

А.М. Бойченко¹, Г.С. Евтушенко^{2,3}, О.В. Жданев^{2,3}, С.И. Яковленко¹

Влияние добавок водорода на работу активного элемента лазера на парах меди «Кристалл LT-40»

¹ *Институт общей физики РАН, г. Москва*

² *Томский политехнический университет*

³ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 8.09.2003 г.

Ранее разработанная подробная кинетическая модель активной среды Cu–Ne–H₂-лазера применена для теоретического анализа экспериментов, выполненных в ГНПП «Исток» (Фрязино) с активным элементом «Кристалл LT-40». Продемонстрирована возможность адекватного описания широкого диапазона экспериментальных условий с помощью такой математической модели лазера на парах меди с добавками водорода.

Введение

Создание современных систем высокоскоростной записи оптической информации, микрообработки материалов, зондирования параметров атмосферы, лазерного разделения изотопов и т.д. требует разработки эффективных лазеров, работающих в видимом диапазоне спектра. Одной из возможных реализаций данного класса лазеров являются лазеры, генерирующие на переходах с резонансных на метастабильные уровни атомов и ионов металлов. Данные лазеры сочетают высокую импульсную и среднюю мощности, высокую частоту следования импульсов возбуждения, прекрасное качество выходного пучка, наряду с возможностью генерации ультрафиолетового излучения на ионных переходах, вместе со значительной надежностью и сроком службы.

Одним из ключевых моментов в истории развития лазеров на парах металлов стало предложенное в работе [1] использование добавки молекулярного водорода в активную среду лазера на парах чистой меди для улучшения выходных параметров. В работе [1] отмечалось также увеличение диапазона оптимальных частот при использовании добавки молекулярного водорода. Определить точно, в какой момент началось использование водорода как активной добавки, не представляется возможным, поскольку вследствие выделения водорода конструкцией активного элемента данная примесь часто просто не контролируется исследователями, но присутствует в разряде. Направленное исследование положительных эффектов, вызванных введением примеси водорода, позволило экспериментально добиться значительного повышения как частотных, так и энергетических характеристик при одновременном улучшении качества выходного пучка (см., например, [2]).

Положительное влияние водорода, добавленного в активную среду лазера, было отмечено еще в 1980 г. [1], тем не менее на данный момент (по прошествии более чем 20 лет) не существует общепринятой точки зрения на механизмы влияния примеси водорода. Существует около десяти гипотез по данному вопросу, каждая из которых основана на тех или иных экспериментальных либо теоретических результатах. Подробный анализ данных гипотез приведен в [3, 4].

Как уже отмечалось, вследствие неконтролируемого поглощения и выделения элементами конструкции активного элемента водорода его целенаправленное использование как активной примеси, особенно в промышленных условиях, затруднено. В связи с этим в последнее время на предприятии «Импульсные технологии» (г. Рязань) был начат выпуск генераторов водорода, установка которых в активных элементах лазеров на парах металлов и их соединений позволяет осуществлять контролируемую добавку водорода в активную среду. Первые конструкции генераторов водорода, выполненные из титановой губки, насыщенной водородом, довольно быстро деградировали вследствие химических реакций с галогенсодержащими газами [5]. В последующих конструкциях для борьбы с этим явлением использовались селективные мембраны из никеля и палладия [6]. Недавно появились сообщения о начале промышленного освоения на ГНПП «Исток» отпаянных активных элементов «Кристалл LT-30, -40, -50, -70» с примесью водорода [7], что позволило повысить среднюю мощность генерации при использовании тиратронного коммутатора почти в 1,5 раза.

Чтобы проанализировать влияние добавок водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди, нами была разработана подробная нестационарная кинетическая модель [3, 4]. При со-

поставлении результатов моделирования с экспериментом использовались работы [2, 8, 9], в которых диапазон рабочих давлений лежал в пределах от 30 до 40 торр. Промышленные образцы отпаянных активных элементов «Кристалл LT-30, -40, -50, -70», выпускаемые на ГНПП «Исток», имеют гораздо большее давление неона, в частности для элемента «Кристалл LT-40» — 180 торр. В связи с этим представляется возможность проверки описания экспериментальных результатов с использованием разработанной ранее кинетической модели в существенно иных рабочих условиях и проверки полученных ранее выводов о механизмах влияния добавок водорода на процессы в активной среде лазера в этих условиях.

1. Описание кинетической модели

Подробное описание кинетической модели Cu–Ne–H₂-лазера приведено в [3, 4]. Разработанная самосогласованная модель позволяет проводить анализ изменения во времени средних по объему значений заселенностей уровней атома меди, молекулярного и атомарного водорода, плотности ионов меди и водорода, температуры электронов и интенсивности лазерного излучения на зеленой и желтой линиях атома меди и т.д.

В данной работе использовалась экспериментальная зависимость тока газоразрядной трубки (ГРТ), приведенная для активного элемента «Кристалл LT-40» в [10–12].

Нестационарные уравнения для концентраций различных реагентов плазмы активной среды лазера, уравнения баланса для температуры электронов (всего 39 уравнений) решались самосогласованно с помощью пакета программ ПЛАЗЕР [13, 14]. Всего в модели учитывалось около 200 кинетических реакций.

2. Сопоставление с экспериментом

Ниже приводится сопоставление результатов моделирования с результатами экспериментов, представленными в работе [7]. Эксперименты выполнены на ГНПП «Исток» с активным элементом «Кристалл LT-40» с тиратронным коммутатором, параметры ГРТ, использовавшиеся в расчетах, приведены ниже.

Параметры ГРТ [7]

Длина активной среды, см	123
Диаметр ГРТ, см	2
Частота повторения импульсов возбуждения, кГц	10
Давление неона, торр	180

Наибольший интерес представляет сопоставление экспериментальной и теоретической зависимости средней мощности излучения от введенной добавки водорода. Авторы [7] отмечают, что введение водорода приводило к увеличению температуры стенки ГРТ. Это должно обеспечивать увеличение

концентрации атомов меди в активной среде лазера. При оптимальной концентрации молекулярного водорода (4–6%) повышение температуры составляло примерно 50 К (до 1823 К) по сравнению с температурой 1773 К, соответствующей отсутствию добавки водорода в смеси. В расчетах предполагалось, что температура ГРТ растет линейно с увеличением добавки водорода, причем увеличение температуры на 50 К сопоставлялось 5%-й примеси. Начальная концентрация меди в основном состоянии в расчетах определялась из соотношения [15], связывающего ее с температурой ГРТ:

$$\lg \frac{N'_{Cu}}{N_{Cu}} = 0,4477(T_g^{0,7261} - T_g^{0,7261}) - 0,03698(T'_g - T_g),$$

где N_{Cu} — начальные значения концентрации, м⁻³, и T_g — температуры ГРТ, К; N'_{Cu} , T'_g — конечные значения.

К сожалению, в работе [7] отсутствуют осциллограммы импульсов тока и напряжения на ГРТ при разных введенных в активную среду добавках водорода, указывается лишь, что амплитуда тока разряда падает, в то время как максимальное значение импульса напряжения возрастает. Отметим, что уменьшение амплитуды тока при добавках различных примесей наблюдалось в различных экспериментах (см., например, [2]).

При моделировании мы использовали две зависимости тока от концентрации добавок водорода. В первом случае зависимость тока от времени предполагалась неизменной, соответствующей току без добавок водорода. Во втором случае для добавок до 5% использовалась неизменная зависимость тока, а для последнего значения 8% максимальное значение тока уменьшалось таким образом, чтобы качественное поведение расчетных и экспериментальных зависимостей энергии генерации совпало (рис. 1).

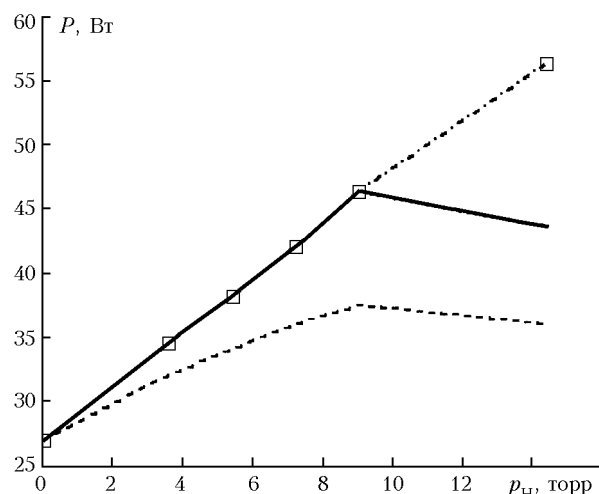


Рис. 1. Зависимость средней мощности генерации от давления введенной добавки водорода. Штриховая кривая — эксперимент, штрихпунктирная кривая и квадратики — расчеты при неизменной зависимости тока ГРТ от времени, для последнего значения концентрации молекулярного водорода (8%) значение тока ГРТ уменьшено на 30% (таблица)

Для этого оказалось достаточным уменьшить максимальное значение тока на 30%. Итак, уменьшение максимального значения тока, необходимого для описания эксперимента, оказывается разумно приемлемым.

Эксперимент с активным элементом «Кристалл ЛТ-40» был проведен при частоте следования импульсов возбуждения 10 кГц и значительно измененных параметрах активной среды по сравнению с параметрами, протестированными в [3, 4]. Как отразится это значительное изменение параметров активной среды на полученный ранее [3, 4] вывод относительно того, что механизмы влияния добавки водорода различны для разных диапазонов частот следования импульсов возбуждения? Напомним, что в работах [3, 4] было показано, что при высоких частотах ($f \gg 10$ кГц) увеличение мощности излучения лазеров происходит за счет снижения предимпульсных значений концентрации электронов и атомов меди в метастабильном состоянии, а также увеличения скорости восстановления концентрации меди в основном состоянии атома меди.

При работе на низких частотах ($f \sim 10$ кГц) повторения импульсов возбуждения отмеченных выше механизмов становится недостаточно. Увеличение мощности излучения лазеров происходит вследствие увеличения концентрации атомов меди в активной среде за счет увеличения разогрева ГРТ при введении водорода и одновременном уменьшении предимпульсной концентрации метастабилей за счет тушения этих уровней молекулами водорода в колебательно-возбужденных состояниях.

Этот вывод оказался справедлив и при данных условиях эксперимента. Без увеличения концентрации меди уменьшение предимпульсных значений концентраций электронов и атомов меди в метастабильных состояниях оказывалось недостаточно, чтобы компенсировать потери энергии на неупругие процессы с участием водорода.

В таблице в качестве иллюстрации представлены начальные расчетные значения параметров плазмы для различной концентрации введенной примеси водорода с учетом изменения концентрации меди в основном состоянии. Увеличение содержания добавки водорода в активной среде лазера ведет к монотонному уменьшению предимпульсной концентрации электронов и атомов меди в метастабильных состояниях. При этом начальная концентрация всех колебательно-возбужденных молекул водорода уменьшается вследствие того, что уменьшается предимпульсное значение температуры электронов. Предимпульсная концентрация колебательно-возбужденных молекул водорода, как впрочем и атомов меди в метастабильных состояниях, при низкой частоте следования импульсов возбуждения может быть в хорошем приближении оценена по распределению Больцмана. Отметим, что концентрация молекул CuH в активной среде незначительна. На рис. 2 в качестве иллюстрации представлены временные зависимости концентрации и температуры электронов, а также населенности основного состояния атома меди.

Предимпульсные значения реагентов плазмы при частоте 10 кГц

Параметер	$N_{\text{H}} = 0,$ $N_{\text{H}_2} = 0$ см^{-3}	$N_{\text{H}_2} = 8,27 \cdot 10^{14}$ см^{-3}	$N_{\text{H}_2} = 3,2 \cdot 10^{15}$ см^{-3}	$N_{\text{H}_2} = 1,6 \cdot 10^{16}$ см^{-3}	$N_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^{16}$ см^{-3}	$N_{\text{H}_2} = 3,2 \cdot 10^{16}$ см^{-3}
$N_{\text{Cu}}, \text{см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1,277 \cdot 10^{15}$	$1,424 \cdot 10^{15}$	$1,587 \cdot 10^{15}$	$1,765 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
$I, \text{А}$	400	400	400	400	400	300
$N_{\text{Ne}^+}, \text{см}^{-3}$	$8,43 \cdot 10^{12}$	$6,95 \cdot 10^{12}$	$5,32 \cdot 10^{12}$	$4,65 \cdot 10^{12}$	$3,83 \cdot 10^{12}$	$2,09 \cdot 10^{12}$
$N_{\text{Cu}^+}, \text{см}^{-3}$	$8,44 \cdot 10^{12}$	$5,73 \cdot 10^{12}$	$5,92 \cdot 10^{12}$	$4,61 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^{12}$	$3,69 \cdot 10^{12}$
$N_{D5/2}, \text{см}^{-3}$	$2,52 \cdot 10^{11}$	$1,85 \cdot 10^{11}$	$1,42 \cdot 10^{11}$	$9,58 \cdot 10^{10}$	$7,91 \cdot 10^{10}$	$5,43 \cdot 10^{10}$
$N_{D3/2}, \text{см}^{-3}$	$2,82 \cdot 10^{10}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$1,32 \cdot 10^{10}$	$7,85 \cdot 10^9$	$5,99 \cdot 10^9$	$3,34 \cdot 10^9$
$T_e, \text{эВ}$	0,145	0,137	0,13	0,121	0,116	0,103
$N_{\text{H}}, \text{см}^{-3}$	—	$1,36 \cdot 10^{15}$	$1,71 \cdot 10^{15}$	$2,31 \cdot 10^{15}$	$2,64 \cdot 10^{15}$	$3,1 \cdot 10^{15}$
$N_{\text{H}^-}, \text{см}^{-3}$	—	$9,6 \cdot 10^8$	$7,96 \cdot 10^8$	$6,01 \cdot 10^8$	$5,16 \cdot 10^8$	$3,67 \cdot 10^8$
$N_{\text{CuH}}, \text{см}^{-3}$	—	$2,47 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^{10}$	$2,39 \cdot 10^9$	$1,64 \cdot 10^9$	$4,69 \cdot 10^9$
$N_{\text{H}_2}, \text{см}^{-3}$ ($v = 1$)	—	$1,31 \cdot 10^{14}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	$6,33 \cdot 10^{13}$	$4,47 \cdot 10^{13}$	$2,24 \cdot 10^{13}$
$E_{510}, \text{Дж/см}^3$	$2,14 \cdot 10^{-6}$	$5,86 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$7,04 \cdot 10^{-6}$	$7,71 \cdot 10^{-6}$	$7,37 \cdot 10^{-6}$
$E_{578}, \text{Дж/см}^3$	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$3,06 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-6}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^{-6}$	$3,97 \cdot 10^{-6}$
$E_t, \text{Дж/см}^3$	$3,00 \cdot 10^{-6}$	$8,92 \cdot 10^{-6}$	$9,88 \cdot 10^{-6}$	$10,87 \cdot 10^{-6}$	$11,95 \cdot 10^{-6}$	$11,34 \cdot 10^{-6}$

Примечание. Начальные значения реагентов плазмы получались в результате самосогласованного расчета. E_t — общая удельная энергия генерации в одиночном импульсе; E_{510} — удельная энергия генерации на длине волны 510,6 нм; E_{578} — удельная энергия генерации на длине волны 578,2 нм.

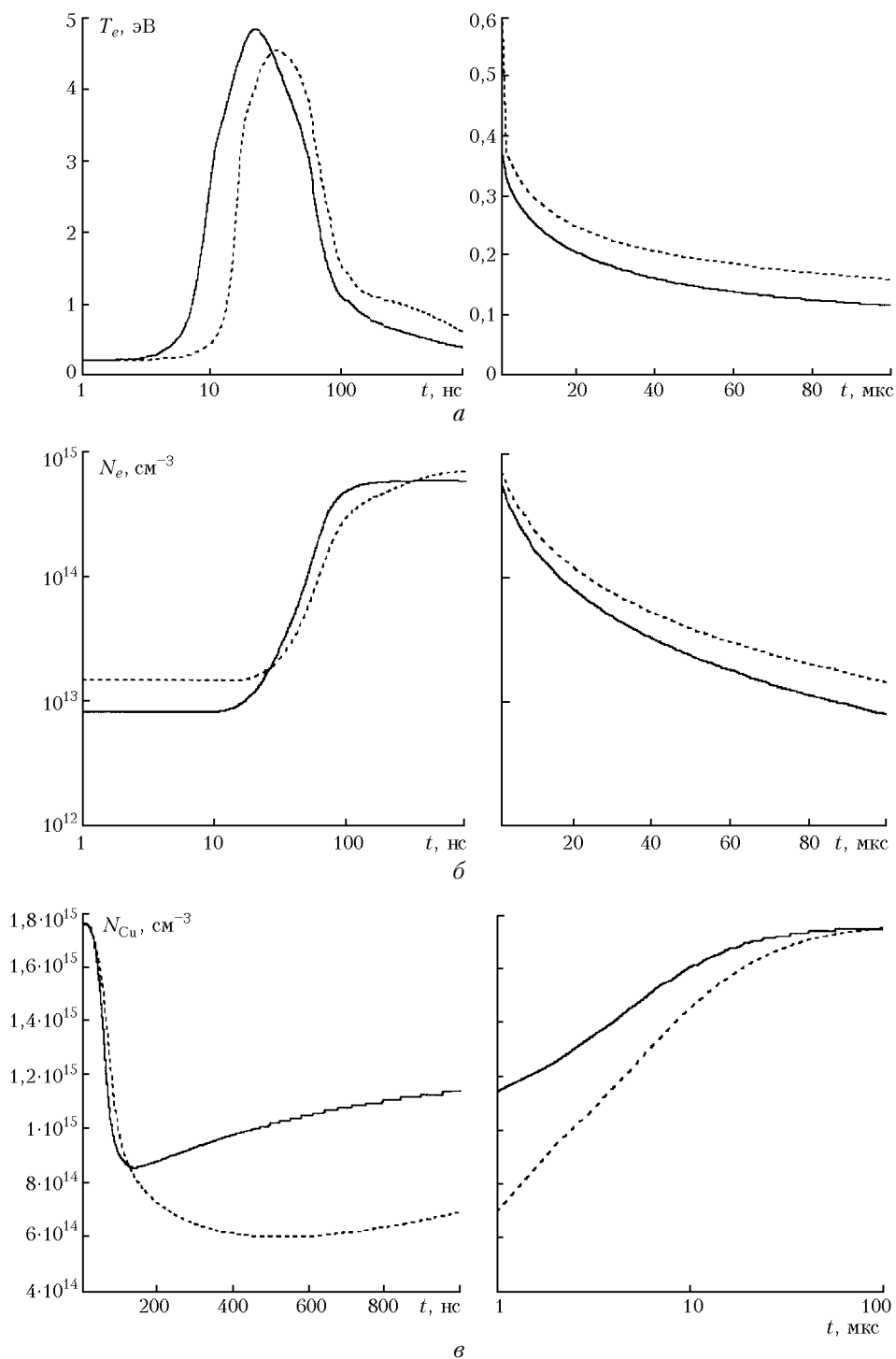


Рис. 2. Временные зависимости температуры (а), концентрации электронов (б) и концентрации атомов меди (в основном состоянии) (в) в течение импульса возбуждения и межимпульсного интервала (сплошная кривая соответствует начальным концентрациям $N_{H_2} = 5\%$, $N_{Cu} = 1,765 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; штриховая — $N_{H_2} = 0\%$, $N_{Cu} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Предымпulseвые значения реагентов плазмы, использовавшиеся в расчетах, приведены в таблице

Заклучение

Ранее разработанная кинетическая модель активной среды лазера на парах меди с добавками водорода была использована для теоретического анализа работы активного элемента «Кристалл LT-40» [7],

экспериментальные условия которого значительно отличаются от рассмотренных в [3, 4].

При введении добавок водорода в активную среду лазера на парах меди отмечается уменьшение максимального значения тока, проходящего через ГРТ. То же самое наблюдается в эксперименте при

введении молекулярного водорода [7]. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных зависимостей средней энергии генерации от процентного содержания введенной добавки водорода при разумном уменьшении максимального значения тока в расчетах (см. рис. 1).

Подтверждены выводы работ [3, 4] о механизмах увеличения генерационных характеристик лазеров на парах меди с добавками молекулярного водорода при условиях, значительно отличающихся от условий, рассмотренных в [3, 4].

1. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 6. С. 1264–1269.
2. Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. Investigation of the effects of hydrogen and deuterium on copper vapor laser performance // Opt. Commun. 1994, Dezember. V. 110. P. 699–707.
3. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. Теоретический анализ механизмов влияния добавок водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди // Квант. электрон. 2003. Т. 33. (в печати).
4. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdanov O.V. Theoretical analysis of mechanisms behind the influence of hydrogen admixtures on lasing characteristics of a copper-vapor laser // Laser Phys. 2003. V. 13. N 10. P. 1231–1255.
5. Marazov O.R., Manev L.G. Externally heated CuBr laser // Opt. Commun. 1990, January. V. 78. P. 63–66.
6. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М., Климовский И.И. Излучатели лазеров на парах металлов, снабженные ге-

- нератором водорода с большим сроком службы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1027–1029.
7. *The influence of hydrogen efficiency of a copper vapor laser with sealed-off active elements* / M.A. Kazaryan, I.S. Kolokolov, N.A. Lyabin, V.S. Paramonov, A.M. Prokhorov, S.A. Ugolnikov, A.D. Chursin // Laser Phys. 2002. V. 12. N 10. P. 1281–1285.
 8. *Cheng Ch., Sun W.* Study on the kinetic mechanisms of copper vapor lasers with hydrogen neon admixtures // Opt. Commun. 1997. V. 144. P. 109–117.
 9. *Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A.* Modelling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapor laser utilizing HCl+H₂ admixture // IEEE J. Quant. Electron. 2000. V. 36. N 4. P. 438–449.
 10. *Лазеры на парах металлов: разработка, производство и применение отпаянных лазеров на парах меди и золота* / Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, С.А. Угольников, М.В. Королева, М.А. Казарян // Квант. электрон. 2001. Т. 31. N 3. С. 191–202.
 11. *Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С.* Отпаянные промышленные активные элементы лазеров на парах металлов мощностью от 1 до 50 Вт // Изв. вузов. Физ. 1999. Т. 44. № 8. С. 67–73.
 12. *Лябин Н.А.* Промышленные отпаянные лазеры на парах меди типа «Кристалл» с повышенными кпд и мощностью излучения // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 3. С. 258–264.
 13. *Boichenko A.M., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.* Exciplex rare-halide lasers // Laser Phys. 2001. V. 10. N 6. P. 1159–1187.
 14. *Плазменные лазеры видимого и ближнего УФ-диапазона* / Под ред. С.И. Яковленко. М.: Наука, 1989. 142 с.
 15. *Carman R.J.* Modelling of the Kinetics and parametric behaviour of a copper vapour laser: Output power limitation issues // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 1. P. 71–83.

A.M. Boichenko, G.S. Evtushenko, O.V. Zhdanov, S.I. Yakovlenko. Effect of hydrogen admixtures on performance of Kristall LT-40 active element of a copper vapor laser.

The earlier developed detailed kinetic model of the Cu–Ne–H₂ laser active medium is applied to theoretical analysis of experiments made in the State Scientific & Production Enterprise «Istok» (Fryazino, Russia) with the Kristall LT-40 active element. The model's capability of describing adequately a wide range of experimental conditions is demonstrated.