

## Испытательный стенд для высокопроизводительного сверхзвукового химического кислородно-иодного лазера\*

Гаурав Сингхал, Мэйнуддин, Р.Раджеж, А.К.Варшней, Р.К.Дохар, Санжив Кумар, В.К.Сингх, Ашвани Кумар, Авинаш К.Верма, Б.С.Арора, М.К.Чатурдеви, Джеймс Садхир, Р.К.Тьяги, А.Л.Давар

*Описан испытательный стенд для химического кислородно-иодного лазера на основе высокопроизводительного струйного генератора синглетного кислорода (СГСК). Создана вертикальная схема получения синглетного кислорода с горизонтальным расположением последующих модулей. Такая конструкция позволяет исследовать сложную структуру потока, а также инженерные аспекты системы с распределенным весом как исходного элемента для мобильных и иных систем платформенного базирования, разрабатываемых в целях увеличения выходной мощности. Исследуемая система является модульной и состоит из двойного ГСК, нагнетательного и сверхзвукового сопел и активной среды, формирующейся в резонаторе. Максимальная скорость потока хлора в лазере составляет  $\sim 1.5$  моль/с, что позволяет получать химическую эффективность  $\sim 18\%$ .*

**Ключевые слова:** химический кислородно-иодный лазер, струйный генератор синглетного кислорода, сверхзвуковой поток.

Выходную мощность сверхзвукового струйного химического кислородно-иодного лазера (ХКИЛ) [1] можно повышать до очень высокого уровня, что представляет как промышленный, так и оборонный интерес. Длина волны излучения лазера (1.315 мкм) позволяет эффективно передавать его по оптоволоконному кабелю, обеспечивая возможность удаленной работы, что актуально в таких случаях, как, например, демонтаж ядерных реакторов [2].

В настоящей работе сообщается о результатах испытания высокопроизводительной сверхзвуковой системы ХКИЛ на основе струйного генератора синглетного кислорода (СГСК). Испытательный стенд (рис. 1) обеспечивает максимальную скорость потока хлора  $\sim 1.5$  моль/с. Длина лазерной головки равна 2.5 м (до выходной апертуры сверхзвукового сопла), ширина – 1.8 м, расстояние от оптической оси до основания составляет 2.1 м. Уникальность системы заключается в вертикальной схеме получения синглетного кислорода, который затем переносится в горизонтальную систему ХКИЛ для более равномерного распределения веса. Исследуются конфигурация модульности и организация потока для высокопроизводительной (мульткиловаттной) ХКИЛ-системы, где используются СГСК, потоки в которых направлены навстречу друг другу.

Для смешения рабочих газов – передающего энергию (синглетный кислород (SO) и буферный газ азот) и излучающего газа (смесь иода и азота в парообразном сос-

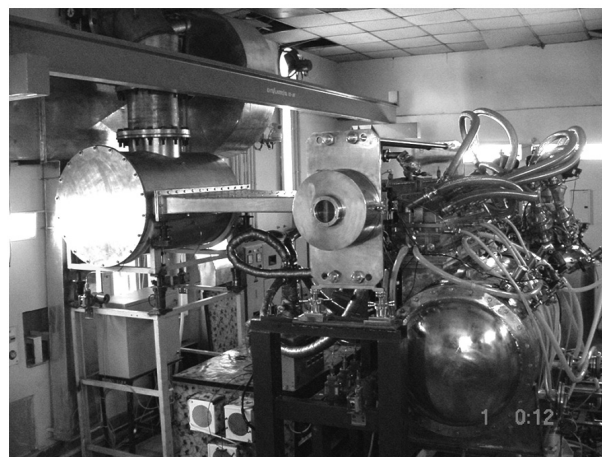


Рис.1. Испытательный стенд высокопроизводительного химического кислород-иодного лазера.

тоянии), применялась сверхзвуковая схема [3, 4]. Пары иода, смешанные с буферным газом азотом, подавались в дозвуковую часть сопла. Сверхзвуковое сопло с выходным сечением  $100 \times 6.7$  см состояло из 46 сопловых лопаток, разделенных на два модуля (расчетное число Маха  $M = 2$ ). Усиливающая среда занимала область длиной 100 см с выходным сечением  $8 \times 8$  см.

В системе использовался СГСК, состоящий из одинаковых генераторов. В нем находятся четыре зоны реакции сечением  $50 \times 3$  см, по две зоны в каждом модуле. Конструкция СГСК детально описана в [5]. В экспериментах использовался раствор основной перекиси водорода (ОПВ) с молярными концентрациями  $M_{\text{кон}} = 6.5$  моль·л<sup>-1</sup> и  $M_{\text{H}_2\text{O}_2} = 7$  моль·л<sup>-1</sup>. В смесительной системе с внутренним диаметром 0.8 м и высотой 1 м было приготовлено примерно 300 л раствора. Фреоновая охлаждающая система была подсоединена к емкости смесителя, служащей для охлаждения раствора и поддержания температуры ОПВ во время работы лазера от  $-18$  до

\* Перевод с англ. В.В.Кошечкиной

Gaurav Singhal, Mainuddin, A.K.Varshney, R.K.Dohare, Sanjeev Kumar, V.K.Singh, Ashwani Kumar, Avinash C.Verma, B.S.Arora, M.K.Chaturvedi, R.K.Tyagi, A.L.Dawar. Laser Science & Technology Centre, Metcalfe House Delhi – 110054, India  
R.Rajesh. Naval Physical and Oceanographic Laboratory (NPOL), Kochi, India

Поступила в редакцию 27 августа 2010 г., после доработки – 16 ноября 2010 г.

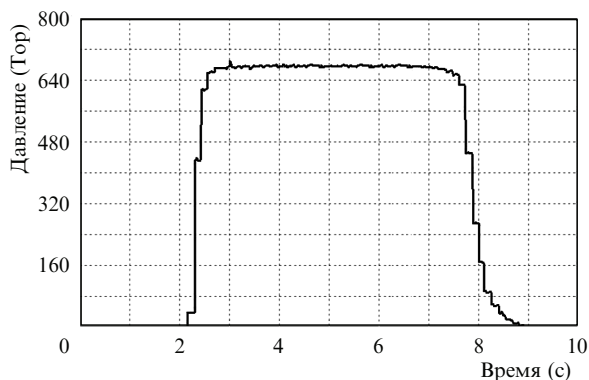


Рис.2. Временная зависимость давления хлора.

–20 °С. Полный цикл подготовки раствора занимал порядка трех часов. Раствор ОПВ подавался в реакционный модуль под действием атмосферного давления и собирался в приемной емкости. Максимальное время работы составляло ~7 с. Рабочий раствор взаимодействовал с потоком газообразного хлора, подающегося в зону реакции из соответствующего модуля. Система подачи хлора представляла собой вертикальный испаритель с байонетным креплением, в котором для испарения жидкого хлора использовался газообразный хлор. В целях безопасности перед подачей в лазерный источник давление газообразного хлора доводилось до давления ниже атмосферного. На рис.2 показано изменение во времени давления хлора в системе. Давление соответствует требуемой скорости потока газообразного хлора, контролируемой с помощью дросселирующих диафрагм. Для обеспечения лазерной генерации длительностью примерно 3 с требуется подавать хлор в течение 5 с.

Давление газа в различных зонах системы измерялось датчиками низкого давления Metran. На рис.3 показаны временные зависимости давления в различных областях системы: в ГСК, на входе и выходе сопла, в активной области и в системе выхлопа. Измеренные давления хорошо согласуются с расчетными значениями.

Число Маха сверхзвукового потока в лазере определялось через известные соотношения для изэнтропического потока газа, а сам метод был взят из работы [6]. Временная зависимость числа Маха, рассчитанная на основе измеренных давлений в активной области и на выходе сопла (рис.3), показана на рис.4. Видно, что число Маха снижается от максимального значения  $M = 2$  почти до 1.5 в течение времени подачи иода, когда происходит генерация лазерной энергии. Это снижение ожидаемо, поскольку во время лазерной генерации внутри резонатора выделяется большое количество тепла, что приводит к увеличению объема пограничного слоя, а следовательно, к уменьшению числа Маха.

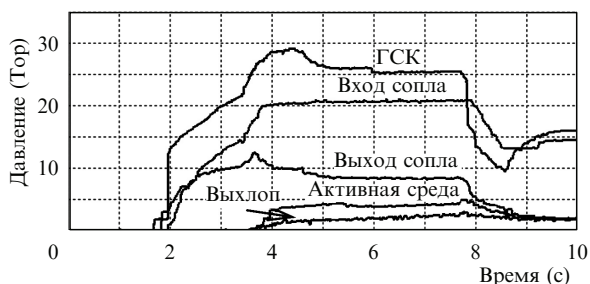


Рис.3. Временные зависимости давления в различных зонах ХКИЛ.

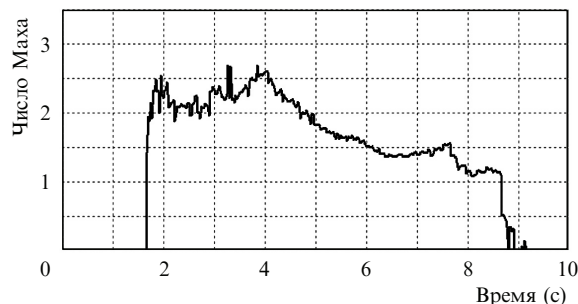


Рис.4. Временная зависимость числа Маха.

Система подачи иода состоит из четырех испарителей, каждый из которых имеет длину 45 см, ширину 25 см и высоту 7 см, заполненных кристаллическим иодом при температуре 350 К (поддерживается при помощи электроподогрева). Концентрация молекул иода контролировалась по измерению их поглощения [7] на длине волны 499.5 нм. Измерительная система состоит из вольфрамовой лампы, интерференционных фильтров, коллимирующей и собирающей оптики и кремниевого фотодетектора.

Временные зависимости скорости потока иода и давления инжектируемого иода показаны на рис.5 и 6. Средняя скорость потока иода во время лазерного импульса составляет ~29 ммоль/с, что соответствует отношению концентраций иода и кислорода, близкому к 2%. Первоначальный всплеск на кривых обусловлен открытием клапана с иодом, когда его пары вместе с газом-носителем расширяются в вакуум. Достигнуто давление иода 150 Тор, что хорошо согласуется с расчетным значением для получения требуемого параметра  $\pi$ -проникновения в диапазоне 0.8 – 1.0.

Отработанные газы поступают в ресиверы объемом 150 м<sup>3</sup> через модульный сверхзвуковой диффузор прямого рассеяния [8], восстанавливающий давление до 7–8 Тор. После нейтрализации газы выводятся в атмосферу.

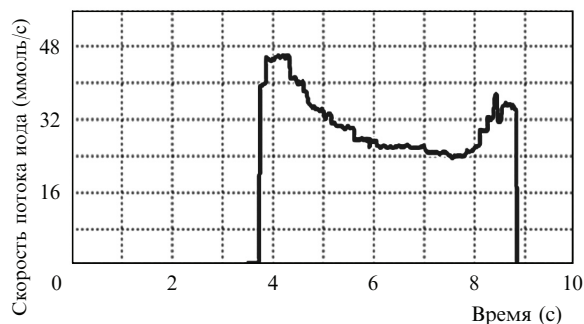


Рис.5. Временная зависимость скорости потока иода.

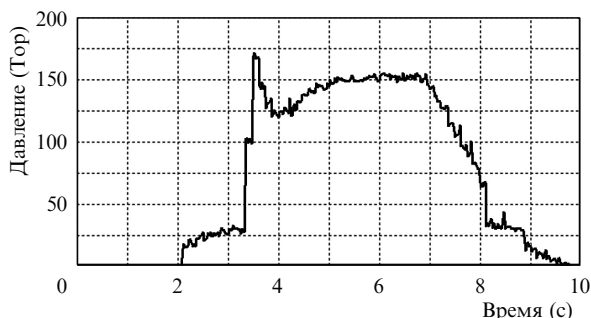


Рис.6. Временная зависимость давления паров инжектируемого иода.

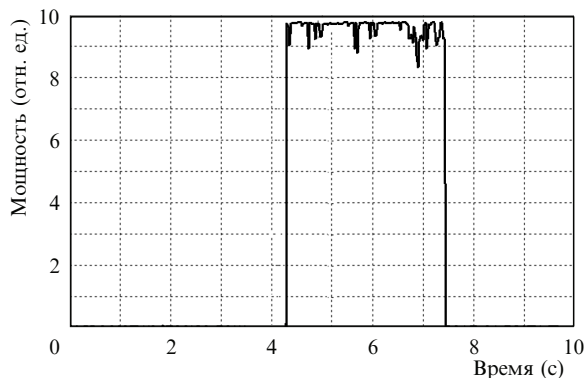


Рис.7. Временная зависимость мощности генерации ХКИЛ.

Испытательный стенд системы ХКИЛ управлялся системой контроля и сбора данных, позволяющей работать удаленно. Эта система управляет рабочими устройствами, следит за их состоянием, а также записывает и обрабатывает сигналы датчиков и контрольных устройств. Во время экспериментов система накапливает и запоминает все экспериментальные параметры для последующего анализа.

Энергетические параметры сверхзвукового ХКИЛ исследовались в устойчивом (плосковогнутом) резонаторе.

Диаметр зеркал составлял 125 мм, радиус кривизны глухого зеркала – 10 м, пропусканием выходного плоского зеркала было равно 10 %. Форма лазерных импульсов регистрировалась при помощи германиевого фотодетектора (рис.7). Для оценки мощности использовался калориметрический конус. Химическая эффективность ХКИЛ при номинальной скорости лазерного потока составляла в среднем 18 %.

1. Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Куприянов Т.Л., Николаев В.Д., Свистун М.И., Ерасов Н.В. *Квантовая электроника*, **18**, 826 (1991).
2. Endo M., Tei K., Sugimoto D., Nanri K., Uchiyama T., Fujioka T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 232 (2001).
3. Endo M., Nagatomo S., Takeda S., Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Fujii H., Wani F., Sugimoto D., Sunako K., Nanri K., Fujioka T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** 393 (1998).
4. Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Svistun M.I., Safonov V.S., Ufimtsev N.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2702**, 310 (1996).
5. Rajesh R., Singhal Gaurav, Mainuddin, Tyagi R.K., Dawar A.L. *Opt. Las. Technol.*, **42**, 580 (2010).
6. Mainuddin, Tyagi R.K., Rajesh R., Singhal Gaurav, Dawar A.L. *Measurement Sci. Technol.*, **14**, 1364 (2003).
7. Mainuddin, Beg M.T., Moinuddin, Tyagi R.K., Rajesh R., Singhal Gaurav, Dawar A.L. *Sensors and Actuators B*, **109**, 375 (2005).
8. Singhal Gaurav, Mainuddin, Rajesh R., Tyagi R.K., Dawar A.L. *Opt. Las. Technol.*, **42**, 219 (2010).