

Эффективная генерация химического кислородно-иодного лазера с малым расходом буферного газа

В.Н.Аязов, В.С.Сафонов, Н.И.Уфимцев

Продемонстрирована эффективная генерация химического кислородно-иодного лазера (КИЛ) с малым расходом буферного газа при числах Маха $M \leq 1$. Максимальная мощность генерации КИЛ составила 415 Вт при расходе молекулярного хлора 20 ммоль/с, что соответствует химической эффективности $\eta_{ch} = 23\%$. Показано, что замена буферного газа N_2 на CO_2 не вносит существенных изменений в зависимость мощности генерации от степени разбавления активной среды.

Ключевые слова: кислородно-иодный лазер, энергетическая эффективность.

В химическом кислородно-иодном лазере (КИЛ) энергоносителем служит электронно-возбужденный синглетный кислород $O_2(^1\Delta)$. Его получают путем хлорирования щелочного водного раствора перекиси водорода в газожидкостных генераторах. Одним из недостатков данного способа получения $O_2(^1\Delta)$ является присутствие в кислородном потоке паров воды, дезактивирующего электронное возбуждение. Парциальное давление паров воды p_{H_2O} на выходе генератора синглетного кислорода (ГСК) приблизительно равно давлению насыщенных паров H_2O над поверхностью рабочего раствора и составляет обычно несколько торр. Допустимое относительное содержание паров воды в кислороде $\eta_{H_2O} = p_{H_2O}/p_{O_2} \leq 0.05$ [1].

В первых КИЛ синглетный кислород нарабатывался в барботажном ГСК [2–6], где выходное давление кислорода p_{O_2} не превышало нескольких торр. Для уменьшения содержания паров воды до приемлемого значения на выходе ГСК устанавливалась криогенная ловушка паров H_2O . Другой способ достижения приемлемого значения η_{H_2O} заключается в увеличении давления кислорода на выходе ГСК [7]. Успешная работа КИЛ без ловушки паров воды впервые реализована при использовании струйного ГСК [8], в котором давление кислорода на выходе может достигать 100 Тор [9].

Ловушка паров воды существенно усложняет конструкцию КИЛ, однако максимальная химическая эффективность $\eta_{ch} \approx 30\%$ была достигнута на экспериментальных установках с ловушкой паров воды [5, 6] при относительно низких дозвуковых скоростях прокачки газа через резонатор с малым расходом буферного газа. Для получения высокой химической эффективности (25–28%) в КИЛ без ловушки паров воды используется сверхзвуковая прокачка активной среды с разбавлением (однократным и более) активной среды буферным газом

[10]. Это тоже усложняет конструкцию лазера и требует больших расходов буферного газа и дополнительных энергозатрат на прокачку газа и его выхлоп в атмосферу. В связи с этим представляет несомненный интерес поиск режимов работы КИЛ без ловушки паров воды, для которых не требуется больших расходов буферного газа и сверхзвуковых скоростей прокачки активной среды через резонатор. Исследования в данном направлении были начаты в работах [11–13].

В этих режимах максимальная химическая эффективность $\eta_{ch} = 18\%$ была реализована на установках с длиной усиления 5 см при сверхзвуковых скоростях прокачки активной среды [11,12]. Увеличение длины усиления приводит к уменьшению оптимальной концентрации иода и скорости релаксационных процессов. Вследствие этого оптимальная скорость газа, при прочих равных условиях, может сместиться в дозвуковую область. В работе [13] приведены результаты испытаний КИЛ без ловушки паров воды с длиной усиления 10 см при малом расходе буферного газа. Скорость прокачки газа в данном эксперименте составляла 125 м/с и ограничивалась производительностью системы откачки, химическая эффективность $\eta_{ch} = 12\%$. Малое по сравнению с η_{ch} для установок с меньшей длиной усиления значение η_{ch} можно объяснить неоптимальной скоростью газа в резонаторе.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального поиска режимов эффективной и экономичной работы КИЛ без ловушки паров воды с длиной усиления 10 см и малым расходом буферного газа в области околозвуковых скоростей прокачки активной среды.

Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рис.1. Синглетный кислород нарабатывался в противоточном струйном ГСК 6, полностью идентичном использованному в [11,12], с поперечным сечением реакционной зоны 5×1.2 см. Молекулярный хлор вводился в нижнюю часть генератора из двух портов, размещенных в боковых стенках генератора. Щелочной раствор перекиси водорода приготавливался в теплоизолированном баке 1 из 3 л раствора перекиси водорода (37%-ного) и 2 л раствора КОН с концентрацией 14.5 моль/л. Отвод тепла, выделяющегося во время приготовления раствора и в ходе химиче-

Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: asu@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 4 апреля 2002 г., после доработки – 24 июля 2002 г.

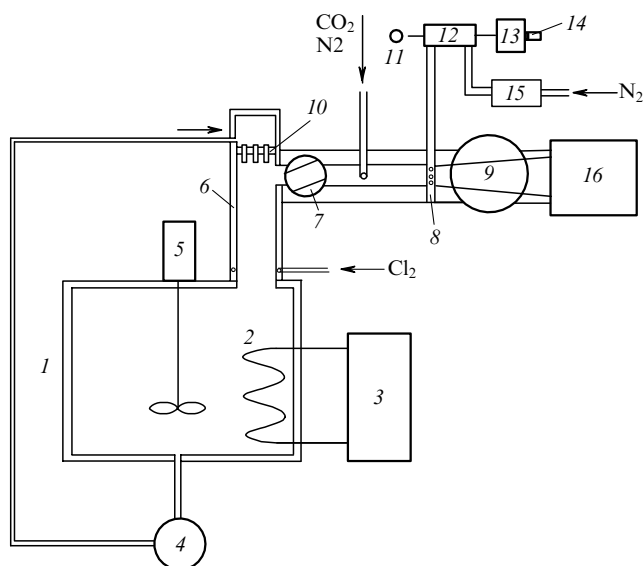


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки КИЛ: 1 – теплоизолированный бак; 2 – теплообменник; 3 – рефрижератор; 4 – жидкостный шестеренный насос; 5 – мешалка; 6 – струйный ГСК; 7 – щелевой кран; 8 – иодный инжектор; 9 – резонатор; 10 – инжектор струй; 11 – источник света; 12 – ячейка для измерения концентрации I_2 ; 13 – монохроматор; 14 – фотодиод; 15 – парогенератор молекулярного иода; 16 – система откачки газов.

ской реакции между хлором и компонентами раствора, осуществлялся с помощью теплообменника 2. В качестве хладагента использовался этиловый спирт, который непрерывно циркулировал и охлаждался в системе, состоящей из теплообменника 2 и рефрижератора 3. Мешалка 5 способствовала более эффективному охлаждению раствора. Температура раствора поддерживалась равной -15°C . Насос 4 обеспечивал непрерывную циркуляцию рабочего раствора. Давление раствора над инжектором струй 10 поддерживалось равным 2 атм.

Синглетный кислород нарабатывается в узком приповерхностном слое раствора в химической реакции абсорбированного из газовой фазы молекулярного хлора с ионами HO_2^- . Развитая поверхность контакта фаз газ–жидкость создавалась впрыскиванием в реакционную камеру ГСК струй раствора посредством инжектора 10, который состоял из 93 трубочек из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0.8 мм и длиной 27 мм. Высота реакционной камеры от места ввода хлора до выходного отверстия была равна 15 см. Расход хлора составлял во всех экспериментах 20 ммоль/с. Объемная скорость откачки в реакционной камере ГСК регулировалась щелевым краном 7.

Табл.1. Результаты испытаний КИЛ.

Расход газов (ммоль/с)			p_g (Тор)	p_r (Тор)	M	W (Вт)	η_{ch} (%)	Литература
G_{Cl}	G_2	G_{I_2}						
20	4.8	0.65	32	0.54	1.3	280	15.5	Настоящая работа (первый режим)
20	5.8	0.27	23	1.25	~ 1	415	23	Настоящая работа (второй режим)
11.6	0.5	0.2	20	1	1.4	190	18	[11]
10	5	0.37	20	1	1.6	163	18	[12]
13.4	–	0.1	25	1.9	0.4	150	12	[13]

Примечания: $G_1 = 0$, G_2 – расходы первичного и вторичного буферного газа; G_{I_2} , G_{Cl} – расходы паров молекулярного иода и хлора; p_g , p_r – давления газа в ГСК и резонаторе; M – число Маха; W – мощность генерации КИЛ.

ГСК и резонатор соединены трактом из органического стекла с поперечным сечением 1.2×10 см и длиной 10.5 см. На расстоянии 3 см от щелевого крана в кислородный поток мог инжектироваться газообразный N_2 или CO_2 (первичный буферный газ). Пары молекулярного иода 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 иод 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, состоящий из двух сферических зеркал радиусом 5 м с суммарным коэффициентом пропускания 1.19%. Диаметр зеркал 4.5 см определял длину активной зоны по потоку. Обдув зеркал проводился буферным газом с расходом 6 ммоль/с. Длина активной зоны вдоль оптической оси равнялась 10 см. Система откачки газов 16 обеспечивала максимальную скорость откачки 1500 л/с. При такой скорости сечение газового тракта в инжекторе I_2 , которое в нашем случае не загромождено трубками, является критическим для сверхзвукового сопла. Давление газа в ГСК, промежуточной камере, измерительной ячейке, резонаторе и в трубке Пито, установленной на выходе резонатора, измерялось датчиками давления типа «Сапфир».

Исследовались два режима работы КИЛ, различающиеся скоростями откачки и конфигурацией газового тракта в резонаторе. В первом режиме объемная скорость откачки составляла 1500 л/с, а газовый тракт в резонаторе, начинающийся после иодного инжектора с поперечным сечением 1.4×10 см, изменял свои размеры за счет верхней и нижней стенок, которые расходились под углом 6° . В экспериментах использовались три положения оптической оси, определяемые расстоянием от места ввода иода $L = 5.5, 7.5$ и 8.5 см. Мощность излучения всегда падала с увеличением L . Максимальная мощность наблюдалась при минимально возможном в наших экспериментах расстоянии $L = 5.5$ см. В табл.1 приведены параметры КИЛ, при которых была достигнута максимальная химическая эффективность в первом

режиме. Обращает на себя внимание высокая скорость диссоциации иода. Низкое давление в резонаторе (0.54 Тор) и малый характерный масштаб смещения (~ 1 мм) обусловили высокую скорость смещения, которая соизмерима со скоростью диссоциации иода и даже превышает ее. По нашим оценкам, время диссоциации I_2 в этом режиме составляет несколько десятых долей миллисекунды, что намного меньше, чем предсказывает широко используемая модель диссоциации, предложенная в [14].

Во втором режиме скорость откачки была уменьшена до 500 л/с и изменена конфигурация газового тракта в резонаторе. В отличие от первого режима начальное поперечное сечение тракта имело размер 1.1×10 см. Верхняя и нижняя стенки расходились под углом 3° . Высота канала на оптической оси была равна 1.4 см. В этом режиме давление в резонаторе поднялось от 0.54 Тор (первый режим) до 1.25 Тор. Относительное содержание молекулярного иода уменьшилось с 3.2 % (первый режим) до 1.3 %. Максимальная мощность излучения в данном режиме составила 415 Вт, что соответствует химической эффективности 23 % (см. табл.1). Для сравнения в табл.1 приведены параметры КИЛ, исследованного в сходных условиях в работах [11–13]. Первичный буферный газ в этих исследованиях не использовался, а вторичный буферный газ азот подавался в малых количествах. Во втором режиме химическая эффективность на 5 % выше (при вдвое меньшем относительном содержании I_2), чем достигнутая в работах [11, 12]. По сравнению с [13] химическая эффективность увеличилась почти в два раза; это указывает на то, что оптимальная скорость газового потока находится в околосвуковой области.

При уменьшении во втором режиме скорости газа в резонаторе до ~ 200 м/с мощность генерации уменьшилась только в 1.12 раза. При скорости газа ~ 150 м/с мощность излучения была в 1.86 раза меньше, чем при околосвуковой скорости (число Маха $M \leq 1$). Скорость газа уменьшалась при постоянном расходе хлора, в результате чего росло давление в резонаторе.

В качестве буферного газа, добавляемого в кислородный поток на выходе ГСК, нами использовался N_2 или CO_2 . С одной стороны, молекула CO_2 слабо тушит электронно-возбужденную молекулу $O_2(^1D)$ и атом $I(^2P_{1/2})$. С другой стороны, она является эффективным тушителем электронно-возбужденного кислорода $O_2(^1\Sigma)$, который может играть активную роль в процессе диссоциации I_2 [15], т. к. как его энергия возбуждения достаточна для развала молекулы иода за одно столкновение. Эксперименты показали, что зависимости мощности излучения КИЛ от степени разбавления (вплоть до двукратного) кислорода первичным азотом или углекислым газом идентичны.

На рис.2 приведена зависимость мощности излучения КИЛ от суммарного расхода буферного газа CO_2 для второго режима. Расход вторичного буферного газа CO_2 оставался в этих экспериментах постоянным: $G_2 = 5.8$ ммоль/с. Видно, что мощность излучения слабо зависит от степени разбавления кислорода углекислым газом. Данный факт указывает на незначительную роль $O_2(^1\Sigma)$ в процессе диссоциации I_2 .

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что возможна эффективная генерация КИЛ с малым расходом буферного газа и иода при $M \leq 1$. Максимальная мощность генерации КИЛ составила 415 Вт при

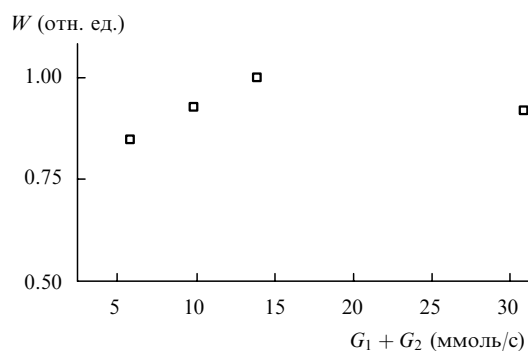


Рис.2. Зависимость мощности генерации КИЛ W от суммарного расхода первичного и вторичного буферного газа CO_2 для второго режима при $p_g = 27$ Тор, $G_1 = 0.24$ ммоль/с, $M \approx 1$ и $G_2 = 5.8$ ммоль/с.

расходе молекулярного хлора 20 ммоль/с, что соответствует химической эффективности $\eta_{ch} = 23\%$, и была получена в тех пусках, когда наблюдалось однородное и полное заполнение активной среды внутризональным полем излучения. Разбавление кислорода первичным буферным газом не приводило к увеличению мощности генерации, что имело место в КИЛ, где молекулярный иод инжектировался в дозвуковой части потока перед щелевым соплом [12] или в решетке Кэсседи [16]. Аналогичное заключение было сделано в работе [11]. Замена буферного газа N_2 на CO_2 не внесла существенных изменений в зависимость мощности генерации от степени разбавления активной среды этими газами. Снижение скорости газа в резонаторе до 200 м/с привело к уменьшению мощности только на 12 %.

Малый масштаб смещения в данной установке (~ 1 мм) и низкое давление в резонаторе обеспечивали высокую скорость смещения кислородного и иодного потоков. Оцененное время диссоциации иода в первом режиме составило несколько десятых долей миллисекунды. Это намного меньше, чем предсказывает широко используемая в настоящее время модель диссоциации иода, предложенная в [14].

Прирост энергетической эффективности в исследуемых режимах КИЛ обусловлен прежде всего увеличением длины усиления активной среды от 5 см [11,12] до 10 см. Оптимальные значения основных параметров лазера сильно зависят от длины усиления активной среды. Например, оптимальные скорость газа и относительное содержание молекулярного иода сместились в сторону меньших значений при увеличении L от 5 см [11,12] до 10 см. Увеличение скорости газа от 125 м/с [13] до ~ 300 м/с при одной и той же длине усиления 10 см привело к увеличению химической эффективности почти в два раза.

Исследование режимов работы КИЛ без ловушки паров воды с малым расходом буферного газа в области еще больших длин усиления может быть полезным. Увеличение длины усиления ведет к снижению оптимального относительного содержания иода в кислороде. Это вызывает уменьшение скорости релаксационных процессов, и поэтому появляется возможность увеличить давление кислорода в резонаторе. Такой режим выгоден тем, что позволяет, во-первых, снизить удельные затраты энергии на прокачку среды и, во-вторых, уменьшить доминирование доплеровского уширения над столкновительным не за счет буферного, а за счет рабочего газа.

1. Басов Н.Г., Загидуллин М.В., Игошин В.И., Катулин В.А., Куприянов Н.Л. *Труды ФИАН*, **171**, 30 (1986).
2. McDermott W.E., Pchelkin N.R., Benard D.J., Bousek R.R. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 496 (1978).
3. Benard D.J., McDermott W.E., Pchelkin N.R., Bousek R.R. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 40 (1979).
4. Vachar J., Rosenwaks S. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 16 (1982).
5. Yoshida S., Shimizu K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1225**, 478 (1990).
6. Вагин Н.П., Карапетян Д.Г., Коношенко А.Ф., Крюков П.Г., Пазюк В.С., Томашев В.Н., Юрьшев Н.Н. *Кр. сообщ. физ.*, № 4, 6 (1989).
7. Загидуллин М.В., Игошин В.И., Катулин В.А., Куприянов Н.Л. *Квантовая электроника*, **10**, 131 (1983).
8. Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Куприянов Н.Л., Николаев В.Д. *Квантовая электроника*, **18**, 826 (1991).
9. Аязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **21**, 129 (1994).
10. Rittenhouse T.L., Phipps S.P., Helms C.A., Truesdell K.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2702**, 333 (1996).
11. Furman D., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 3 (1998).
12. Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Khvatov N.A., Svistun M.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 246 (1998).
13. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И. *Квантовая электроника*, **21**, 23 (1994).
14. Heidner R.F., Gardner C.E., Segal G.I., El-Sayed T.M. *J. Phys. Chem.*, **87**, 2348 (1983).
15. Derwent R.G., Thrush B.A. *J. Chem. Soc. Far. Trans. 2*, **68**, 720 (1972).
16. Аязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Сафонов В.С. *Квантовая электроника*, **24**, 491 (1997).