

УДК 621.373.826

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ВОДОРОДА НА ЧАСТОТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CuBr-ЛАЗЕРА

Д.В. Шиянов\*, Г.С. Евтушенко\*\*, В.Б. Суханов\*, В.Д. Бочков\*\*\*, В.Н. Кудинов\*\*\*

\*Институт оптики атмосферы СО РАН. г. Томск. E-mail: qel@asd.iao.ru

\*\*Томский политехнический университет. г. Томск. E-mail: ime@tpu.ru

\*\*\*"Импульсные технологии". г. Рязань. E-mail: info@pulsotech.ru

Представлены результаты экспериментального исследования лазера на парах бромиды меди с добавками водорода. Добавки водорода в разряд осуществлялись от специального генератора  $H_2$ . Показано, что введение малых добавок водорода ( $< 0,5\%$ ) приводит к существенному увеличению частоты следования импульсов излучения, КПД и средней мощности CuBr-лазера.

### Введение

Одно из важнейших преимуществ импульсно-периодических лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) – возможность работы при температурах активной среды на 1000 К ниже, чем температура среды ( $\sim 1800$  К) в лазерах на парах чистых металлов (ЛПМ). Это существенно упрощает и удешевляет конструкцию активного элемента, а выходные характеристики ЛПГМ не уступают характеристикам ЛПМ. В частности, лучшие генерационные характеристики для импульсно-периодических лазеров видимого диапазона получены для лазера на бромиде меди с добавками водорода и его аналога – гибридного лазера (CuHyBrID-laser), поскольку водородные добавки значительно увеличивают выходные параметры этих лазеров за счет изменения кинетики активной среды в сторону благоприятную для накачки рабочих состояний. Однако, существует проблема удержания  $H_2$  в активной среде отпаянного лазера длительное время, так как его количество со временем уменьшается. Вместе с тем, именно с ЛПГМ получены наибольшая эффективность генерации – более 3% [1], при высокой средней мощности (более 100 Вт) [2] и удельная мощность (до 2 Вт/см<sup>2</sup>) [3], самая высокая частота повторения импульсов генерации – 300 кГц [4]. На сегодняшний день ЛПГМ уступают ЛПМ только по суммарной средней мощности излучения, снимаемой с одного активного элемента.

Известно, что дальнейшее увеличение мощности генерации ЛПГМ связано с реализацией высоких частот следования импульсов излучения и увеличением энергосъема в газоразрядных трубках (ГРТ) больших объемов. Это открывает новые области их применения, например, при исследовании быстротекущих процессов, записи голограмм, в медицинских приложениях и т.д.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Наряду с тем, что водородные добавки улучшают выходные параметры CuBr-лазеров они также и увеличивают область оптимальных частот следования импульсов генерации. Поэтому мы поставили задачу, используя специально разработанные селективные реверсивные натекатели водорода (СРНВ) исследовать влияние добавок  $H_2$  на выходные параметры

CuBr-лазеров, масштабируемых по длине и диаметру активной зоны, а также реализовать практически значимые средние мощности на частотах более 100 кГц в ГРТ среднего объема, без прокачки активной среды. Ранее генератор подобного типа был использован для работы с активным элементом CuBr-лазера, но срок службы данного генератора в химически агрессивной среде не превышал нескольких часов [5]. В данной модификации предусмотрена специальная конструкция на основе селективной мембраны, проницаемой только для водорода и исключающая возможность отравления генератора [6].

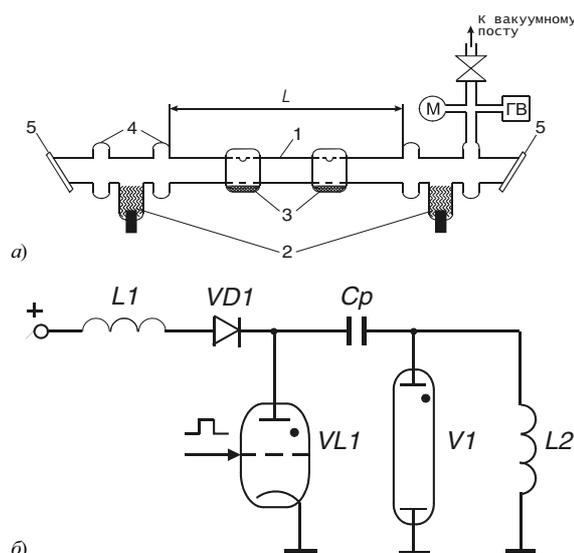
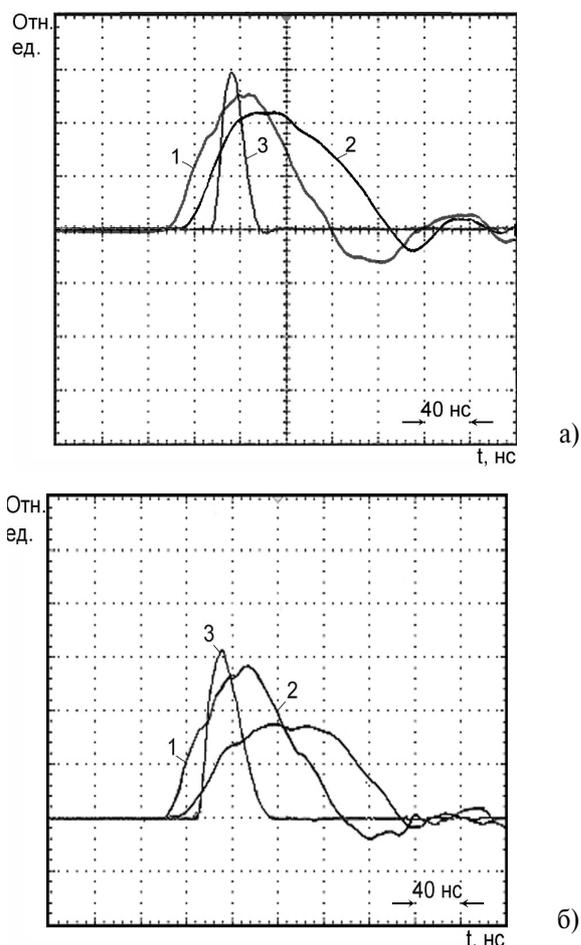


Рис. 1. а) Конструкция ГРТ: 1) рабочий канал ( $L$  – длина активной зоны), 2) электроды, 3) контейнеры с рабочим веществом, 4) ловушки, снижающие степень загрязнения электродов и выходных окон рабочим веществом, 5) выходные окна,  $M$  – манометр,  $GB$  – генератор водорода; б) схема накачки ГРТ:  $L1$ ,  $VD1$  – зарядные индуктивность и диод,  $VL1$  – тиратрон,  $C_p$  – рабочая емкость,  $L2$  – шунтирующая индуктивность,  $V1$  – газоразрядная трубка

Исходя из этого, в холодную зону ГРТ со стороны анода припаявался генератор  $H_2$  и манометр деформационного типа (цена деления шкалы – 0,02 торр) для определения давления вводимого  $H_2$ . Во всех случаях в качестве буферного газа использовался Ne. Упрощенная конструкция ГРТ приведена на рис. 1, а. Для достижения рабочей температуры стенки ГРТ ее

активная зона утеплялась слоем теплоизолятора. Возбуждение газоразрядных трубок производилось разрядом рабочей емкости через тиратрон ТГИ1-1000/25 – рис. 1, б. При исследовании частотно-энергетических характеристик лазеров (среднего диаметра) с частотами следования импульсов более 20 кГц использовался таситрон ТГУ1-1000/25.



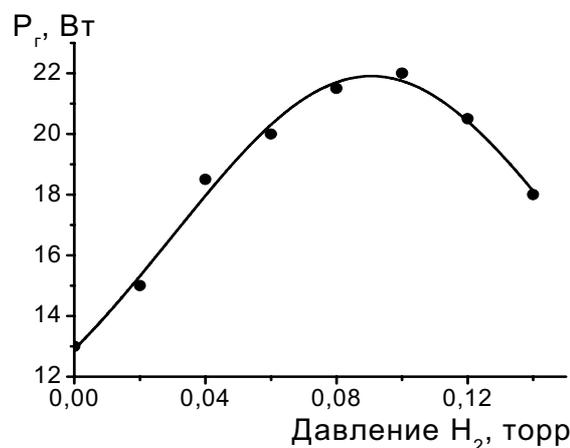
**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов: 1) напряжения, 2) тока и 3) генерации для ГРТ диаметром 3,6 см, длиной 120 см, при частоте следования импульсов накачки 16 кГц: а) разряд в Ne, без добавок  $H_2$  (средняя мощность излучения, суммарная по двум линиям – 13 Вт), б) с добавкой  $H_2$  (мощность излучения – 25 Вт)

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы напряжения на трубке, тока через разрядный промежуток и импульса генерации без добавок водорода к буферному газу и с введенной примесью  $H_2$ . Из осциллограмм видно, что с введением водорода разряд "затрудняется" – нарастание импульса тока "задерживается" относительно приложенного напряжения. Такое изменение электрических характеристик положительно сказывается на выходных параметрах лазера. Длительность импульса генерации увеличивается в 1,5...2 раза, практически в два раза возрастают средняя мощность и КПД лазера. В последнее время влияние добавок на качественном уровне объясняется образованием и присутствием в активной среде этих лазеров электроотрицательных

молекул ( $HBr$ ) с большим сечением диссоциативного прилипания электронов [7]. Это приводит к тому, что, во-первых, в начальные моменты разряда, пока температура электронов невелика, скорость прилипания больше, чем скорость ионизации меди. В результате разряд не может развиваться до тех пор, пока температура электронов не достигнет величины, зависящей от соотношения концентрации атомов меди и молекул добавки. Подбирая концентрацию молекул, можно задержать развитие разряда до момента, при котором преимущественно заселяются верхние лазерные уровни, и избежать чрезмерного заселения нижних уровней. Во-вторых, в межимпульсный период основную роль уже играет не трехчастичная рекомбинация, а прилипание электронов к молекулам с последующей ионно-ионной рекомбинацией. Это приводит к ускорению рекомбинации и быстрому восстановлению населенности основного состояния меди.

Оптимальное давление  $H_2$  определялось следующим образом. ГРТ выводилась на генерацию при давлении буферного газа Ne 30...40 торр. После этого осуществлялась подача  $H_2$  в активную среду лазера и через каждые 0,02 торр добавки фиксировалась мощность излучения.

Данная методика определения оптимальной добавки  $H_2$  с использованием встроенных генератора и манометра показала, что ГРТ диаметром 3,6 см и длиной 120 см достигает максимальной выходной мощности при давлении  $H_2$  0,1 торр (рис. 3). Это значение в 5 раз меньше значения, недавно приведенного болгарскими исследователями для ГРТ аналогичных габаритов [8]. На данный момент непонятна причина такой разницы. Вместе с тем, авторы работы [8] не указывают методику определения давления примеси  $H_2$ . С другой стороны, водород, в качестве неконтролируемой примеси, всегда присутствует в разряде, о чем свидетельствует спектр спонтанного излучения. Вопрос в том, в каком количестве, но очевидно в меньшем, чем введенная добавка.



**Рис. 3.** Зависимость мощности излучения ( $P_r$ )  $CuBr$ -лазера от давления вводимого  $H_2$ . Давление буферного газа Ne = 30 торр

На рис. 4 показана тенденция увеличения мощности излучения CuVg-лазеров при введении в их активную среду добавки  $H_2$  для разных ГРТ. Видно, что увеличение габаритов ГРТ приводит к снижению эффективности влияния  $H_2$  на мощность и, соответственно, КПД лазера. Максимальное увеличение мощности генерации с добавкой  $H_2$  до 5 раз наблюдается в ГРТ с малыми диаметрами ( $\leq 1$  см). Мы связываем это с тем, что увеличение диаметра лазера сопровождается увеличением длины его активной зоны, что требует дополнительного повышения напряжения на разрядном промежутке. А это, в свою очередь, бывает технически сложно реализовать при использовании тиратронов типа ТГИ1-1000/25. Подтверждением данного предположения является то, что дополнительное включение в схему накачки ГРТ с диаметрами 3,6 и 5,3 см импульсного кабельного трансформатора между  $C_p$  и катодом ГРТ привело к дополнительному возрастанию мощности (отмечено звездочками на рис. 4).

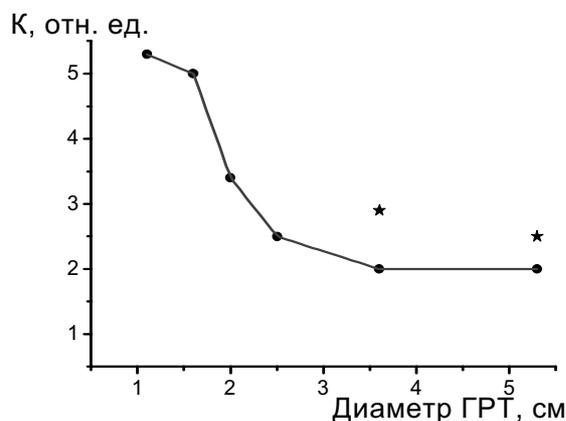


Рис. 4. Зависимость отношения мощности излучения CuVg-лазера при использовании добавки  $H_2$  к мощности без добавки от диаметра исследуемых ГРТ

Исследование частотных свойств CuVg-лазера со средним диаметром ГРТ (2,6 см) показало, что максимальная частота следования импульсов накачки, обеспечиваемая данным коммутатором, без добавок  $H_2$  в ГРТ составляет 130 кГц, причем падение мощности начинается после 30 кГц (рис. 5). Введение добавки  $H_2$  приводит к тому, что максимальная частота достигает 250 кГц, а средняя мощность излучения при этом – 1,5 Вт. При частоте следования импульсов накачки 200 кГц выходная мощность равнялась 3 Вт. Область оптимальных частот следования (таких, при которых выходная мощность максимальна) простирается от 40 до 100 кГц, а далее начинается медленный спад мощности излучения.

Ранее, при исследовании CuVg-лазеров без контролируемых добавок водорода, максимальная выходная мощность достигалась при частотах следования импульсов 16...20 кГц, после чего наблюда-

лось ее снижение. Как показывают результаты этой и других работ по исследованию CuVg+Ne+ $H_2$ -лазера добавки  $H_2$  смещают оптимальное значение частоты в область больших значений не только для ГРТ малых диаметров. Как отмечалось ранее, это объясняется увеличением скорости объемной рекомбинации плазмы.

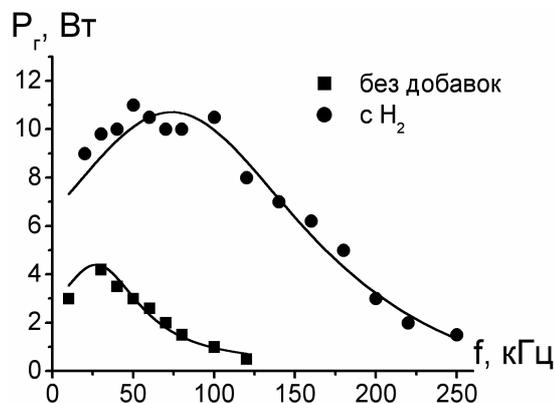


Рис. 5. Частотная зависимость мощности излучения ( $P_r$ ) CuVg-лазера (диаметр 2,6 см, длина 76 см) с добавкой и без добавки  $H_2$

В данном эксперименте лучшее значение КПД (рассчитанного по мощности, отбираемой от выпрямителя) составило 0,7 % при  $f = 50$  кГц и  $P_r = 11$  Вт. Относительно низкое значение КПД связано с тем, что дополнительной оптимизации контура возбуждения не проводилось. Надо также отметить, что полученные  $P_r$  не являются максимальными на данных частотах следования импульсов, а являются значениями, соответствующими стационарному тепловому режиму работы лазера.

### Заключение

Таким образом, использование специально разработанного генератора  $H_2$  (СРНВ) позволило повысить среднюю мощность излучения отпаянных активных элементов CuVg-лазера от 2 до 5 раз, в зависимости от диаметра ГРТ. Мы предполагаем, что эта разница связана с тем, что для ГРТ большого диаметра (и следовательно большей длины) требуется повышать рабочее напряжение на разрядном промежутке, что представляет определенную техническую проблему. Экспериментально установлено, что оптимальная концентрация добавляемого  $H_2$  составляет <0,5 % от давления буферного газа Ne.

Использование таситрона ТГУ1-1000/25 в качестве коммутатора впервые позволило достичь практически значимых значений выходной мощности излучения на частотах накачки свыше 200 кГц. При максимально достигнутой частоте накачки 250 кГц в лазерной трубке диаметром 2,6 см и длиной 76 см мощность излучения составила 1,5 Вт. На частоте 200 кГц – 3 Вт и на частоте 100 кГц – 10,5 Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A high-efficiency 200 W average power copper HyBrID laser // IEEE J. Quantum Electronics. — 1994. — V. 30. — № 10. — P. 2385–2390.
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 // IEEE J. Quantum Electronics. — 1997. — V. 33. — № 5. — P. 705–709.
3. Sabotinov N.V., Little C.E. Copper laser with high average output power // Proc. SPIE. — 1995. — V. 2619. — № 4. — P. 76–83.
4. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой повторения импульсов до 300 кГц // Квантовая электроника. — 1999. — Т. 28. — № 3. — С. 220–222.
5. Marazov O.R., Manev L.G. Externally heated CuBr laser // Optics Communications. — 1990. — V. 78. — № 1. — P. 63–66.
6. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М.О., Климовский И.И. Излучатели лазеров на парах металлов, снабженные генератором водорода с большим сроком службы // Оптика атмосферы и океана. — 2001. — Т. 14. — № 11. — С. 1027–1029.
7. 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.
8. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little L.C., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length // Optics Communications. — 1997. — V. 135. — № 1–3. — P. 289–294.

УДК 541.16:182

## ВЛИЯНИЕ СУСПЕНЗИИ "МОТОРНОЕ МАСЛО+СМЕСЬ НАНОПОРОШКОВ МЕДИ И НИКЕЛЯ" НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРЫ ТРЕНИЯ "УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ - НИЗКОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ"

А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, С.В. Рихерт

Государственное научное учреждение  
"НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете"  
E-mail: labor14@mail2000.ru

*Рассмотрена возможность применения смеси нанопорошков меди и никеля в качестве металлоплакирующей добавки в моторные масла. При небольшой концентрации смеси в масле происходит снижение коэффициента трения и температуры в узле трения, увеличение же ее концентрации приводит к повышению температуры и росту коэффициента трения. Также с ростом концентрации происходит нанесение нанопорошков на поверхности пар трения в виде пленок, что снижает их износ.*

### Введение

Проблема трения и износа существовала всегда и в настоящее время все более обостряется. Машины и механизмы работают во все более жестких условиях и при более высоких скоростях скольжения, при этом материалы подвергаются предельным нагрузкам. Поэтому повышение срока службы пар трения является сложной научной и технической задачей.

Большинство машин (85...90 %) выходят из строя по причине износа деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в процессе ее эксплуатации в несколько раз превышают ее первоначальную стоимость: для автомобилей в 6 раз, для самолетов до 5 раз, для станков до 8 раз.

Одним из направлений повышения срока службы машин является применение металлоплакирующих смазочных материалов (МСМ), при использовании которых на поверхностях пар трения образуются тонкие пленки металлов (сервоитные пленки) [1, 2]. Процесс образования металлоплакирующих пленок был первоначально открыт как "эффект избирательного переноса". Авторами этого открытия Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским было обнаружено, что при трении медных сплавов

о сталь в условиях граничной смазки происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратного ее переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения.

На данный момент разработаны десятки сотен различных металлоплакирующих смазочных составов, с помощью которых можно осуществлять нанесение тонких металлических пленок. Среди этих смазочных составов большой интерес представляют суспензии порошков металлов в маслах [2]. Вместе с тем, применение нанопорошков металлов дает ряд преимуществ по сравнению с более крупными порошками [3, 4]. Во-первых, нанопорошки имеют относительно небольшую скорость седиментации в маслах. Во-вторых, порошки металлов в наносостоянии имеют склонность к спеканию и при существенно меньших усилиях они образуют сплошные пленки. Образование такой пленки и поддержание ее толщины в процессе трения является динамическим процессом: сначала скорость нанесения пленки превышает скорость уноса материала пленки с поверхности. По мере увеличения толщины пленки скорость нанесения уменьшается, а скорость уноса увеличивается до достижения равновесия между ними.