

# Особенности накачки лазера на парах меди и бромида меди

Г.С.Евтушенко\*, И.Д.Костыря\*\*, В.Б.Суханов\*, В.Ф.Тарасенко\*\*, Д.В.Шиянов\*

*Экспериментально исследованы генерация и особенности накачки лазера на парах меди с активным элементом «Кристалл» LT-40Cu (выпускается промышленно) и CuBr-лазера с экспериментальным активным элементом большого объема. Показано, что при средней мощности излучения до 50 Вт КПД лазеров относительно энергии, вложенной в активную среду во время полезной накачки, достигает 4%. Установлено, что стадии полезной накачки центральной части лазерной трубки предшествуют частичный пробой разрядного промежутка и зарядка паразитных емкостей. Отличительной чертой накачки CuBr-лазера по сравнению с Cu-лазером является то, что индуктивность подводов от генератора накачки к активному элементу и индуктивность генератора накачки могут быть увеличены, а средняя мощность излучения при этом не изменится.*

**Ключевые слова:** лазеры на парах меди и бромида меди, накачка, генерация.

## 1. Введение

Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов с момента получения в 60-х гг. первых генераций прошли большой путь развития. Их практическое использование в устройствах дистанционного зондирования атмосферы, в навигационных лазерных системах, батиметрии, прецизионной обработке металлов, в устройствах усиления яркости и др. [1–4] в большой степени определяется реализацией саморазогревного режима работы [5]. Наибольшей эффективностью среди этого класса лазеров выделяется лазер на парах меди (ЛПМ), позволяющий получать мощное излучение с КПД свыше 1% в зеленой (510.6 нм) и желтой (578.2 нм) областях спектра. В настоящее время несколькими фирмами Англии, Франции, США и России изготавливаются промышленные отпаянные активные элементы лазеров на парах меди, которые работают в саморазогревном режиме. В частности, в ГНПП «Исток» (г. Фрязино, Моск. обл.) производятся мощные активные элементы для ЛПМ серии «Кристалл» со средней мощностью излучения (суммарно по обеим линиям) от 20 до 50 Вт и ресурсом до 1000 ч и более [6–7].

Помимо исследования и разработок ЛПМ (с созданием в них необходимого давления паров методом саморазогрева) всегда происходил поиск новых способов введения рабочего вещества в активную зону. Наибольший интерес в настоящее время представляет способ, основанный на диссоциации химических соединений металлов в импульсно-периодическом разряде. Лазеры на парах галогенидов меди (ЛПГМ) имеют ряд преимуществ

перед ЛПМ. В отличие от температуры ЛПМ (1600 °С) их рабочая температура составляет 400–600 °С, что позволяет значительно упростить и удешевить конструкцию лазерных трубок и делает возможным снижение времени выхода лазера на рабочий режим.

Детальное сравнение характеристик ЛПГМ на парах бромида и хлорида меди (CuBr- и CuCl-лазеры) с ЛПМ, имеющими разрядные трубки одинаковых габаритов [8], показало, что CuBr- и CuCl-лазеры не уступают по КПД и мощности излучения лазеру на парах чистой меди. Этот факт стал определяющим в дальнейших исследованиях по созданию наряду с ЛПМ мощных ЛПГМ. Сообщение о CuBr-лазере с мощностью генерации более 100 Вт появилось впервые в работе [9]. Самая высокая мощность излучения, полученная на сегодня с CuBr-лазером, составила 120 Вт с КПД 2.5% при добавлении к основному буферному газу (неону) незначительного количества водорода [10].

Следует отметить, что добавки водорода эффективно (и положительно) влияют не только на выходную мощность и КПД, но и на качество пучка излучения [11]. Уже сегодня реализованы отпаянные варианты CuBr-лазера, в том числе с большим активным объемом, обеспечивающие ресурс работы до 1000 ч [12, 13]. Таким образом, очевидно, что уже в ближайшее время после решения ряда технических проблем ЛПГМ могут составить серьезную конкуренцию ЛПМ, в том числе применительно к задачам разделения изотопов [14].

В настоящей работе экспериментально исследуются особенности накачки ЛПМ повышенной мощности со стандартным активным элементом «Кристалл» LT-40Cu и CuBr-лазера с экспериментальным активным элементом большого объема, допускающим работу в отпаянном режиме. Рабочая частота следования импульсов накачки (10 кГц) была определена техническими условиями использования лазеров в конкретной лазерной системе [15]. Исследовались возможность повышения эффективности работы ЛПМ, особенности накачки Cu- и CuBr-лазеров, а также возможность использования CuBr-ла-

\*Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 4; тел.: (38 22) 25 99 89; факс: (38 22) 25 90 86; e-mail: qel@asd.iao.ru

\*\*Институт силовоточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 4; тел.: (38 22) 25 86 85, (38 22) 25 93 92; факс: (38 22) 25 94 10; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

зера в системах разделения изотопов наряду с Си-лазером.

## 2. Экспериментальная установка и методики измерений тока и напряжения

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Схема генератора накачки аналогична применяемой разработчиками отпаянных промышленных трубок «Кристалл» LT-40Cu. Детальное описание данных активных элементов и схемы накачки приведено в работах [6, 7]. Активная длина разрядной трубки «Кристалл» LT-40Cu  $l = 120$  см, ее диаметр  $d = 2$  см. Разрядная трубка CuVg-лазера имела активную длину 150 см и диаметр 5.8 см. Подробное описание саморазогревного активного элемента CuVg-лазера дано в работе [12]. Эксперименты для обоих активных элементов проведены при потребляемой от электрической сети мощности 3–5.5 кВт и частоте повторения импульсов 10 кГц.

Следует отметить, что рабочая частота 10 кГц оптимальна для Си-лазера, именно при этой частоте достигается максимальная выходная мощность излучения. Что же касается CuVg-лазера, то из данных других авторов [13] и наших предварительных экспериментов по накачке CuVg-лазера от лампового генератора следует, что в диапазоне частот 10–20 кГц средняя мощность излучения практически линейно растет с частотой. Соответственно приводимые ниже мощности излучения близки к максимальным для Си-лазера указанной геометрии и вдвое меньше максимальных мощностей для CuVg-лазера.

Кратко работа генератора накачки выглядит следующим образом. Конденсатор  $C_0$  заряжается от промышленной сети до напряжения 3–10 кВ через выпрямитель, который через индуктивность  $L_1$  заряжает конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Максимальное напряжение зарядки конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  при правильном выборе индуктивности дросселя, емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , а также при малых (для заданной частоты следования импульсов) омических потерях в этой цепи достигает удвоенного зарядного напряжения. При срабатывании тиратрона Т конденсатор  $C_1$  начинает перезаряжаться через индуктивности  $L_2$ ,  $L_3$  и тиратрон Т. Возрастание напряжения на дросселе  $L_4$  приводит к его насыщению и зарядке  $C_3$  от  $C_1$ ,  $C_2$ . Затем наступает пробой лазерной камеры.

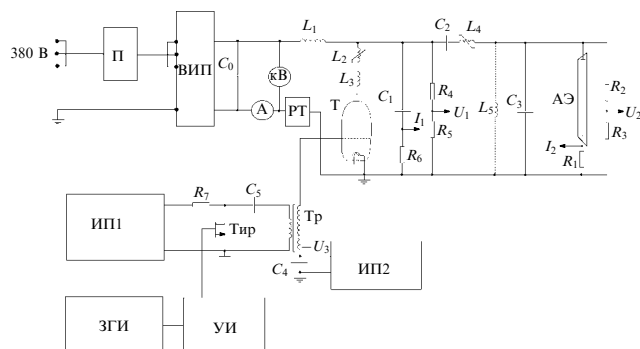


Рис.1. Схема генератора накачки лазера на парах меди: П – пускатель; ВИП – высоковольтный источник питания; РТ – реле тока; Т – тиратрон; АЭ – активный элемент; ИП1, ИП2 – дополнительные источники питания; ЗГИ – задающий генератор импульсов; УИ – усилитель импульсов; Тр – трансформатор; Тир – тиристор;  $U_1$  – напряжение на  $C_1$ ;  $U_2$  – напряжение на АЭ;  $I_1$  – ток через  $C_1$ ;  $I_2$  – ток через АЭ;  $U_3$  – напряжение смещения на сетке тиратрона.

В ряде экспериментов между конденсатором  $C_3$  и лазерной камерой устанавливался дополнительный дроссель  $L_5$ , набранный из 22 ферритовых колец марки М2000НМ1 с размерами 28/16/9 мм. Напряжение зарядки  $C_1$  и  $C_2$  определяется омическим делителем  $R_4$ – $R_5$  или емкостным делителем. Для регистрации тока в цепи конденсатора  $C_1$  используется шунт  $R_6$  или пояс Роговского, а в цепи лазерной трубки – шунт  $R_1$  или также пояс Роговского. Отметим, что ток в цепи конденсатора  $C_1$  до насыщения дросселя  $L_4$  совпадает с током в цепи тиратрона Т. Сигналы с шунтов и делителей подаются на осциллографы, в том числе и на осциллограф Тектроникс ТДС220. Средняя мощность излучения одновременно на зеленой и желтой линиях измеряется калориметром ИМО-2, перед которым установлен ослабитель. Форма импульса излучения определяется с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22.

## 3. Экспериментальные результаты и их анализ

В процессе работы оптимизировались емкости накопительных и обострительных конденсаторов, индуктивности и материал дросселей, а также компоновки лазерной трубки, тиратрона, дросселей и конденсаторов. Оптимизация генератора накачки является многофакторной задачей – необходимо добиваться совместной оптимальной работы всех элементов, причем изменение параметров одного из элементов даже в лучшую сторону может привести из-за рассогласования всей системы к уменьшению средней мощности излучения.

### 3.1. Си-лазер

Наилучшие результаты были получены при следующих параметрах генератора накачки (см. рис.1).

1. Одновитковый водоохлаждаемый дроссель  $L_4$  набран из 51 ферритового кольца марки М2000НМ1 с размерами 28/16/9 мм, трехвитковый дроссель  $L_2$  с воздушным охлаждением – из 6 ферритовых колец с размерами 32/20/6 мм, разделенных двухмиллиметровыми воздушными зазорами. Индуктивность  $L_5 = 380$  мкГн,  $C_1 = 1000$  пФ,  $C_2 = 1940$  пФ,  $C_3 = 300$  пФ. Полученная при этих параметрах мощность генерации на обеих линиях составила 37 Вт при мощности, отбираемой от выпрямителя, 3.9 кВт и частоте следования импульсов 10 кГц. Амплитуда напряжения на трубке равнялась 27.6 кВ, а максимальный ток через трубку – 470 А. Замена магнитного дросселя  $L_2$  с вышеуказанными параметрами водоохлаждаемым одновитковым магнитным дросселем, набранным из 22 ферритовых колец марки М2000НМ1 (размеры 28/16/9 мм), и включение в цепь тиратрона индуктивности  $L_3 = 0.85$  мкГн позволили получить среднюю мощность излучения 40 Вт при мощности от выпрямителя 3.6 кВт. Максимальное напряжение на трубке также составило 27.6 кВ, а максимальный ток через трубку – 460 А. Увеличение или уменьшение емкости обострительного конденсатора  $C_3$  приводило в этом режиме к уменьшению мощности излучения лазера.

2. Одновитковый водоохлаждаемый дроссель  $L_4$  набран из 150 ферритовых колец марки М1000НМ3 размерами 20/10/5 мм, а дроссель  $L_2$  – из 25 таких же колец. Индуктивность  $L_3 = 1.7$  мкГн,  $C_1 = C_2 = 1000$  пФ,  $C_3 = 200$  пФ. Максимальная мощность излучения составила

37.9 Вт при мощности, отбираемой от выпрямителя, 4.8 кВт и частоте повторения импульсов 10 кГц. При включении дополнительного дросселя  $L_5$  средняя мощность излучения равна 39.6 Вт при мощности, отбираемой от выпрямителя, 5.2 кВт.

Полученные параметры соответствуют лучшим параметрам излучения, достигаемым на подобных промышленных трубках при использовании таких схем их разработчиками [6, 7]. Так, средняя мощность излучения, полученная на данной трубке изготовителем (взята из паспорта на трубку), составляет 39 Вт.

Наиболее важным результатом настоящей работы мы считаем обнаруженные нами особенности работы лазера на парах меди, в том числе при включении дополнительного дросселя  $L_5$ . На рис.2 приведены осциллограммы напряжения на лазерной трубке, тока через лазерную трубку и импульса излучения. Изменение импульсов тока и напряжения достигалось за счет вариации параметров электрической схемы генератора накачки. Анализ осциллограмм разрядного тока через трубку показывает, что через 20–50 нс на всех осциллограммах наблюдается уменьшение тока, а затем (приблизительно при максимальном напряжении) начинается его повторное увеличение. Генерация возникает только на спаде импульса напряжения при повторном увеличении тока разряда, даже если первый пик импульса тока примерно равен второму пику тока при появлении генерации (рис.2, б). При уменьшении длительности переднего фронта импульса напряжения провал на импульсе тока становится не столь выраженным, но излучение также начинается на спаде импульса напряжения (рис.2, в).

С изменением напряжения на трубке регистрировалась следующая динамика пробоя газа в трубке. При малых напряжениях наблюдается частичный пробой

лазерной трубки, при котором с ростом подаваемого на трубку напряжения газоразрядная плазма распространяется от потенциального электрода (в данном случае – катода) к аноду. При этом основное свечение разряда сосредоточено у внутренней стенки лазерной трубки. Мы полагаем, что первый пик тока через трубку обусловлен частичным пробоем и связан с зарядкой паразитного конденсатора (паразитной емкости). Одна обкладка этого конденсатора образована плазмой на поверхности центральной трубки из керамики, а также частично на кварцевых выходных патрубках трубки «Кристалл» L-40Cu и на внутренней поверхности внешней керамической оболочки. Вторая обкладка паразитного конденсатора образована внешним цилиндрическим металлическим экраном, в который помещалась лазерная трубка и который является обратным токопроводом.

После зарядки этого конденсатора ток, протекающий через трубку, уменьшается, и его дальнейшее увеличение происходит при пробое центральной части лазерной трубки. Это приводит к спаду напряжения на трубке, росту энерговыклада в активную среду и появлению генерации. Понятно, что полезная накачка начинается только при повторном росте тока через трубку и заканчивается по окончании импульса генерации. Соответственно КПД генерации, рассчитанный относительно энергии, вложенной в плазму за это время, существенно выше. Частичный пробой трубки при зарядке паразитной емкости играет, по-видимому, и положительную роль, обеспечивая за счет подсветки формирование объемного разряда в центральной части трубки.

Сравнение средней мощности излучения, полученной для разных режимов накачки, показывает, что мощность излучения максимальна при уменьшении фронта импульса напряжения на лазерной трубке (рис.2, в). Минимальная длительность фронта импульса напряжения в наших экспериментах составляла около 30 нс, при этом средняя мощность излучения достигала 40 Вт. Однако при сокращении фронта импульса напряжения для стабильной работы лазера надо увеличивать напряжение выпрямителя, что, как правило, приводит к увеличению мощности, отбираемой от выпрямителя, и к увеличению потерь в элементах генератора накачки (дроссели, тиратрон).

Весьма важен вопрос о предельном КПД генерации ЛПМ. В [16] сообщалось о получении на трубке малого размера (диаметр 6 мм, длина 170 мм) физического КПД 9 % при накачке с обрывом энерговыклада после окончания импульса генерации. Однако в этом режиме необходим дополнительный подогрев лазерной трубки. Из результатов настоящей работы следует, что КПД генерации, рассчитанный по осциллограммам напряжения на плазме разряда и тока во время импульса генерации, оказался весьма высоким (~4 %) и на трубках средних размеров (диаметр 20 мм, длина 1200 мм). Существенно более низкие КПД генерации относительно мощности, отбираемой от выпрямителя, обусловлены потерями в генераторе накачки, необходимостью обеспечения нагрева трубки до рабочей температуры и потерями на формирование однородного разряда в центральной части трубки.

### 3.2. CuBr-лазер

Испытания CuBr-лазера проводились при давлении буферного газа (неона) 25 мм рт. ст., в том числе с ма-

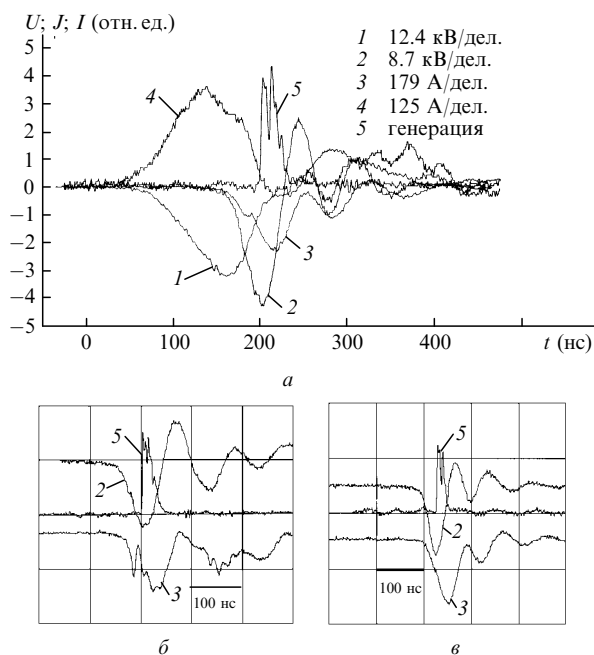


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения  $U$  на дросселе насыщения (1) и на лазерной трубке (2), тока  $I$  через лазерную трубку (3) и через тиратрон (4), а также генерации  $I$  (5) на зеленой и желтой линиях (одновременно) Cu-лазера при  $C_1 = 1000$  пФ (а–в),  $C_2 = 1000$  (а), 1940 (б) и 1000 пФ (в),  $C_3 = 200$  (а, в) и 400 пФ (б); мощность, отбираемая от выпрямителя, составляет 4.4 (б) и 5.2 кВт (в); мощность генерации равна 28 (а) и 38 Вт (б).

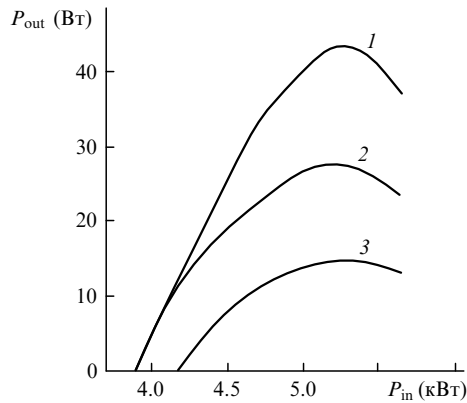


Рис.3. Зависимости для CuVg-лазера средней мощности генерации  $P_{out}$ , суммарной по обеим линиям (1), а также мощности на зеленой (510.6 нм, 2) и желтой (578.2 нм, 3) линиях от отбираемой от выпрямителя мощности  $P_{in}$ .

лыми добавками водорода (от 0.05 до 0.3 мм рт. ст.). В отсутствие водорода при  $C_1 = 820$  пФ,  $C_2 = 1170$  пФ ( $C_3 = 0$ ) и напряжении на источнике питания 8.8 кВ мощность генерации составила 22 Вт (частота 10 кГц). При добавлении водорода (0.2 мм рт. ст.),  $C_1 = 700$  пФ,  $C_2 = 1170$  пФ и напряжении на источнике питания 10 кВ мощность генерации возросла до 48 Вт. При изменении параметров накачки ( $C_1 = 1000$  пФ,  $C_2 = 1940$  пФ,  $C_3 = 300$  пФ, напряжение источника питания 8.4 кВ) мощность генерации составила 35 Вт (прежде всего за счет снижения напряжения). Дальнейшее увеличение парциального содержания водорода в смеси приводит к падению мощности излучения. Установлено, что при добавлении водорода растет задержка импульса тока относительно импульса приложенного напряжения.

Таким образом, малые добавки водорода приводят к тому, что генерация начинается при меньших токах и больших напряжениях. По-видимому, водород (а скорее всего, его соединения, возникающие в разряде) существенно улучшает ситуацию. Это возможно за счет как более быстрой релаксации активной среды CuVg-лазера в межимпульсный период [17, 18], так и положительного действия электроотрицательных молекул (типа HBr) во время импульса возбуждения [18]. Подобный эффект наблюдался ранее для азотного лазера. Так, в [19] было показано, что добавки электроотрицательных газов уве-

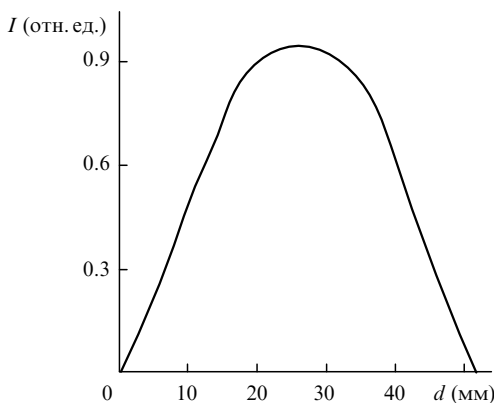


Рис.4. Радиальное распределение суммарной мощности излучения CuVg-лазера при мощности, отбираемой от выпрямителя, 5.2 кВт, частоте следования импульсов 10 кГц, средней мощности генерации 48 Вт,  $C_1 = 700$  пФ,  $C_2 = 1170$  пФ,  $C_3 = 0$ .

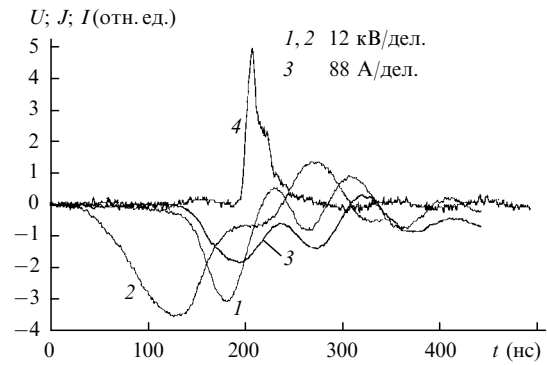


Рис.5. Осциллограммы напряжения на лазерной трубке (1) и на дросселе насыщения (2), а также тока (3) и генерации (4) CuVg-лазера при давлении буферного газа (неона) 25 мм рт. ст. (с добавкой водорода 0.2 мм рт. ст.), напряжении на выпрямителе 8.4 кВ, среднем токе разряда 0.6 А, частоте следования импульсов 10 кГц, средней мощности генерации 35 Вт и  $C_1 = 1000$  пФ,  $C_2 = 1940$  пФ,  $C_3 = 300$  пФ.

личивают время поддержания на разрядном промежутке высокого напряжения (замедляют скорость его спада), что позволяет увеличить длительности полезной накачки и импульса генерации. Данный эффект проявляется в тех лазерах, у которых длительность импульса тока превышает время спада напряжения на лазерном промежутке. Так как время накачки в лазере на бромиде меди увеличивается, то влияние индуктивности генератора возбуждения и индуктивности подводов от генератора к активному элементу уменьшается.

Измерение соотношения мощностей зеленой (510.6 нм) и желтой (578.2 нм) линий (рис.3) показало, что оно изменяется от 3:1 (при мощностях излучения, меньших 0.5 от максимальной) до 2:1 (при максимальной средней мощности). На рис.4 приведено радиальное распределение суммарной мощности пучка при средней мощности излучения 48 Вт (в присутствии водорода). Добавки водорода приводят к перераспределению интенсивности излучения (с явным максимумом свечения на оси разряда), так что при оптимальных добавках водорода (0.2–0.3 мм рт. ст.) эффективный диаметр лазерного пучка уменьшается и составляет  $\sim 0.7d$ . При значительных добавках (более 0.5 мм рт. ст.) происходит контрагирование разряда.

Измерения токов и напряжений показали, что, как и в случае Cu-лазера, наблюдаются два пика тока, первый из которых, по-видимому, также связан с первичным, неполным пробоем трубки и зарядкой паразитной емкости (плазма разряда в приосевой зоне на первой стадии разряда – обратный токопровод), но для CuVg-лазера этот эффект выражен менее ярко. Импульс генерации при этом возникает только после уменьшения напряжения на промежутке (рис.5).

#### 4. Заключение

Экспериментальные исследования накачки и генерации в лазерах на парах меди и бромида меди показали, что при использовании стандартной схемы генератора накачки на основе тиратрона и магнитного ключа полученные средние мощности излучения составляют 40–50 Вт. Суммарная мощность излучения на зеленой и желтой линиях на промышленной трубке «Кристалл» LT-40Cu равна  $\sim 40$  Вт. Включение дополнительного дросселя между лазерной трубкой и обострительным конденсатором

ром позволяет увеличить скорость нарастания напряжения на лазерном промежутке и может увеличить среднюю мощность излучения. Пробой лазерной трубки состоит из двух стадий: в течение первой происходит частичный пробой (при этом осуществляется зарядка паразитных емкостей), а во время второй – пробой центральной части трубки и полезная накачка. Генерация возникает на стадии спада напряжения на трубке при повторном нарастании тока через трубку.

Физический КПД в лазере на парах меди в трубках среднего диаметра весьма высок и достигает 4%. Мы считаем, что дальнейшее увеличение мощности излучения (более чем на 20%) на трубках «Кристалл» LT-40Cu только за счет улучшения генератора накачки проблематично, однако возможно существенное увеличение полного КПД генерации при улучшении теплоизоляции трубки. Так, в наших экспериментах мы стабильно наблюдали увеличение мощности генерации с уменьшением мощности, отбираемой от выпрямителя, при предварительном нагреве трубки. В одном из режимов без дополнительного дросселя  $L_5$  при уменьшении мощности, отбираемой от выпрямителя, с 4.5 до 3.2 кВт за счет уменьшения зарядного напряжения с 6.8 до 6 кВ средняя мощность излучения возросла с 34 до 40 Вт, а практический КПД генерации (по мощности, отбираемой от выпрямителя) составил 1.25%.

Отличие накачки CuVg-лазера от накачки Cu-лазера заключается в менее жестких требованиях к импульсу накачки и в существенно большей длительности импульса генерации. Так, использование схемы накачки без линий сжатия приводит к двукратному снижению мощности Cu-лазера и незначительному (менее 10%) снижению мощности CuVg-лазера (в присутствии водорода). Данный эффект, на наш взгляд, связан с влиянием электроотрицательных газов на электрическое поле в разрядной плазме, как было показано ранее для CuVg- и азотного лазеров. При добавках электроотрицательных газов замедляется спад напряжения на разрядном промежутке, а время поддержания высокой электронной температуры в плазме увеличивается. При этом соответственно увеличиваются время полезной накачки и длительность импульса генерации.

Достигнутые выходные характеристики CuVg-лазера (средняя мощность 48 Вт и практический КПД ~ 1%) не являются максимальными для лазеров этого класса, т. к. они получены при частотах следования импульсов накачки существенно ниже оптимальных. Отметим, что вводимые в разряд погонные мощности (на единицу длины) для лазеров обоих типов близки, а вводимые удельные мощности в единицу объема для CuVg-лазера на порядок меньше, чем для Cu-лазера. Это существенно снижает риск чрезмерной ионизации активной среды. Дальнейшее увеличение выходной мощности и КПД от-

паянных активных элементов CuVg-лазера связано с переходом к более высоким частотам следования импульсов накачки (до 20 кГц) и с решением проблемы сохранения водорода в виде малой контролируемой примеси. Вместе с тем полученная в ходе испытаний наработка (более 100 ч в режиме генерации) и неизменность выходных параметров в отпаянном варианте активного элемента в течение 3 мес. позволяют предположить, что водород в активном элементе связывается в соединении типа HNg и в таком виде не уходит через кварцевую оболочку.

Авторы благодарят директора фирмы «ИЗО» В.И. Держиева за поддержку работы и ее частичное финансирование, а также за предоставление стандартной трубки «Кристалл» LT-40Cu и некоторых элементов линии сжатия. Авторы выражают благодарность В.А.Визирю, В.С. Скакуну, Д.В.Шитцу и В.Ф.Федорову за помощь в проведении экспериментов, Г.Г.Петрашу, С.И.Яковленко – за интерес к работе.

1. Петраш Г.Г. *УФН*, **105**, 645 (1971).
2. Солдатов А. Н., Соломонов В. И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск, Наука, 1985).
3. Little C.E., Sabotinov N.V. (Eds.) *Pulsed metal vapour lasers* (NATO ASI Series, 1. Disarmament Technologies) (Kluwer Academic Publishers, 1996, v. 5).
4. Little C.E. *Metal vapour lasers: physics, engineering & applications* (Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd., 1998).
5. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **16**, 40 (1972).
6. Лябин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 258 (2000).
7. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С. *Изв.вузов. Сер.Физика*, **42**, № 8, 67 (1999).
8. Казарян М.А., Петраш Г.Г., Трофимов А.Н. *Квантовая электроника*, **7**, 583 (1980).
9. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **2**, 1228 (1989).
10. Astadjov D., Dimitrov K., Jones D. et al. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **33**, 705 (1997).
11. Withford M., Brown D., Coutts D., Piper J. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **31**, 898 (1995).
12. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 1053 (2000).
13. Sabotinov N.V., Kostadinov I.K., Bergmann H.W. et al. *Proc. XIII Intern. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference* (Florence, Italy, 2001, v. 4184, p. 203).
14. Anderson R., Warner B., Larson C., Grove R. *Digest of Technical Papers CLEO-81* (USA, 1981, p. 50).
15. Держиев В.И., Кузнецов В.А., Михальцов Л.А. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 771 (1996).
16. Солдатов А.Н., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **8**, 1626 (1995).
17. Withford M., Brown J., Piper J. *Optics Comm.*, **110**, 699 (1994).
18. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 596 (1997).
19. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **46**, 2202 (1976).