

Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера

Д.В.Шиянов, В.Б.Суханов, Г.С.Евтушенко, О.С.Андрienко

Экспериментально установлено, что введение малых добавок HBr в активные элементы CuBr-лазера аналогично введению добавок водорода и существенно улучшает параметры генерации лазера. Наиболее заметно влияние добавок в активные элементы малого объема (увеличение выходной мощности до 5 раз) и менее заметно (до 2 раз) – в активные элементы большого объема. Разработан специальный генератор HBr, позволяющий оперативно обеспечивать необходимую концентрацию активной добавки в отпаянном активном элементе.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, генератор бромводорода.

1. Введение

В настоящее время основное внимание при исследовании лазеров на парах металлов (ЛПМ) приковано к лазерам, активная среда которых модифицирована посредством использования различных галогенсодержащих соединений рабочего металла с последующим добавлением в активную среду водорода либо активных примесей: HCl, HBr и др. [1, 2]. Указанная модификация позволяет повысить как энергетические и частотные характеристики, так и качество пучка излучения данных лазеров. Поэтому такие лазеры находят применение в современных системах высокоскоростной записи оптической информации, микрообработки материалов, зондирования параметров атмосферы, лазерного разделения изотопов и т. д. [2–4]. Известно, что среди ЛПМ наибольший интерес для практического использования представляет лазер на парах меди и ее соединений.

Первое сообщение о повышении энергетических характеристик и увеличении диапазона оптимальных частот лазера на парах меди при использовании добавки молекулярного водорода появилось еще в 1980 г. [5]. А совсем недавно сообщалось о начале промышленного освоения на ГНПП «Исток» отпаянных активных элементов «Кристалл» с введенной в них примесью водорода, что позволило повысить среднюю мощность излучения в 1.5 раза [6]. Добавка же водорода в активную среду лазера на парах бромида меди привела не только к двукратному увеличению мощности генерации, но и к значительному увеличению эффективности (до 3 % [7]). Идея введения водорода в активную среду лазеров на солях металлов была использована в гибридных лазерах (HуBrID), где галогенводород (HBr) прокачивается через рабочую зону вместе с буферным газом (неоном). Атомы свободного

брома, возникшие после диссоциации молекул HBr, при взаимодействии с металлической медью, образуют молекулы CuBr. Далее, подобно лазеру на парах бромида меди [8, 9], при диссоциации CuBr в импульсно-периодическом разряде создается необходимая рабочая концентрация свободных атомов меди. Именно в ЛПМ такого типа были достигнуты максимальная мощность излучения с одного активного элемента более 200 Вт, КПД более 3 % [10] и наивысшая удельная средняя мощность генерации 2 Вт/см³ [11].

Несмотря на то что лучшие генерационные характеристики получены для гибридных лазеров и лазеров с улучшенной кинетикой [12], эти системы являются прокатными и их практическое использование ограничено. Применение же смесей Ne–H₂ либо Ne–HBr в отпаянных Cu- и CuBr-лазерах предполагает решение проблемы поддержания необходимого количества водорода в активном элементе лазера в течение продолжительного времени. В последние годы такие возможности появились, в частности, при использовании селективного реверсивного натекавателя водорода (СРНВ), выпускаемого на предприятии «Импульсные технологии» (Рязань) [13], либо специального генератора HBr [14].

В настоящей работе с целью создания отпаянного активного элемента экспериментально исследовалось влияние добавок HBr на энергетические характеристики лазера на парах бромида меди по сравнению с влиянием добавок водорода.

2. Техника эксперимента

Исследования энергетических характеристик CuBr-лазеров с добавками HBr (H₂) проводились с газоразрядными трубками (ГРТ), масштабируемыми по длине и диаметру активной зоны. ГРТ изготовлены без диафрагм, ограничивающих апертуру пучка. Использовались два варианта конструкции ГРТ (рис.1), различающихся по способу подачи паров рабочего вещества в активную зону: с независимым подогревом контейнеров с CuBr [15] и саморазогревный вариант [16]. Параметры этих ГРТ приведены в табл.1.

ГРТ имели встроенный реверсивный генератор HBr,

Д.В.Шиянов, В.Б.Суханов, О.С.Андрienко. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 1
Г.С.Евтушенко. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 1; Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30

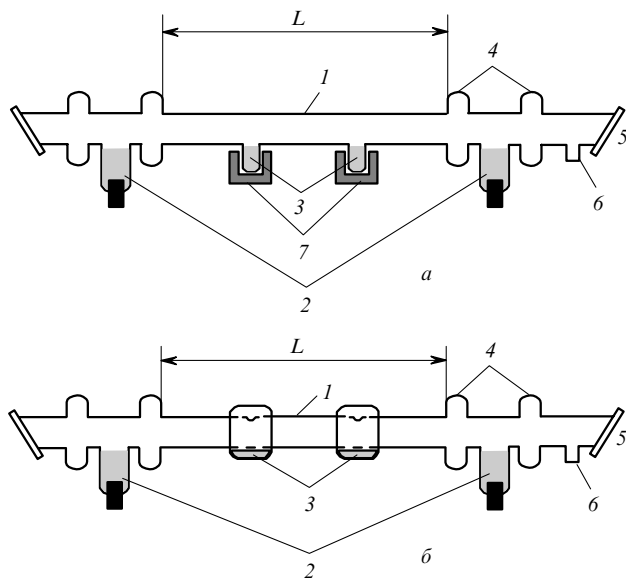


Рис. 1. Схемы конструкции ГРТ с независимым нагревателем контейнеров (ГРТ № 1 и 2) (а) и саморазогревный вариант (ГРТ № 3, 4 и 5) (б):

1 – рабочий канал; 2 – электроды; 3 – контейнеры с CuBr; 4 – ловушки; 5 – выходные окна; 6 – генератор HBr (H₂); 7 – нагреватели; L – длина активной зоны ГРТ.

функциональное назначение которого заключалось не только в подаче HBr в активную среду лазера, но и в откачке бромводорода обратно в генератор. Концентрация HBr регулировалась в широких пределах температурой нагревателя, а оптимальная добавка определялась по максимальной мощности излучения. При постоянной температуре нагревателя концентрация HBr устанавливалась на определенном уровне. Аналогичную конструкцию имели ГРТ с встроенным генератором водорода – СРНВ.

Возбуждение ГРТ осуществлялось по традиционной схеме прямого разряда рабочей емкости типа КВИ-3 на ГРТ с помощью коммутатора – тиратрона. При накачке ГРТ № 1–3 с коммутируемыми мощностями до 2.5 кВт использовался тиратрон ТГИ1-1000/25 с водяным охлаждением. Для коммутации мощностей более 2.5 кВт в случае ГРТ № 4 и 5 накачка осуществлялась по схеме очередного запуска двух тиратронов. С целью повышения напряжения на трубках с большим межэлектродным расстоянием (ГРТ № 4, 5) в схему, как и в [17], включался импульсный кабельный трансформатор. Трансформатор намотан на 10 ферритовых кольцах размером 100 × 60 × 15 мм, обмотка трансформатора выполнена кабелем с фторопластовой изоляцией ПВТФЭ, число витков в первичной обмотке равно трем, во вторичной – шести.

Табл. 1. Габаритные и энергетические параметры исследуемых ГРТ.

Номер ГРТ	Диаметр трубки (см)	Длина активной зоны (см)	Потребляемая мощность (кВт)	Мощность излучения без добавок H ₂ и HBr (Вт)	Мощность излучения с добавкой H ₂ (Вт)	Мощность излучения с добавкой HBr (Вт)
1	1.1	16	0.4–0.5	0.15	0.8	0.8
2	1.6	36	0.8	0.5	2.5	2.5
3	2.6	76	1.4–1.5	5	10	10.5
4	3.6	120	2.5–3.0	13	25 (36)	26 (38)
5	5.3	145	4.0–5.0	22	41 (55)	40 (55)

Примечания. В скобках приведены мощности излучения для ГРТ № 4, 5, полученные в схеме с импульсным кабельным трансформатором. Давление буферного газа Ne составляет 15–30 Тор, частота следования импульсов равна 17–22 кГц. ГРТ № 1, 2 изготовлены с независимым подогревом контейнеров, ГРТ № 3–5 имеют саморазогревную конструкцию.

Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации проводилась с помощью пояса Роговского, малоиндуктивного делителя на резисторах типа ТВО и коаксиального фотоэлемента ФК-22 соответственно. Регистрируемые сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS 3032. Мощность излучения контролировалась измерителем мощности ИМО-2, а температура стенки ГРТ – хромель-алюмелевой термопарой.

Первые измерения энергетических характеристик исследуемых трубок проводились следующим образом. ГРТ выводилась на стационарный режим работы без добавок HBr (H₂) и фиксировалась мощность генерации (см. табл. 1). Затем включался нагреватель генератора HBr и осуществлялась подача галогенводорода в ГРТ, оптимальная концентрация которого на начальной стадии определялась визуально по диаметру шнура разряда. Типичные значения оптимального парциального давления HBr составляют 0.1–0.2 Тор. В случае превышения необходимой концентрации HBr проводилась откачка части HBr из ГРТ в генератор без изменения давления основного буферного газа – неона. К сожалению, подобная процедура невозможна при превышении оптимального парциального давления H₂, и даже полная замена рабочей смеси не гарантирует отсутствие водорода в разряде.

3. Результаты и их обсуждение

Эксперименты показали, что характер выхода лазера на стационарный режим (от момента включения разряда) в активных элементах малых объемов (диаметр трубки менее 2 см) сильно отличается от характера выхода для активных элементов больших объемов (диаметр более 2 см). При достижении максимальной мощности излучения в узких трубках (ГРТ № 1, 2) постепенная подача HBr в разряд вызывала сначала увеличение выходных параметров, а затем их снижение из-за переизбытка паров рабочего вещества. Об этом можно было судить визуально по выносу рабочего вещества в приэлектродные и торцевые зоны. Дальнейшая подача HBr приводила к затруднениям в процессе разряда и его срыву. Только после снижения температуры контейнеров с CuBr разряд стабилизировался, а мощность излучения превышала исходное значение без добавок в 4–5 раз (табл. 1). Так, например, чтобы достичь максимальной выходной мощности (2.5 Вт) в активной среде ГРТ № 2 с добавкой HBr, выходную мощность в условиях буферного газа – чистого неона приходилось устанавливать (за счет снижения температуры печей контейнеров с CuBr) равной 0.3 Вт, что ниже оптимальной, а затем осуществлять подачу HBr. Можно предположить, что в узких трубках реали-

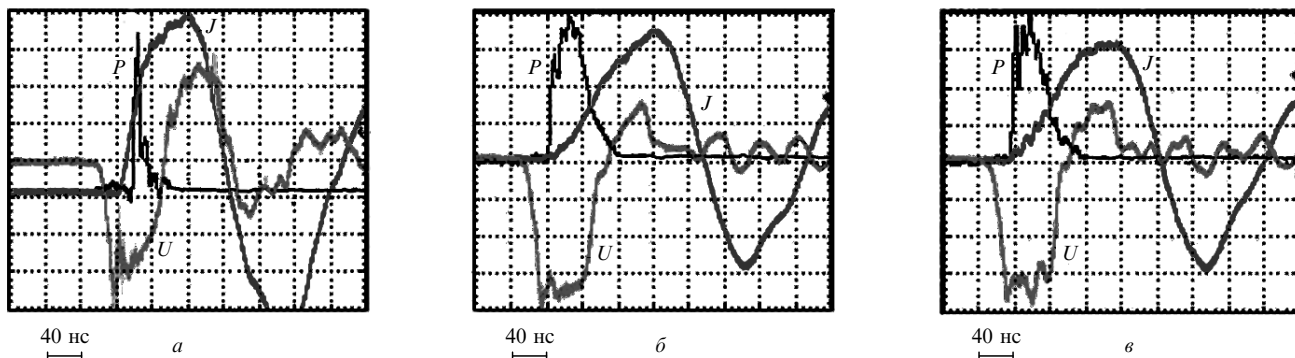
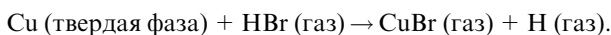
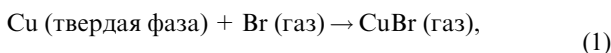


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока J , напряжения U и генерации P для ГРТ № 3 в чистом Ne (а), с добавками H_2 (б) и НВг (в) при емкости рабочего конденсатора 825 пФ, частоте следования импульсов накачки 17.2 кГц и давлении буферного газа Ne либо смеси Ne – НВг (Ne – H_2), равном 20 Тор. Напряжение и ток источника питания 6.2 кВ и 0.22 А (а) и 6.2 кВ и 0.21 А (б, в).

зуется (по одной из двух схем) дополнительный механизм образования молекул CuBr в разряде, подобный механизму, имеющему место в гибридном лазере:



Испытание саморазогревных ГРТ № 3 – 5 показало, что подача НВг приводила к постепенному увеличению мощности с 5, 13 и 22 Вт до 10.5, 26 и 40 Вт соответственно. При этом изменять слой теплоизоляции на контейнерах с CuBr не требовалось, что означало неизменность температуры и концентрации CuBr. Использование импульсного кабельного трансформатора дало возможность дополнительно повысить мощность генерации в ГРТ № 4 и 5 до 38 и 55 Вт соответственно.

Полученные экспериментальные результаты позволяют заключить, что добавки НВг в активную среду CuBr-лазера приводят к эффективному увеличению выходных параметров до значений, сравнимых с параметрами CuBr-лазера с добавками H_2 . Ранее нами были проведены измерения выходных характеристик данных ГРТ с добавками H_2 в отпаянном и неотпаянном вариантах. В случае неотпаянной ГРТ водород закачивался в нее через магистраль из баллона. В отпаянном режиме работала ГРТ № 4, к которой припаивался генератор водорода типа СРНВ-1. Сравнение мощностей излучения и КПД лазеров с добавками H_2 и НВг показывает их практически полную идентичность. На рис.2 приведены осциллограммы импульсов тока, напряжения и генерации для ГРТ № 3 в чистом Ne, с добавками H_2 и НВг при идентичных условиях возбуждения и одинаковой температуре стенки ГРТ. Мощность генерации в этих условиях равнялась 5 Вт в отсутствие водорода, 10 и 10.5 Вт при добавках водорода и бромводорода соответственно.

Разработанный генератор НВг лишен недостатка, присущего водородному генератору типа СРНВ при использовании его в CuBr-лазере. Этот недостаток связан с отсутствием процесса обратного ухода H_2 в генератор в случае его избыточной концентрации в разряде.

На рис.3 показана эволюция импульсов тока и напряжения в течение длительного времени (порядка нескольких часов) при откачке НВг из разряда. Видно, что форма импульсов после отключения нагревателя генератора НВг возвращается к первоначальной (кривые $1', 1$), соответствующей форме импульсов при работе ГРТ с чистым Ne (без примесей) в качестве буферного газа. Ско-

рость ухода НВг из разряда обратно в генератор зависит от его концентрации в генераторе.

Стоит отметить, что разработанный генератор НВг может также использоваться для обезгаживания ГРТ от атмосферных газов и продуктов наработки, которые негативно влияют на генерационные свойства лазера. В частности, известно, что в CuBr-лазерах по мере наработки ГРТ происходит накопление свободного брома [2]. Результаты экспериментов [12, 18] наряду с численными расчетами [19] свидетельствуют о негативном влиянии добавок брома на характеристики лазеров на парах меди и бромида меди. Возможно, что выбор оптимальных условий работы генератора бромводорода позволяет снизить концентрацию свободного брома в разряде.

Обращает на себя внимание поведение средней мощности излучения (суммарной по обеим линиям) в зависимости от давления буферного газа. Из рис.4 видно, что максимум средней мощности при добавках НВг смещается в сторону меньших давлений по сравнению со случаем чистого неона. Аналогичное поведение отмечалось и Литтлом [2]. Вероятно, при увеличении давления смеси необходимо увеличивать напряжение на ГРТ, что бывает технически сложно реализовать при использовании титратронов типа ТГИ1-1000/25. Косвенным подтвержде-

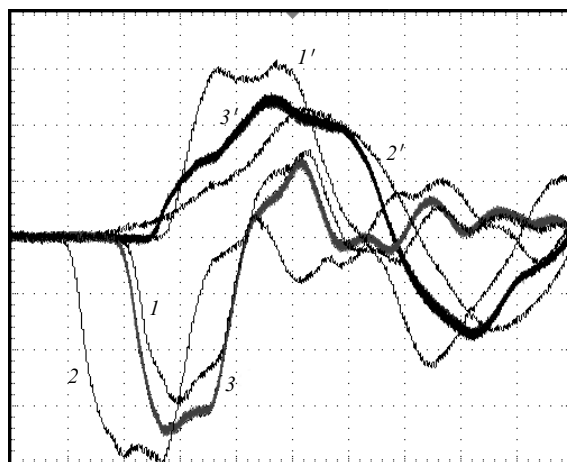


Рис.3. Эволюция импульсов тока J ($1' - 3'$) и напряжения U ($1 - 3$) в процессе ухода НВг из ГРТ № 3 в генератор НВг при работе лазера на чистом Ne без примесей ($1', 1$), с добавлением НВг при концентрации выше оптимальной ($2', 2$) и через 20 мин после отключения нагревателя генератора НВг ($3', 3$).

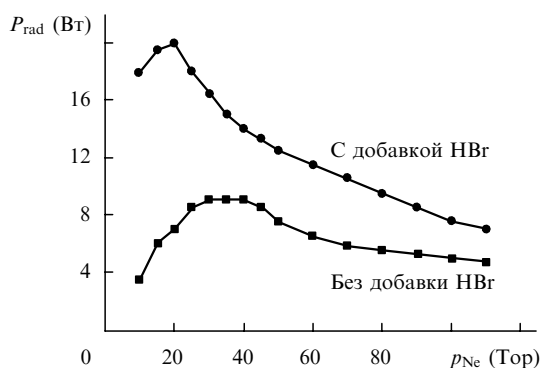


Рис.4. Зависимости мощности излучения CuBr-лазера P_{rad} (диаметр ГРТ 3.6 см, длина 96 см) от давления буферного газа p_{Ne} . Давление HBr в каждой точке измерения оптимизировано по максимуму мощности излучения. Рабочая емкость 1175 пФ, частота следования импульсов накачки 17 кГц, потребляемая мощность (от выпрямителя) $\sim 2 - 2.4$ кВт.

нием данного предположения является то, что при использовании импульсного кабельного трансформатора мощность излучения возрастает на 30 % – 50 %.

Первые результаты по наработке CuBr–Ne–HBr-лазера без замены рабочей смеси в течение десятков часов показывают, что ему присущи особенности, характерные для гибридного лазера. В частности, в гибридных лазерах возникает проблема ограничения апертуры активной зоны вследствие образования дендритов в канале ГРТ с малыми диаметрами после нескольких десятков часов работы. Для устранения этого явления авторы работы [8] предлагают контролировать концентрацию водорода и температуру трубки, тщательно подбирая теплоизоляцию во избежание локальных перегревов. В нашем случае наблюдалось равномерное оседание паров меди на внутренней стенке узкой трубки, которое со временем приводило к образованию подобия медной фольги круговой формы. Впоследствии эта «фольга» могла отслаиваться и перекрывать разрядный канал. Для устранения такого образования мы проводили профилактическую работу. В ГРТ зажигался разряд в чистом Ne (без нагрева контейнеров, т. е. практически без паров CuBr). Мощность, вводимая в ГРТ, немного превышала мощность, оптимальную для стационарной работы лазера. После прогрева ГРТ в таком режиме в течение некоторого времени (десятки минут) происходило удаление «фольги» с оседанием продуктов ее распада в холодных зонах (специально изготовленных ловушках).

Появление избыточной концентрации атомов рабочего вещества в разрядной зоне ГРТ № 1, 2 мы связываем именно с протеканием процессов типа (1): помимо того что пары CuBr поступают в разряд из контейнеров, атомы Br и молекулы HBr дополнительно срывают атомы меди со стенок ГРТ, появившиеся там вследствие металлизации трубки. Однако отметим, что в ГРТ № 3–5 это явление не было замечено. Мы полагаем, что в ГРТ большого диаметра процессы (1) оказываются менее эффективными. Так, в этих трубках энергия, вводимая в единицу объема, существенно меньше и, как следствие, диссоциация молекул HBr ниже. Соответственно ниже и концентрация активного брома, поэтому дополнительная наработка бромиды меди (Cu (твердая фаза) + Br (газ) \rightarrow CuBr (газ)) становится пренебрежимо малой. Кроме того, с переходом к ГРТ больших диаметров увеличивается длина диффузии молекул HBr к стенке ГРТ,

где и протекают реакции типа (1), и наблюдается значительная радиальная неоднородность температуры газа. В этих условиях, по-видимому, основную роль в улучшении генерационных характеристик лазера играет диссоциативное прилипание электронов к молекуле HBr [20].

4. Заключение

В настоящей работе проведены исследования выходных параметров CuBr-лазера с добавками HBr. Эксперименты с пятью ГРТ разных габаритов показали, что добавка HBr в активную среду CuBr-лазера приводит к увеличению его мощности излучения и КПД, равносильному с увеличением, полученным с данными ГРТ при добавках водорода. Анализ электрических характеристик (амплитуда, длительность импульсов накачки, вводимая мощность) CuBr–Ne–HBr- и CuBr–Ne–H₂-лазеров также показал их полную идентичность.

На основании результатов, полученных при использовании трубок малого диаметра (менее 2 см) высказано предположение, что требуемая плотность паров CuBr в активной зоне CuBr–Ne–HBr-лазера достигается не только за счет поступления рабочего вещества из контейнеров. Частично образование молекул CuBr возможно за счет «срыва» атомов меди со стенок ГРТ бромом (либо бромводородом), что напоминает принцип действия гибридного лазера.

Апробирование генератора HBr показало, что концентрация добавки HBr в лазере может изменяться в широких пределах. Данный генератор отличается от известных генераторов H₂ при использовании их в CuBr-лазерах свойством реверсивности. Избыток концентрации HBr, приводящий к снижению мощности излучения, легко устраняется отключением нагревателя генератора.

Полученные результаты положены в основу проводимой в настоящее время разработки отпаянного лазера на парах бромиды меди с контролируемыми добавками HBr. Следует отметить, что в описанных экспериментах мы не имели возможности существенно (до 50–100 кГц) увеличить частоту следования импульсов накачки. Вместе с тем мы полагаем, что, подобно лазеру на парах бромиды меди с добавками водорода, добавки HBr приведут к росту оптимальной частоты следования и выходной мощности излучения [21].

Авторы выражают свою признательность генеральному директору фирмы «Импульсные технологии» В.Д. Бочкову за поставку генератора водорода типа СРНВ и О.В.Жданеву за участие в обсуждении полученных результатов.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.Э. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
2. Little C.E. *Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications* (Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998).
3. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск: Наука, 1985).
4. Little C.E., Sabotinov N.V. (Eds.) *Pulsed Metal Vapor Lasers* (New York: Kluwer Acad. Publ., 1996, vol.5).
5. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. *Квантовая электроника*, 7, 1264 (1980).
6. Kazaryan M.A., Kolokolov I.S., Lyabin N.A., Paramonov V.S., Prokhorov A.M., Ugolnikov S.A., Chursin A.D. *Laser Phys.*, 12, 1281 (2002).
7. Astdjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E.,

- Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 705 (1997).
8. Jones D.R., Little C.E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2619**, 52 (1995).
9. Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 919 (1997).
10. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 2385 (1994).
11. Sabotinov N.V., Akerboom F., Jones D.R., Maitland A., Little C.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 747 (1995).
12. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. *Opt. Commun.*, **135**, 164 (1997).
13. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М., Климовский И.И. *Оптика атмосферы и океана*, **14**, 1027 (2001).
14. Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Bochkov V.D., et al. *Program VI Int. Conf. «Atomic and Molecular Pulsed Lasers»* (Tomsk, 2003, p.18).
15. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **28**, 220 (1999).
16. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 1053 (2000).
17. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **2**, 1228 (1989).
18. Астаджов Д.Н., Вучков Н.К., Петраш Г.Г., Саботинов Н.В. *Труды ФИАН*, **181**, 122 (1987).
19. Voichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **14** (6) (2004).
20. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 596 (1997).
21. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **32**, 680 (2002).