

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОДНО-ИОДНОГО ЛАЗЕРА С N₂ И CO₂ БУФЕРНЫМ ГАЗОМ

© 2005 В.Н. Азязов, И.О. Антонов, А.В. Меженин, Н.И. Уфимцев

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

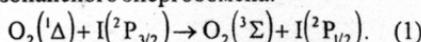
Проведено экспериментальное исследование химического кислородно-иодного лазера с N₂ и CO₂ буферным газом на дозвуковом и сверхзвуковом режимах прокачки активной среды. Показано, что замена традиционно используемого азота на более дешевый углекислый газ не вносит существенных изменений в зависимость выходной мощности от расхода буферного газа. При экспериментальном исследовании энергетических характеристик получена максимальная на сегодняшний день для данного лазера на дозвуковом режиме химическая эффективность 29%.

Введение

Химический кислородно-иодный лазер (ХКИЛ) – это мощный непрерывный химический лазер, работающий на длине волнны 1,315 мкм. Его масштабируемость, высокая эффективность, хорошее качество излучения и длина волны, лежащая в области малых потерь кварцевых волоконных световодов, являются очень привлекательными не только для военных применений, но и для промышленности.

Энергоносителем в ХКИЛ служит синглетный кислород. Он нарабатывается при хлорировании щелочного раствора перекиси водорода (ЩРПВ). Его выход в химической реакции близок к 100%; однако за счет столкновительной дезактивации типичные значения доли синглетного кислорода в общем потоке на выходе современных генераторов синглетного кислорода (ГСК) составляют 60-70%.

Далее в поток синглетного кислорода и первичного буферного газа вводится молекулярный йод с вторичным буферным газом. Доля йода в потоке по отношению к кислороду обычно составляет 1-3%. При смешении часть энергии синглетного кислорода расходуется на диссоциацию I₂ и на преодоление порога лазерной генерации. Оставшаяся часть позволяет инвертировать электронный переход атома йода I(²P_{1/2}) → I(²P_{3/2}) в реакции квазирезонансного энергообмена:



В схеме накачки ХКИЛ дефект энергии между состояниями O₂(¹D) и I(²P_{1/2}) составляет 279 см⁻¹, что соответствует квантовой эф-

ективности 97%. Каждый атом йода много-кратно участвует в рождении лазерных фотонов, что способствует высокой степени извлечения энергии из синглетного кислорода. Основной энергетической характеристикой ХКИЛ является “химическая эффективность”, представляющая собой коэффициент преобразования химической энергии в лазерную. Она определяется как число испущенных фотонов, отнесенное к количеству введенных молекул хлора.

Подобно некоторым другим высоконергетическим лазерам, высокоэффективная работа – наиболее сложная задача для ХКИЛ. Непрерывные ХКИЛ можно классифицировать по следующим параметрам: по режиму работы – на дозвуковые и сверхзвуковые; по режиму смешения – с дозвуковым, околозвуковым или сверхзвуковым смешением первичного и вторичного потоков. В качестве буферного газа используются N₂, Ar, CO₂, He; причем применяется как малая (до 20% от расхода O₂), так и высокая разбавка буферным газом. Вани и др. [1] экспериментально нашли режимы работы дозвукового ХКИЛ с химической эффективностью 20,9% при относительно высоком давлении в резонаторе 6,4 тор с двукратной разбавкой азотом. Охлаждение азота увеличивает химическую эффективность на несколько процентов. Группа Мак-Дермота [2] продемонстрировала работу сверхзвукового ХКИЛ с химической эффективностью 29,6% при разбавке хлора гелием 3:1. Наивысшая химическая эффективность ≈ 33% для сверхзвукового ХКИЛ

была достигнута при смешении кислородного и иодного потоков в сверхзвуковой части сопла с разбавкой хлора азотом от 2:1 [3] до 3:1 [4].

В то же время, в нашей предыдущей статье [5] сообщалось об эффективной работе дозвукового ХКИЛ с малой разбавкой буферным газом. Максимальная химическая эффективность, которая была достигнута, равнялась 23%. Причем впервые был применен CO_2 в качестве буферного газа. Использование CO_2 для ХКИЛ может иметь два основных преимущества: он хранится в жидкой фазе при комнатной температуре и легко удаляется из газового потока криогенным насосом, что упрощает выхлоп отработанных газов в атмосферу. В настоящей работе приведены результаты экспериментального поиска режимов эффективной работы ХКИЛ в зависимости от расхода буферных газов N_2 и CO_2 в области до- и сверхзвуковых скоростей пропарки активной среды.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Синглетный кислород нарабатывался в противоточном струйном ГСК 6 с поперечным сечением реакционной зоны $8 \times 1,2 \text{ см}^2$. Молекулярный хлор вводился в нижнюю часть генератора из двух портов, размещенных в его боковых стенах. ЦРПВ приготавливается в теплоизолированном баке 1 из 3 л раствора перекиси водорода (37%-ного) и 2,3 л раствора KOH с концентрацией 14,5 моль/л. Отвод тепла, выделяющегося во время приготовления раствора и в ходе химической реакции между хлором и компонентами раствора, осуществлялся с помощью теплообменника 2 и рефрижератора 3. Мешалка 5 способствовала более эффективному охлаждению раствора. Температура раствора поддерживалась равной $-8 \dots -14^\circ\text{C}$. Насос 4 обеспечивал непрерывную циркуляцию рабочего раствора. Давление раствора над инжектором струй поддерживалось в пределах 1,1-1,6 атм.

Синглетный кислород нарабатывается в узком приповерхностном слое раствора в химической реакции абсорбированного из газовой фазы молекулярного хлора с ионами NO_2^- . Раз-

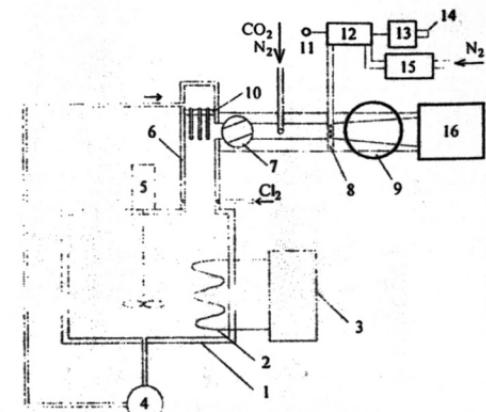


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки ХКИЛ:

- 1 – теплоизолированный бак;
- 2 – теплообменник;
- 3 – рефрижератор;
- 4 – жидкостный шестеренный насос;
- 5 – мешалка;
- 6 – струйный ГСК;
- 7 – щелевой кран;
- 8 – иодный инжектор;
- 9 – резонатор;
- 10 – инжектор струй;
- 11 – источник света;
- 12 – ячейка для измерения I_1 ;
- 13 – монохроматор;
- 14 – фотодиод;
- 15 – парогенератор молекулярного йода;
- 16 – система откачки газов.

витая поверхность контакта фаз газ-жидкость создавалась впрыскиванием в реакционную камеру ГСК струй раствором посредством инжектора 10, который состоял из 153 трубочек из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,8 мм и длиной 27 мм. Концы трубок инжектора располагались ниже выходного сечения генератора во избежание уноса раствора с газовым потоком в тракт откачки. Высота реакционной зоны камеры от места ввода хлора до выходного отверстия была равна 10 см. Расход хлора составлял во всех экспериментах 22 ммоль/с. Объемная скорость откачки в реакционной камере ГСК регулировалась щелевым краном 7.

ГСК и резонатор были соединены трактом из органического стекла с поперечным сечением $10 \times 1,2 \text{ см}^2$ и длиной 7,5 см. На расстоянии 4,5 см от щелевого крана в кислородный поток мог инжектироваться газообразный N_2 или CO_2 (первичный буферный газ). Пары молекулярного йода подавались в кислородный поток инжектором грабельного типа 8, который состоял из 16 вертикально установленных с интервалом 6 мм медных трубок диаметром 2,8 мм. С каждой стороны трубок перпендикулярно кислородному потоку просверлено по 10 отверстий диаметром 0,5 мм с интервалом 1 мм. Вырабатываемый

в парогенераторе 15 газообразный молекулярный йод вместе с несущим его вторичным буферным газом проходил через измерительную ячейку 12 с кварцевыми окнами. Концентрация I_2 определялась по поглощению на длине волны $\lambda=500$ нм проходящего через кювету света от лампы накаливания 11. Фотодиод 14 преобразовывал прошедший через измерительную ячейку 12 и монохроматор 13 свет в электрический сигнал.

В данной работе использовался устойчивый резонатор длиной 64 см с суммарным коэффициентом пропускания зеркал $T=1,3\%$. Применялись 2 пары зеркал: пара №1 – плоское зеркало и сферическое зеркало с радиусом кривизны $R=2$ м; пара №2 – зеркала с радиусом кривизны $R=2$ м (сферическое и цилиндрическое). Диаметр зеркал 4,5 см определял длину активной зоны по потоку. Длина усиления составляла 10 см. Оптическая ось резонатора находилась на расстоянии 5 см вниз по потоку от плоскости ввода йода с вторичным буферным газом. Защитный обдув зеркал проводился буферным газом с расходом 6 ммоль/с. Конфигурация газового тракта в резонаторе определялась начальным сечением щелевого сопла $10 \times 1,1 \text{ см}^2$ и верхней и нижней стенками, расходящимися под углом $\pm 1,5^\circ$ для экспериментов на дозвуковом режиме. Высота канала на оптической оси была равна 1,4 см. Для экспериментов на сверхзвуковом режиме использовалось сопло с начальным сечением $10 \times 1,4 \text{ см}^2$, углами раскрытия $\pm 4^\circ$ и высотой канала на оптической оси 2,2 см.

Двухступенчатая система откачки газов 16 состояла из двух параллельно подключенных двухроторных вакуумных насосов 2ДВН-500 и 2ДВН-1500 и последовательно соединенного с ними плунжерного насоса АВЗ-63Д. Двухроторные насосы действовали поочередно и могли обеспечивать скорость откачки 500 и 1500 л/с. В первом случае в зоне резонатора устанавливался дозвуковой режим течения, а во втором сечение газового тракта в инжекторе I_2 между трубками являлось критическим для сверхзвукового сопла. На второй ступени насос АВЗ-63Д обеспечивал выхлоп отработавших газов в атмосферу. Для утилизации ядовитых компонентов, хлора и йода, перед плунжерным насосом была установле-

на криогенная ловушка. Давление газа в ГСК, промежуточной камере, измерительной ячейке, резонаторе и в трубке Пито, установленной на выходе резонатора, измерялось датчиками давления типа "Сапфир", имеющими погрешность 1%. Измерение выходной мощности проводилось с помощью измерителей мощности LMP-905 и "Ophir Laserstar-R", имеющих погрешность 5%.

Экспериментальное исследование ХКИЛ с N_2 и CO_2 буферным газом

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования дозвукового ХКИЛ. Определение зависимости выходной лазерной мощности от расхода вторичного буферного газа N_2 или CO_2 проводились при следующих условиях. Число Маха дозвукового потока, определенное по показаниям датчика давления при температуре в резонаторе 350 К, равнялось $M=0,9$. Давление в ГСК составляло ≈ 23 тор, а в резонаторе около 2 тор. В промежуточной камере давление изменялось в пределах 4–12 тор. В данных пусках первичный буферный газ не использовался. Резонатор был образован парой зеркал №1. Доля йода находилась на уровне 1,7%. Рис. 2 показывает, что зависимости мощности генерации W от расхода вторичного буферного газа N_2 и CO_2 имеют похожий вид. Они характеризуются наличием пологого максимума в области расходов $G_2=10-15$ ммоль/с и плав-

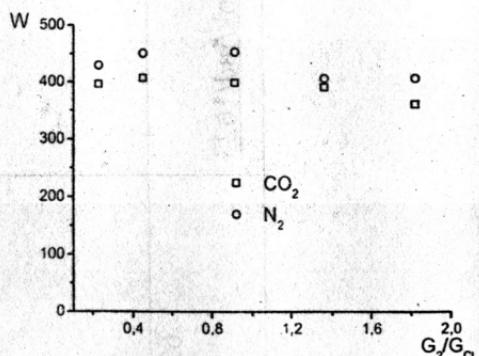


Рис. 2. Зависимость мощности генерации W от расхода вторичного буферного газа G_2 ($G_1=0$) для дозвукового ХКИЛ с CO_2 и N_2 буферным газом

при $p_g=23$ тор, $\eta_{I_2}=1,7\%$, $T=1,3\%$
(пара зеркал №1)

ным спадом значений мощности при увеличении и уменьшении G_2 от этих значений.

Эксперименты с ХКИЛ, работающим в сверхзвуковом режиме, проводились также с резонатором, образованным плоским и сферическим зеркалами. Число Маха, определенное по зависимости от отношения полного давления в резонаторе к статическому, было равным $M=1,5$. Оптимальная доля йода в пусках с N_2 и CO_2 составила $\eta_{I_2} \approx 2,5\%$. Давление в генераторе синглетного кислорода находилось в пределах 24-27 тор, причем росло по ходу пусков из-за загромождения сечения расходной диафрагмы раствором, уносимым из ГСК в виде мелкого аэрозоля. Давление в резонаторе составляло менее 1 тор, а в промежуточной камере менялось в зависимости от расхода вторичного буферного газа в диапазоне 4-9 тор. Во всех пусках расход вторичного буферного газа составлял 5 ммоль/с, а суммарный расход буферного газа в экспериментальных точках на рис. 3 был равен 5, 10, 20, 30 и 40 ммоль/с.

Результаты экспериментов со сверхзвуковым ХКИЛ с CO_2 и N_2 буферными газами, также как и с дозвуковым ХКИЛ, свидетельствуют о сходном характере зависимости лазерной мощности от суммарного расхода этих буферных газов. Максимум лазерной мощности приходится на область расходов буферного газа 5-10 ммоль/с. В целом, результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что при разбавке буферным газом

(вплоть до двукратной по отношению к расходу хлора) применение CO_2 буферного газа по эффективности практически не уступает азоту, особенно при работе на сверхзвуковом режиме.

Эксперименты с целью повышения энергетической эффективности ХКИЛ

Дальнейшие эксперименты проводились с целью увеличения химической эффективности лазера на дозвуковом режиме. В этих пусках первичный буферный газ не использовался, а расход вторичного буферного газа составлял 20 ммоль/с. Оптимизация параметров лазерного резонатора показала, что максимальная мощность достигается при использовании пары зеркал №2 с $R=2$ м. При проведении оптимизации по расходу молекулярного йода была получена зависимость, представленная на рис. 4. Эти данные указывают на наличие максимума лазерной мощности при $\eta_{I_2} \approx 1,6\%$.

При аналогичных параметрах и при давлении в генераторе около 27 тор, в промежуточной камере 3-8 тор, а в резонаторе 1,5 тор было проведено исследование зависимости мощности генерации от расхода вторичного буферного газа. Результаты экспериментов, представленные на рис. 5, говорят о слабой зависимости мощности генерации от расхода буферного газа в области значений 5-25 ммоль/с. При расходе буферного газа 10 ммоль/с

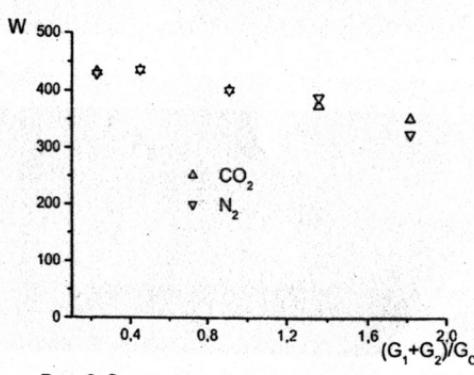


Рис. 3. Зависимость мощности генерации W от суммарного расхода первичного и вторичного буферного газа для сверхзвукового ХКИЛ с CO_2 и N_2

буферным газом при $p_g=24-27$ тор, $\eta_{I_2}=2,5\%$ и $T=1,3\%$ (пара зеркал №1)

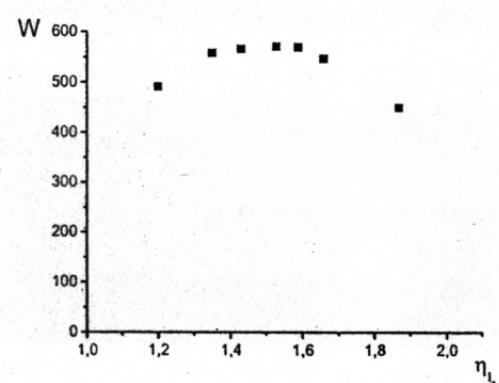


Рис. 4. Зависимость мощности лазерной генерации W от расхода йода для дозвукового ХКИЛ

при $G_1=0$, $(G_2)_{N_2}=20$ ммоль/с, $p_g=27$ тор, $p_r=1,5$ тор, $T=1,3\%$ (пара зеркал №2).

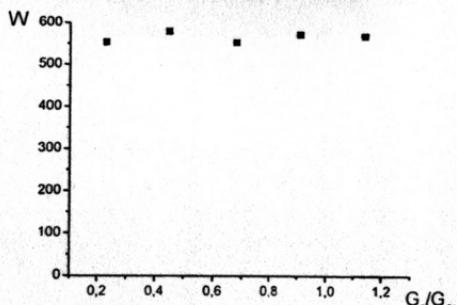


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от расхода вторичного азота для дозвукового ХКИЛ при $p_g=27$ тор, $\eta_{I_2} \approx 1,6\%$ и $T=1,3\%$ (пара зеркал №2).

максимальная мощность генерации составила 581 Вт, что соответствует химической эффективности 29%. На сегодня это максимальная химическая эффективность, достигнутая для дозвукового ХКИЛ.

Заключение

Экспериментальный поиск эффективных режимов работы ХКИЛ показал, что высокую химическую эффективность ($\approx 30,0\%$) можно получить, не используя предварительное охлаждение буферного газа или сверхзвуковое течение газового потока. Результаты исследований ХКИЛ с CO_2 буферным газом говорят о том, что его применение вместо традиционно используемых N_2 и He приводит к заметному ухудшению выходных характеристик лазера. С учетом упомянутых выше достоинств углекислого газа можно существенно снизить стоимость лазерной энергии для промышленных применений.

Полученная нами $\eta_{хим}=29\%$ является

максимальной на сегодняшний день для дозвуковых ХКИЛ. Однако анализ публикаций говорит о том, что доработка параметров ГСК, газового тракта и оптимизация схемы смешения могут способствовать увеличению химической эффективности еще на 5-6%. В частности, можно уменьшить параметр P_t за счет понижения давления и увеличить удельную поверхность у контакта газ-жидкость в ГСК, а также применить охлаждение первичного буферного газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wani F., Endo M., Fujioka T. High-Pressure Subsonic Mode Operation of Chemical Oxygen-Iodine Laser // Applied Physics Letters. 1999. V. 75. № 20.
2. McDermott W.E., Stephens J.C., Vetrovec J. et al. Operating Experience With a High Throughput Jet Generator // AIAA 97-2385, 28th Plasmadynamics and Lasers Conference, Atlanta, GA June 23-25, 1997.
3. Rybalkin V., Katz A., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. et al. A 33% efficient chemical oxygen-iodine laser with supersonic mixing of iodine and oxygen // Applied Physics Letters. 2003. V. 82. № 22.
4. Endo M., Osaka T., Takeda S. High-efficiency chemical oxygen-iodine laser using a streamwise vortex generator // Applied Physics Letters. 2004. V. 84. № 16.
5. Азязов В.Н., Сафонов В.С., Уфимцев Н.И. Эффективная генерация химического кислородно-иодного лазера с малым расходом буферного газа // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 9.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CHEMICAL OXYGEN-IODINE LASER WITH N_2 AND CO_2 BUFFER GAS

© 2005 V.N. Azyazov, I.O. Antonov, A.V. Mezhenin, N.I. Ufimtsev

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The experimental investigation of the chemical oxygen-iodine laser with N_2 and CO_2 buffer gas on subsonic and supersonic modes of the active medium pumping is carried out. It is shown that replacement of traditionally used nitrogen by cheaper carbonic gas does not bring essential changes in dependence of output power on the buffer gas flow rate. At an experimental research of power characteristics, the maximum chemical efficiency of this laser for today on a subsonic mode of 29 % is received.