температуры стенки, при которой мощность генерации максимальна. Такое влияние объясняется сильной зависимостью мощности генерации от концентрации CuBr, которая определяется радиальным градиентом температуры рабочего объема, уходом CuBr на стенку. Таким образом, при определенном давлении CuBr, задаваемом контейнерами, существует оптимальная температура стенки разрядного канала. При уменьшении  $T_{cm}$ , с целью снижения нагрузки на материалы конструкции, более высокая мощность генерации достигается увеличением давления CuBr. При этом возрастает расход рабочего вещества, снижается срок службы активного элемента. Необходимо отметить, что в условиях саморазогрева, в силу отсутствия управления температурой стенки, процесс оптимизации носит сугубо приблизительный характер.



**Рис. 2.** Зависимость мощности генерации от температуры стенки разрядного канала при различной температуре контейнеров с CuBr: 1) 380 °C; 2) 430 °C; 3) 500 °C; 4) 540 °C

Стабилизация температурного режима посредством фиксации  $T_{cm}$  совместно с независимым от разряда управлением давлением CuBr позволила с достаточно хорошим разрешением (рис. 3) выявить зависимость мощности генерации от давления

CuVg при различных значениях  $T_{cm}$ . Поведение мощности генерации прослеживалось при фиксированной потребляемой мощности (1400 Вт). Потребляемая мощность определялась по формуле:  $CU^2f/2$ , где  $C$  – рабочая емкость,  $U$  – напряжение на рабочем конденсаторе,  $f$  – частота следования импульсов. Для сравнения на этом же графике приведена кривая мощности генерации без добавки HBr (рис. 3, кривая 1) при температуре стенки разрядного канала 650 °C.

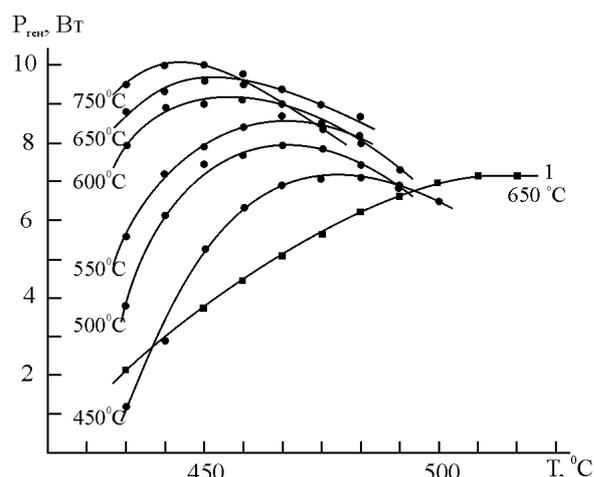


Рис. 3. Поведение средней мощности генерации в зависимости от давления CuVg при различных значениях  $T_{cm}$  (температура указана рядом с кривой) с добавкой HBr (1 – без HBr)

Мы видим, во-первых, что как и без наполнения трубки HBr  $T_{cm}$  существенным образом влияет на энергетические характеристики излучения и требует оптимизации. Во-вторых, оптимальный режим генерации в присутствии HBr наблюдается при меньшей температуре контейнера с CuVg. В нашем случае это снижение составило ~50°, т. е. при меньших давлениях паров CuVg (температуры контейнеров) мощность генерации в присутствии HBr выше, чем без HBr. В работе [5] рассматривается дополнительный механизм образования паров CuVg в активной среде: чистая медь, оседающая на стенках разрядного канала, реагирует с HBr и возвращается в исходное состояние (CuVg). А поскольку условия разряда не меняются, оптимальное значение давления паров CuVg остается постоянным, то это, по всей видимости, и приводит к рассматриваемому сдвигу оптимальной температуры контейнера с CuVg. Тем самым более полно используется ресурс активного элемента. Хорошо заметно некоторое снижение оптимальной температуры контейнера с CuVg с повышением  $T_{cm}$ . Мы это связываем с тем, что повышение  $T_{cm}$  затрудняет уход CuVg на стенки газоразрядного канала, вследствие чего происходит некоторое увеличение давления паров CuVg в активном объеме. Поскольку оптимальная работа лазера в присутствии HBr происходит при более низкой температуре контейнера с CuVg, то срок службы активного элемента должен возрастать.

Сочетание электрической схемы и активного элемента данного типа позволили отработать прибору более 1500 ч без заметного снижения мощности генерации лазерного излучения и замены тиратрона. Ранее тиратрон приходилось заменять после 500 ч работы.

Фиксация рабочей температуры активного объема независимым от разряда источником позволяет работать в широком диапазоне потребляемых мощностей. В нашем случае (рис. 4) устойчивая генерация наблюдалась при потребляемой мощности ~160 Вт, т. е. лазер начинает работать практически с момента пробоя газоразрядного промежутка.

Необходимо отметить, что для каждого значения потребляемой мощности существует свое оптимальное значение давления паров CuVg ( $P_{опт1}$ ), которое растет с увеличением потребляемой мощности. При превышении  $P_{опт1}$  мощность генерации падает, поскольку зачастую возникает частичное шнурование разряда. Таким образом, при увеличении давления CuVg затрудняется прохождение разряда через активный объем. Аналогичная ситуация наблюдается и при введении в активный объем паров HBr, для которого ранее существовало свое оптимальное значение  $P_{опт2}$ . Влияние паров HBr на импульс тока и напряжения подробно изложено в работе [6]. Характерно, что при работе в оптимальном режиме для CuVg с давлением  $P_{опт1}$  добавление HBr сразу приводило к снижению мощности генерации. Суммарное значение давления паров CuVg и HBr не должно было превышать некоторого значения  $P_{кр}$ . Работа лазера требовала оптимизации по соотношению парциальных давлений HBr и CuVg, поскольку влияние каждой из этих компонент носит экстремальный характер. Существенным является тот факт, что  $P_{кр}$  растет с увеличением потребляемой мощности.

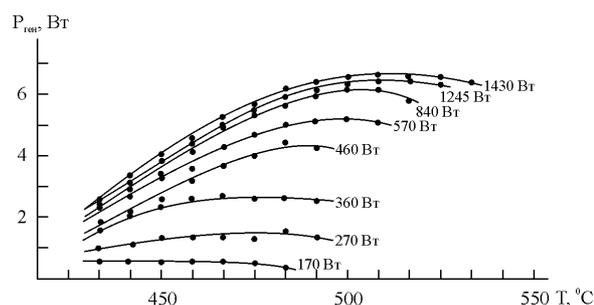
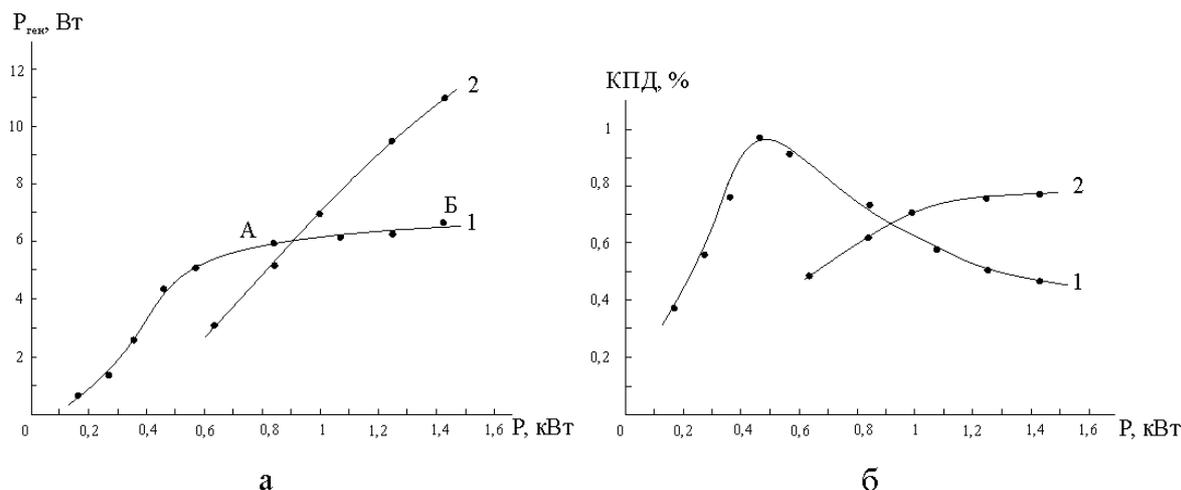


Рис. 4. Поведение мощности генерации в зависимости от давления паров CuVg (температуры контейнера с CuVg) при различной мощности накачки

На рис. 5 показаны зависимости мощности генерации и ее эффективности от потребляемой мощности. Как следует из рис. 5, а (кривая 1, участок AB), начиная с некоторого момента увеличение потребляемой мощности не приводит к существенному увеличению мощности генерации (увеличение потребляемой мощности на ~70 % привело к росту мощности генерации на ~10 %), т. е.



**Рис. 5.** Поведение: а) мощности генерации и б) эффективности работы лазера на парах CuBr (1) и CuBr+HBr (2) при их оптимальной концентрации в зависимости от потребляемой мощности

энергия в импульсе генерации остается практически постоянной.

Это создает условия для работы в цуговом режиме, при которой с изменением числа импульсов в цуге или паузы между цугами изменяется вкладываемая в разряд мощность.

Добавление в активный объем HBr меняет характеристики генерации лазера. При малых вкладываемых в разряд мощностях эффективность работы лазера не высока (рис 5, б, кривая 2). В результате мощность генерации даже ниже чем без HBr. Мы полагаем, что это происходит вследствие частичного связывания паров чистой меди в CuBr, что и снижает энергетические параметры генерации [7]. Генерация растет с увеличением вкладываемой в разряд мощности, и в конечном итоге начинает значительно превышать ее значение без добавок HBr (рис. 5, а, кривая 2) [3]. Надо отметить, что данный эффект в саморазогреваемых лазерах на парах бромида меди слабо выражен, поскольку те-

плоизолятор активного элемента выбирается из условия работы с максимальной вкладываемой мощностью и с соответствующей высокой мощностью генерации. По этой причине при малой потребляемой мощности снижение рабочей температуры, непосредственно связанной с вкладываемой в разряд мощностью, скрывает этот эффект.

#### Заключение

Экспериментально прослежено влияние температуры стенки разрядного канала в лазере на парах бромида меди на энергетические характеристики лазерного излучения. Установлено, что введение оптимальных добавок HBr приводит не только к росту мощности генерации, но и к снижению рабочего давления паров CuBr, что положительно сказывается на сроке службы активного элемента. Показано, что использование внешнего нагрева активного объема позволяет работать в широком диапазоне потребляемых мощностей (150...1500 Вт).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная 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. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговыделением в разряд // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 1. – С. 85–93.
4. Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев Г.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Лазер на парах бромида меди малой мощности // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 11. – С. 890–894.
5. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах металлов и их соединений // Квантовая электроника. – 1997. – Т. 24. – № 7. – С. 596–600.
6. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 7. – С. 625–629.
7. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 111–114.

Поступила 16.07.2009 г.