

## ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО КИСЛОРОДНО-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА ОТ ДАВЛЕНИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА

В. А. Золотарев, П. Г. Крюков, Ю. П. Подмарьков, М. П. Фролов, Н. Н. Юрышев

*Экспериментально показано, что при отсутствии вредных примесей и постоянном содержании синглетного кислорода в активной среде импульсного кислородно-йодного лазера энергия генерации возрастает прямо пропорционально давлению синглетного кислорода по меньшей мере до 5 торр.*

Существующие химические кислородно-йодные лазеры (КИЛ) эффективно работают в диапазоне давлений кислорода 1–2 торр [1–4]. Исследование характеристик импульсных КИЛ при более высоких давлениях кислорода проводилось в работах [5–7], где при повышении давления кислорода вначале наблюдался рост, а при давлениях выше 3–5 торр – падение энергии генерации. Однако зависимость энергии генерации от давления существенно отличалась от прямо пропорциональной уже при  $\sim 1$  торр. Поскольку анализ процессов в химическом КИЛ [8, 9] указывает на отсутствие принципиальных ограничений для работы при высоких давлениях кислорода, авторы [5, 6] объясняли наблюдавшееся снижение энергии генерации при росте энергозапаса в активной среде наличием молекулярного хлора.

Присутствие в активной среде нежелательных примесей (таких, как пары воды и молекулярный хлор) характерно для химических генераторов синглетного кислорода (СК) на основе реакции хлорирования щелочного раствора перекиси водорода. Этот факт, а также наблюдающееся снижение содержания СК и возможное изменение состава смеси при повышении давления затрудняют исследование работы КИЛ с химическим генератором СК при высоких давлениях.

Указанных недостатков лишен источник СК, основанный на фотолизе озона. Выход СК при фотодиссоциации  $O_3$  составляет 90%. Импульсная генерация КИЛ с таким источником впервые продемонстрирована в [10], где давление озона составляло 0,45 торр. В настоящей работе исследована зависимость энергии генерации КИЛ с фотолитической наработкой СК от давления озона в более широком диапазоне.

Рабочей камерой лазера служила кювета из нержавеющей стали диаметром 2,8 см и длиной 20 см с кварцевыми окнами, расположенными под углом Брюстера. Рабочая смесь приготавливалась при смешении потоков предсмесей  $O_3:SF_6:He$  и  $CH_3I:SF_6:N_2O$  и прокачивалась вдоль оси кюветы со скоростью  $\sim 15$  м/с. Результирующая смесь имела состав  $O_3:CH_3I:SF_6:He:N_2O=8:0,8:37:19,2:35$ . Наличие  $SF_6$  необходимо для уменьшения разогрева смеси в результате фотолиза озона и последующих процессов,  $He$  – для улучшения смешения, а  $N_2O$  – для химического отвода атомов  $O(^1D)$ , образующихся наряду с молекулами СК при фотолизе  $O_3$  и оказывающих неблагоприятное влияние на энергию генерации [10]. Резонатор лазера длиной 125 см был образован сферическими ( $R=5$  м) зеркалами с коэффициентами отражения 99,7 и 99,3%. На выходе резонатора установлена диафрагма диаметром 3,4 мм, благодаря чему регистрировалась лишь центральная часть выходного пучка лазера, соответствующая участку активной области, занимающему полную длину кюветы. Фотолиз озона осуществлялся излучением четвертой гармоники неодимового лазера ( $\lambda=264$  нм) с длительностью импульса 24 нс. Пучок излучения гармоники диаметром 1 см направлялся под небольшим углом к оси резонатора вдоль кюветы. Энергия импульса четвертой гармоники достигала 4,5 Дж, что позволяло осуществлять практически полную диссоциацию озона при его парциальных давлениях до 10 торр, однако из-за низкой лучевой прочности окон кюветы исследования проводились лишь до 5 торр  $O_3$ . Озон нарабатывался в день проведения экспериментов. Примесь молекулярного кислорода в озоне не превышала 10%.

На рис. 1 (кривая 1) представлена зависимость энергии генерации КИЛ от парциального давления озона. Плотность энергии УФ излучения для точки с максимальным давлением составляла  $\sim 4$  Дж/см<sup>2</sup> и снижалась для более низких давлений, чтобы избежать повреждения окон кюветы. Однако при всех давлениях

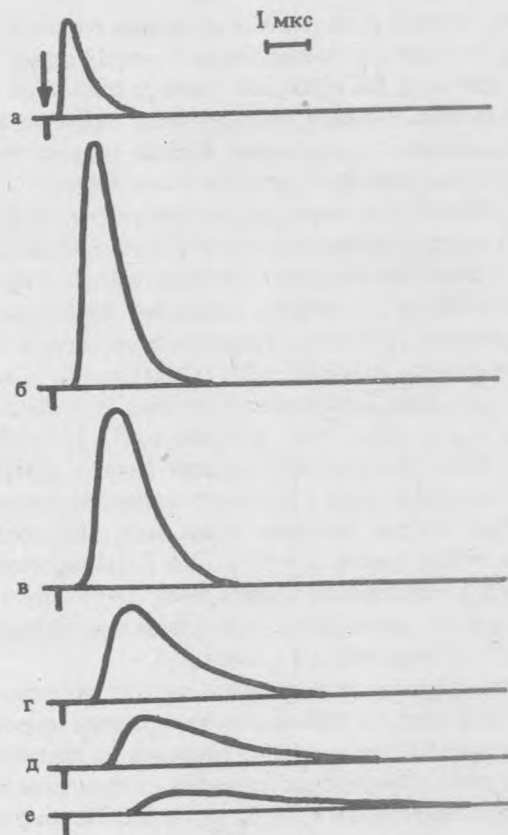
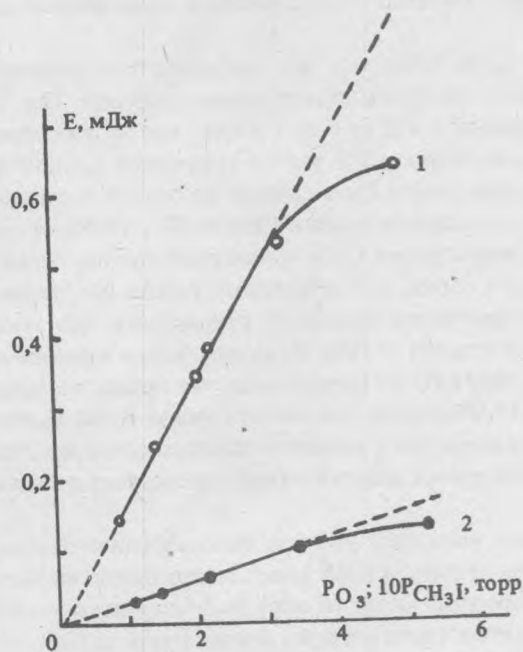


Рис. 1. Зависимость энергии генерации лазера на смеси состава  $O_3:CH_3I:SF_6:He:N_2O = 8:0,8:37:19,2:35$  от парциального давления озона (кривая 1) и  $0:0,8:37:19,2:43$  от парциального давления  $CH_3I$  (кривая 2).

Рис. 2. Осциллограммы лазерных импульсов для смесей состава  $O_3:CH_3I:SF_6:He:N_2O = 0:0,52:23:12:27$  (а),  $4,9:0,49:22,7:11,7:21,4$  (б),  $3,2:0,32:14,8:7,7:14$  (в),  $2,2:0,22:10,2:5,3:9,6$  (г),  $1,4:0,14:6,5:3,4:6,1$  (д) и  $0,9:0,09:4,2:2,2:3,9$  торр (е) (стрелкой указано положение фотолитизирующего УФ импульса).

обеспечивалась практически полная диссоциация озона и йодида. При давлениях озона до 3 торр энергия генерации возрастает пропорционально давлению, а затем рост энергии замедляется. Мы предполагаем, что это связано с воздействием УФ излучения на окна кюветы, которое приводит к росту внутренних потерь в резонаторе при возрастании энергии УФ импульса. Это предположение подтверждает вид зависимости (кривая 2) энергии генерации лазера на не содержащей озона смеси  $CH_3I:SF_6:He:N_2O=0,8:37:19,2:43$ . В этом случае лазер работал в обычном фотодиссоционном режиме, причем парциальные давления  $CH_3I$  были такими же, как и в смеси с озоном. Энергии УФ импульсов для соответствующих пар точек кривых 1 и 2 также были одинаковыми. Из рисунка видно, что кривые имеют одинаковый характер, причем при давлении  $CH_3I$  0,5 торр в обоих случаях энергия генерации падает приблизительно в 1,3 раза по отношению к прямо пропорциональной зависимости. Снижение энергии УФ импульса при указанном давлении приводило к росту энергии генерации в фотодиссоционном режиме до уровня, соответствующего прямой пропорциональности. Из этого следует, что при устранении рассмотренного эффекта энергия генерации КИЛ с фотодиссоционным источником СК будет расти прямо пропорционально давлению по меньшей мере до 5 торр озона.

Так как смесь с озоном имела постоянный состав, при более низких парциальных давлениях озона она содержала меньшее количество  $CH_3I$ . Это приводило к изменению формы импульса генерации лазера

(рис. 2), причём длительность импульса сокращалась примерно обратно пропорционально давлению йодида, что находится в соответствии с результатами работ /5, 11/. Снижение концентрации йодида при постоянном давлении СК приводит также к снижению энергии генерации /5/, что в принципе может сказываться на результатах. Однако влияние этого эффекта в данных исследованиях незначительно, поскольку точки с минимальным содержанием йодида соответствуют приблизительно пятикратному превышению коэффициента усиления над пороговым значением.

Абсолютные значения энергии генерации, полученные нами, невелики, что связано с относительно высокими внутренними потерями в резонаторе по сравнению с пропусканием выходного зеркала. Тем не менее, из сравнения наклонов прямолинейных участков кривых 1 и 2 на рис. 1 видно, что за счет передачи возбуждения от СК энергия генерации возрастает приблизительно в 5,5 раз по сравнению с чисто фотодиссоционным режимом. Теоретическая оценка такого роста может быть сделана на основе соотношения  $E_1/E_2 = (\eta - \eta_{th})[O_3] / (q - 1/3)[CH_3I]$ , где  $E_1$  — энергия генерации на смеси с озоном,  $E_2$  — энергия генерации в чисто фотодиссоционном режиме,  $\eta$  — отношение концентрации СК к суммарной концентрации кислорода,  $\eta_{th}$  — пороговое значение  $\eta$ ,  $[O_3]$  — концентрация озона,  $q$  — квантовый выход возбужденных атомов йода при фотодиссоциации йодида,  $[CH_3I]$  — концентрация йодида. С учетом того, что температура в активной среде в условиях данных экспериментов достигала  $\sim 1000$  К, можно найти значение  $\eta_{th} = 0,3$ . Так как при фотолизе озона выход СК составляет 90%, а также предполагая, что примесь кислорода в озоне  $\sim 5\%$ , имеем  $\eta = 0,85$ . Для  $CH_3I$  значение  $q = 0,75$ . Учитывая, что концентрация озона была в 10 раз выше концентрации йодида, получаем  $E_1/E_2 = 13$ . Сравнивая это и экспериментальные значения, можно предположить, что в резонаторе с низкими внутренними потерями энергия генерации составит по меньшей мере 40% от теоретически возможной.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально показано, что при использовании генератора СК, не вносящего в рабочую смесь вредных примесей, в импульсном КИЛ имеет место прямо пропорциональная зависимость энергии генерации от давления кислорода по меньшей мере до 5 торр при постоянном во всем диапазоне рабочих давлений коэффициенте экстракции (доле энергии, извлекаемой из СК).

Авторы благодарны Н.П. Вагину и В.С. Пазюку за обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г. и др. Квантовая электроника, **11**, 1893 (1984).
2. Вагин Н. П. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 47 (1987).
3. Yoshimoto H. et al. J. Appl. Phys., **59**, 3965 (1986).
4. Wiswall C. E. et al. J. Appl. Phys., **58**, 115 (1985).
5. Балан Н. Ф. и др. Квантовая электроника, **16**, 1587 (1989).
6. Балан Н. Ф. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 4, 23 (1989).
7. Вагин Н.П. и др. Препринт ФИАН № 185, М., 1989.
8. Басов Н. Г. и др. Труды ФИАН, **171**, 30 (1986).
9. Zhung Q. Wang Chengdong, Zhang Cunhao. Chinese Physics-Lasers, **14**, № 6, 413 (1987).
10. Золотарев В. А. и др. Квантовая электроника, **16**, 1095 (1989).
11. Басов Н. Г., Крюков П. Г., Юрышев Н. Н. Квантовая электроника, **14**, 924 (1987).

Поступила в редакцию 20 декабря 1989 г.