

## Лазер на парах иодида меди с внутренним реактором

Д.В. Шиянов<sup>1</sup>, В.Б. Суханов<sup>1</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>2</sup>, Н.Ю. Ткаченко<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 14.10.2011 г.

Исследованы частотно-энергетические характеристики лазера на парах иодида меди с внутренним реактором со средним объемом активной зоны газоразрядной трубки (диаметр 2 см, длина 50 см). Установлено, что области оптимальных давлений буферного газа Ne 30–40 торр и частот следования импульсов 17–30 кГц соответствуют оптимальным давлениям и частотам гибридных лазеров и стандартных лазеров на парах галогенидов металлов. Область оптимальных рабочих температур CuI-лазера с внутренним реактором меньше, чем у CuVg-лазера, и составляет 450–600 °С. В отличие от обычного лазера на парах галогенида меди, добавка водорода отрицательно влияет на его характеристики. Сравнение выходных характеристик CuI-лазера с внутренним реактором и характеристик CuVg-лазера такого же объема без активных добавок показало, что при одинаковых условиях возбуждения максимальная мощность генерации CuVg-лазера составила 2,8 Вт, а CuI-лазера с внутренним реактором 4,1 Вт.

*Ключевые слова:* лазеры на парах металлов, иодид меди, внутренний реактор; metal vapor lasers, copper iodide, in-built reactor.

### Введение

Лазеры на парах металлов (ЛПМ) надежно рекомендовали себя как эффективные источники когерентного излучения видимого диапазона спектра. Вместе с тем в последнее время все больше внимания уделяется их аналогам:

- низкотемпературным лазерам: на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) и гибридным лазерам;
- высокотемпературным лазерам с улучшенной кинетикой [1, 2].

Конструкция низкотемпературных систем, как правило, проще, чем обычных ЛПМ и ЛПМ с улучшенной кинетикой, а по отдельным выходным характеристикам, в частности КПД, они превосходят их. Коэффициент полезного действия таких лазеров больше 3% [3, 4], а мощность излучения превышает 100 и 200 Вт для ЛПГМ и гибридных лазеров соответственно [3–5]. Область оптимальных частот следования импульсов (ЧСИ) смещена в сторону больших частот (до 50–100 кГц) [6, 7].

Принцип работы ЛПМ с улучшенной кинетикой и гибридных лазеров основан на прокачке через активную среду смеси буферного газа Ne с галогенводородом (HВg или HСl). В первом случае атомы

металла образуются по принципу работы стандартного ЛПМ, а прокачка галогенводорода с буферным газом улучшает его энергетические характеристики. В разряде гибридного лазера происходит взаимодействие галогенводорода с металлом, расположенным в канале газоразрядной трубки (ГРТ) с образованием молекул галогенида металла, дальнейшей их диссоциацией и возбуждением атомов металла. Именно прокачной режим работы этих лазеров ограничивает их широкое практическое применение. На сегодня кроме обычных ЛПМ только ЛПГМ допускают длительную работу в отпаянном режиме. Но существуют определенные сложности, связанные и с работой ЛПГМ. Так, в ЛПГМ необходимо поддерживать оптимальную разность температур контейнеров, из которых рабочее вещество (галогенид металла) подается в активную зону, и рабочего канала. Неконтролируемое изменение температуры одного из источников нагрева может привести к уходу режима работы лазера от оптимального.

В связи с этим остается актуальной задача поиска новых способов получения генерации в парах металлов с тем, чтобы упростить конструкцию прибора, улучшить эксплуатационные характеристики при сохранении высоких выходных параметров.

Нами предлагается новый способ получения генерации в парах металлов, который получил название «лазеры на парах галогенидов металлов с внутренним реактором». Он основан на взаимодействии в разряде галогена (Вg<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>) с кусочками металла, расположенными в канале ГРТ, с дальнейшей

\* Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@trp.ru); Николай Юрьевич Ткаченко (ime@trp.ru).

диссоциацией образованного галогенида металла и возбуждением рабочих атомов. Отличительная особенность такого типа лазеров по сравнению с гибридными заключается в том, что все процессы происходят в отпаянной ГРТ и используется галоген в чистом виде.

Ранее мы сообщали о получении генерации таким способом в ГРТ с малым активным объемом, где в качестве металлов использовались медь, марганец, а в качестве галогенов — иод и бром [8, 9].

В настоящей статье рассмотрены частотно-энергетические характеристики лазера на парах иодида меди с внутренним реактором со средним объемом рабочей зоны ГРТ.

## Техника эксперимента

Исследование характеристик лазера на парах иодида меди с внутренним реактором проводилось с ГРТ диаметром 2 см и длиной 50 см (рис. 1).

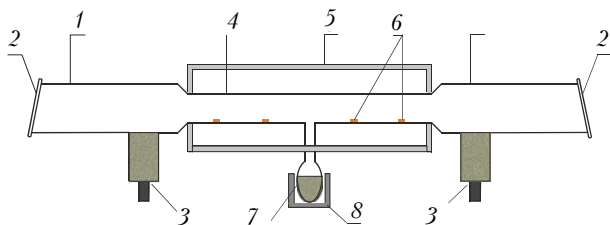


Рис. 1. Конструкция ГРТ на парах иодида меди с внутренним реактором: 1 — кварцевая трубка; 2 — выходные окна; 3 — электроды; 4 — рабочий канал; 5 — нагревательный элемент рабочей зоны; 6 — кусочки меди; 7 — отросток с иодом; 8 — нагревательный элемент

В канал ГРТ 4 равномерно загружались шесть кусочков меди 6 в виде пластин (15×5×1 мм). Поскольку иод находился в твердой фазе, то он непосредственно помещался в отросток 7. Для создания необходимого давления паров иода в рабочей зоне использован нагреватель 8, который позволяет поддерживать температуру отростка с иодом 7 на определенном уровне с высокой точностью. В качестве буферного газа в экспериментах использовался неон. Температура стенки ( $T_{ст}$ ) ГРТ контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары, температура отростка 7 — ртутным термометром.

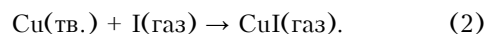
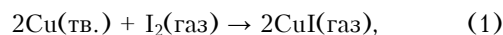
Накачка активного элемента осуществлялась по традиционной схеме прямого разряда рабочей емкости типа КВИ на ГРТ через тиратрон ТГИ 1-1000/25 на частотах до 20 кГц и таситрон ТГУ 1-1000/25 на частотах свыше 20 кГц.

Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока Pearson<sup>TM</sup> 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy Wave Jet 324. Импульсы излучения фиксировались с помощью ФК-19. Мощность излучения измерялась измерителем Ophir 20C-SH. Исследовались зависимости мощности генерации от давления буферного газа, частоты сле-

дования импульсов, температуры контейнера с иодом, температуры стенки ГРТ, мощности накачки и от добавки водорода.

## Результаты эксперимента

Кинетика образования галогенидов, их диссоциация и возбуждение атомов металла заключаются в следующем. При нагреве отростка с галогеном по поверхности металла происходят реакции с образованием галогенида металла по типу

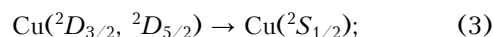


Затем происходят диссоциация молекулы CuI электронным ударом на металл Cu и галоген I и дальнейшее возбуждение атома Cu в соударениях с электронами на верхний резонансный лазерный уровень  $\text{Cu}(^2P_{3/2}, ^2P_{1/2})$ .

В межимпульсный период происходит релаксация активной среды:

1) девозбуждение метастабильных атомов металла  $\text{Cu}(^2D_{3/2}, ^2D_{5/2})$  в соударениях с медленными электронами в основное состояние  $\text{Cu}(^2S_{1/2})$ ;

2) диффузия с последующей дезактивацией метастабильных атомов на стенке ГРТ



3) образование исходной молекулы галогенида металла путем окислительной реакции типа



Исследование зависимости мощности от ЧСИ проводилось для разных давлений буферного газа: 10, 20, 30, 40 и 50 торр при постоянной температуре стенки ГРТ 600 °С. На рис. 2, а представлена частотная зависимость выходной мощности (5–20 кГц) при использовании тиратрона, а на рис. 2, б — с таситроном (15–100 кГц) в качестве коммутаторов.

При увеличении ЧСИ рабочую емкость приходилось уменьшать от 2777 пФ на 5 кГц до 825 пФ на 20 кГц (рис. 2, а). Рабочая емкость уменьшалась от 825 пФ на 15 кГц до 200 пФ на 100 кГц (рис. 2, б).

Результаты эксперимента показали, что наилучшие энергетические характеристики реализуются в схеме накачки с тиратроном, который позволял формировать импульсы накачки с более крутыми фронтами, чем в схеме накачки с таситроном. Оптимальная область давления буферного газа Ne, как и в гибридных лазерах, составила 30–40 торр. Максимальная мощность генерации 4,1 Вт с КПД 0,4% соответствует частоте 17,5 кГц. В целом область оптимальных ЧСИ 17–30 кГц соответствует частотам стандартных ЛППГМ и гибридных лазеров.

Для наглядности на рис. 3 приведены осциллограммы импульсов тока, напряжения и генерации для разных ЧСИ.

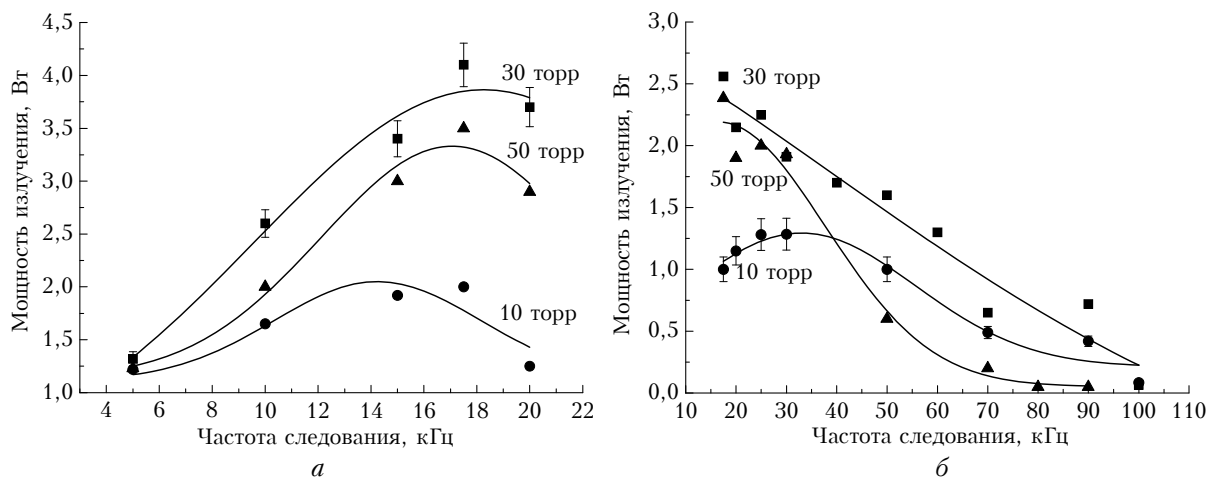


Рис. 2. Зависимость мощности генерации от частоты следования импульсов лазера на парах иодида меди с внутренним реактором: *a* – в качестве коммутатора используется тиратрон, *б* – таситрон

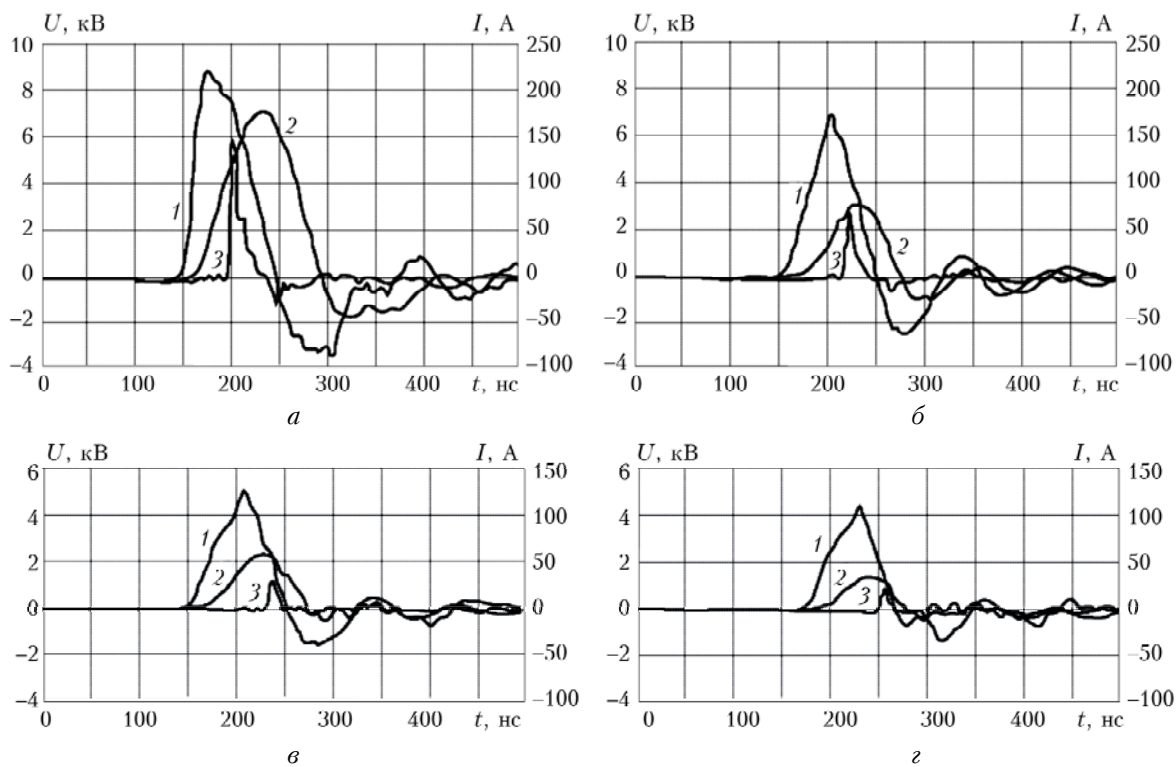


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения 1, тока 2 и генерации 3 на частотах 20 (*a*), 50 (*б*), 70 (*в*) и 90 кГц (*г*)

Определение оптимальной концентрации иода показало, что оптимальная мощность излучения лазера при мощности накачки 500 Вт, емкости 825 пФ и  $T_{ст} = 600^\circ\text{C}$  лежит в области  $80^\circ\text{C}$ , что соответствует давлению насыщенного пара иода более 10 торр (рис. 4).

Данные по давлению насыщенного пара иода взяты из [10].

Казалось бы, что при таком высоком давлении галогена будет сложно осуществить пробой ГРТ. В данном случае это можно объяснить поглощением иода электродами, в которые засыпалась медная стружка. Чтобы убедиться в этом, мы стали использовать ГРТ с внешними электродами, т.е. пе-

решили к разряду емкостного типа, как в [11]. Использование внешних электродов исключает возможность контакта реагентов рабочей среды с материалом электродов. Конструкция такой ГРТ показана на рис. 5.

В данном случае лазер эффективно работал при комнатной температуре контейнера с иодом, что соответствует давлению насыщенного пара около 1 торр.

Поведение мощности в зависимости от температуры стенки ГРТ изучалось для двух ЧСИ – 17,5 и 50 кГц (рис. 6). Давление буферного газа составляло 20 торр, а потребляемая мощность в обоих случаях поддерживалась на одинаковом уровне.

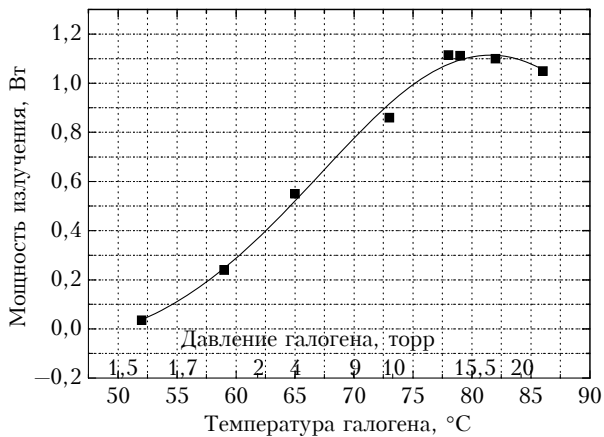


Рис. 4. Зависимость мощности излучения ГРТ от давления пара

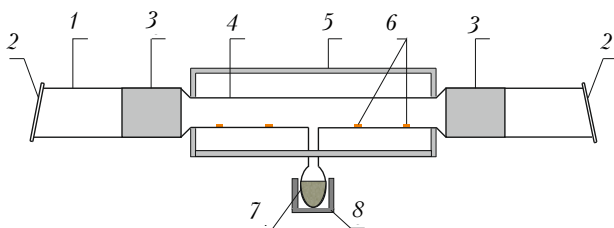


Рис. 5. Конструкция ГРТ с внешними электродами: 1 – кварцевая трубка; 2 – выходные окна; 3 – электроды; 4 – рабочий канал; 5 – нагревательный элемент рабочей зоны; 6 – металл; 7 – генератор галогена; 8 – нагревательный элемент генератора галогена

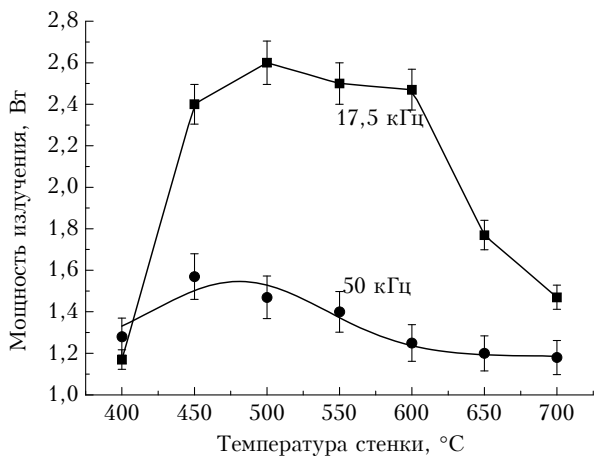


Рис. 6. Зависимость мощности от температуры стенки ГРТ для разных частот следования импульсов

Из приведенных зависимостей видно, что область оптимальных рабочих температур лазера на парах иодида меди с внутренним реактором ниже, чем для широко распространенных CuVg и CuHvBID-лазеров (650 °C и выше). Так, например, для частоты 17,5 кГц она лежит в пределах 450–600 °C. Скорее всего, это связано с тем, что энергия диссоциации молекулы CuI меньше, чем CuVg, CuCl [12], и при этих температурах иодид меди достаточно хорошо разлагается термически наряду с электронным ударом.

На рис. 7 показана зависимость выходной мощности от мощности накачки при давлении Ne 20 торр и температуре стенки ГРТ 600 °C и разных ЧСИ. Аналогичная картина с насыщением мощности наблюдалась ранее для CuVg-лазера [13].

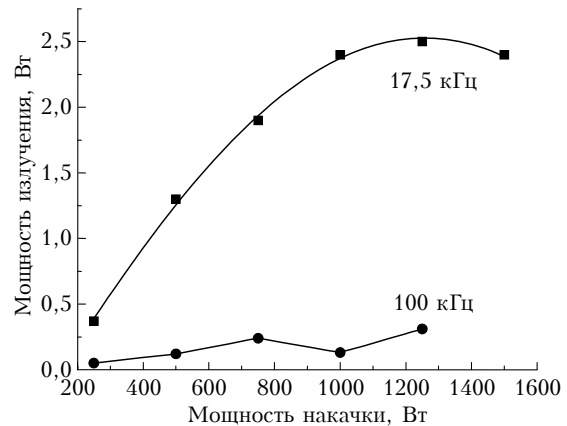


Рис. 7. Зависимость мощности излучения от мощности накачки для разных ЧСИ

Как известно, добавки водорода, галогенводородов в активную среду CuVg-, CuCl-лазеров значительно увеличивают их энергетические характеристики [1, 2, 7]. При этом происходят типичные изменения в формах импульсов напряжения и тока – появляется задержка, которая увеличивается с ростом концентрации добавки. Однако стоит отметить, что, как показано в работе [14], водород мало влияет на характеристики обычного CuI-лазера.

С целью выяснения влияния H<sub>2</sub> на энергетику лазера на парах иодида меди с внутренним реактором добавки водорода разного давления вводились в активную зону исследуемого лазера. Эффект оказался отрицательным. С увеличением добавки мощность генерации падала. Без водорода она достигала 2,6 Вт, а с добавкой H<sub>2</sub>, равной 0,3 торр, составила 0,3 Вт. При этом в электрических импульсах происходили присущие ЛПГМ изменения. На рис. 8 показаны импульсы напряжения, тока и генерации при разных давлениях водорода.

Если учесть, что основную роль в улучшении характеристик играет не сам водород, а электроотрицательная молекула галогенводорода, которая снижает предимпульсную плотность электронов, то можно констатировать, что молекула HI по сравнению с молекулами HBr и HCl обладает самой слабой химической связью и очень неустойчива в исследуемом диапазоне температур. Это отмечается в работе [14]. Как следствие, концентрация HI в рабочем объеме, по-видимому, очень мала.

Таким образом, исследуемый лазер на парах иодида меди с внутренним реактором показал стабильную работу при разных условиях накачки. Сравняя его энергетические характеристики с характеристиками CuVg-лазера такого же объема, исследуемого нами ранее, можно отметить, что без добавок H<sub>2</sub> CuVg-лазер при аналогичных условиях накачки генерировал с мощностью порядка 3 Вт, по сравнению

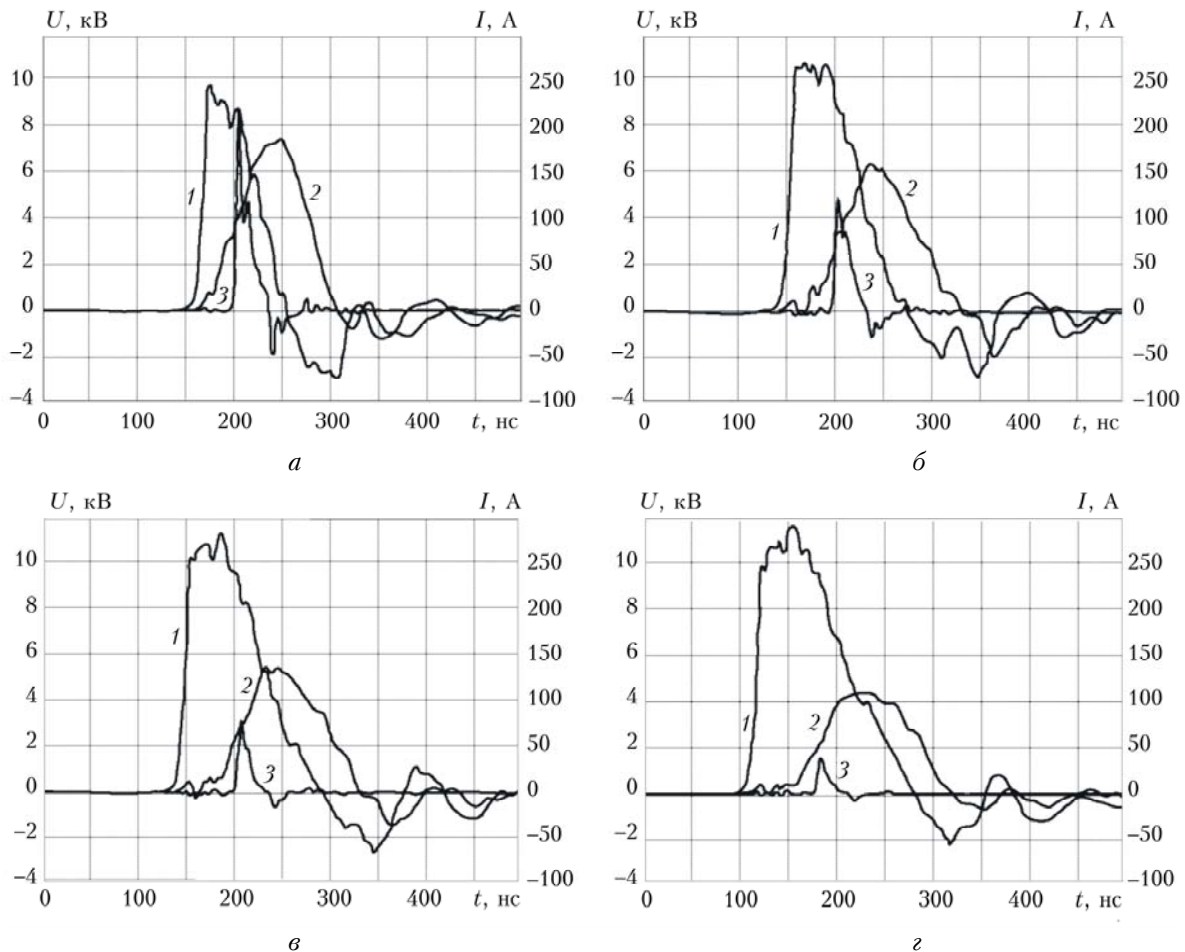


Рис. 8. Импульсы напряжения 1, тока 2 и генерации 3 в зависимости от давления вводимого водорода: а – без добавки  $H_2$ ; б – 0,1 торр  $H_2$ ; в – 0,2 торр  $H_2$ ; г – 0,3 торр  $H_2$

с 4 Вт в исследуемом лазере. Однако добавки водорода в активную зону CuVg-лазера значительно увеличивают его характеристики (рис. 9). «Отрицательный» эффект добавок водорода в лазер на парах иодида меди с внутренним реактором требует дальнейших исследований.

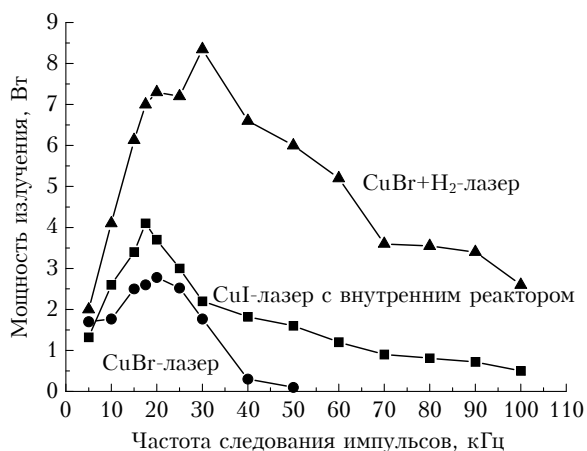


Рис. 9. Сравнение частотных характеристик CuI-лазера с внутренним реактором и стандартного CuVg-лазера при одинаковых условиях накачки. Диаметр трубок 2 см, длина 50 см

Дополнительным преимуществом лазера на парах иодида меди с внутренним реактором является снижение времени выхода лазера на рабочий режим (до 5 мин).

### Заклучение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что активные элементы ЛПГМ с внутренним реактором, работающие в режиме «генератора солей» с наработкой солей металлов непосредственно в активной зоне ГРТ во время работы лазера, будут обладать следующими преимуществами перед известными аналогами:

- простота и безопасность в получении безводных галогенидов (в обычных лазерах на галогенидах металлов рабочее вещество готовится отдельно и потом загружается в ГРТ);

- возможность регулирования паров галогена с низкой температурой до 150 °С, что гораздо ниже температуры контейнеров с галогенидом металла в обычных ЛПГМ – 450–550 °С;

- возможность получения любых солей в одной ГРТ;

- сокращение времени выхода лазера на рабочий режим;

в отличие от гибридных лазеров, ЛПМ с внутренним реактором галогенида металла имеют возможность работать в отпаянном режиме;

при условии жесткой фиксации металла в рабочей зоне, например в виде колец, ГРТ могут работать в вертикальном положении, поскольку отсутствует жидкая фаза галогенида металла, как в обычных ЛПМ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Госзадание № 7.586.2011.

1. *Little C.E.* Metal Vapour Lasers. Physics, Engineering & Applications. UK, Chichester: John Willey & Sons Ltd., 1998. 620 p.
2. *Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И.* Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. В 2 т. Т. 1 / Под ред. В.М. Батенина. М.: Физматлит, 2009. 544 с.
3. *Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirikov 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, N 5. P. 705–709.
4. *Jones D.R., Maitland A., Little C.E.* A high-efficiency 200 W average power copper HBr laser // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30, N 10. P. 2385–2390.
5. *Le Guyadec E., Coutance P., Bertrand G., Peltier C.* A 280-W average power Cu-Ne-HBr laser amplifier // IEEE J. Quantum Electron. 1999. V. 35, N 11. P. 1616–1622.
6. *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф.* Лазер на парах бромиды меди с высокой частотой следования импульсов // Квант. электрон. 2002. Т. 32, № 8. С. 680–682.
7. *Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А.* Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 276 с.
8. *Shiyarov D.V., Sukhanov V.B., Gubarev F.A., Andrienko O.S.* Metal vapor lasers with the in-built reactor of metal halide: Abstracts // Int. Conf. "Atomic and Molecular Pulsed Lasers." Tomsk, Russia, September 14–18, 2009. P. 35–36.
9. *Шиянов Д.В., Суханов В.Б.* Особенности работы ЛПМ с внутренним реактором галогенида металла: Тезисы докл. // Лазеры на парах металлов. Лоо, 20–24 сентября 2010 г. С. 96.
10. *Стэлл Д.Р.* Таблицы давления паров индивидуальных веществ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 71 с.
11. *Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyarov D.V.* CuBr Laser Excited by a Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE J. Quantum Electron. 2009. V. 45, N 2. P. 171–177.
12. *Свойства элементов* / Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
13. *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б.* Влияние масштабирования вводимой мощности на характеристики CuBr+Ne- и CuBr+Ne+H<sub>2</sub>-лазеров // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 221–223.
14. *Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г.* Влияние добавок водорода на работу лазера на иодиде меди // Квант. электрон. 1998. Т. 25, № 7. С. 616–618.

*D.V. Shiyarov, V.B. Sukhanov, G.S. Evtushenko, N.Yu. Tkachenko.* **CuI vapor laser with in-built reactor.**

Pulse and power parameters of a CuI laser with in-built reactor have been studied. The gas discharge tube was of 2 cm in diameter and 50 cm in length. The ranges of optimal pressure of the buffer gas and pulse repetition rate are 30–40 torr and 17–30 kHz, respectively, which corresponds to parameters of hybrid and conventional metal-halide vapor lasers. It has been ascertained that the range of optimal working temperatures of a CuI laser with in-built reactor is lower than of a CuBr laser and equal to 400–600 °C. In contrast to conventional cuprum-halide vapor lasers, addition of hydrogen adversely affects the laser parameters. Comparison of the laser generation parameters with those of a CuBr laser of the same volume without active impurities has shown that the maximum generation power is equal to 2.8 W for a CuBr laser and 4.1 W for a CuI laser with in-built reactor.