

Комментарий к заметке Г.Г.Петраша «О моделировании лазера на парах меди с добавками водорода»

А.М.Бойченко, Г.С.Евтушенко, О.В.Жданев, С.И.Яковленко

Проанализированы замечания к работам [1–4] по моделированию лазера на парах меди с добавками водорода. Показано, что эти замечания не влияют на выводы наших работ, а многие из них просто не верны.

Ключевые слова: лазер на парах меди, влияние добавок водорода.

В заметке Г.Г.Петраша делаются выводы, что результаты наших работ [1–4] нельзя считать обоснованными, а сама модель и метод моделирования являются явным шагом назад по сравнению с результатами опубликованных ранее работ [5–11]. Кроме того, утверждается, что выводы о механизме влияния добавок водорода, сделанные в наших работах [1, 2], отличаются от выводов, сделанных в работах других авторов, «использовавших гораздо более обоснованные самосогласованные модели». Эти утверждения ошибочны. Начнем с последнего.

В заметке Г.Г.Петраша не приведены примеры расхождения результатов [1–4] и [5–11], тогда как мы в [1, 2] провели сопоставление наших результатов с данными других работ. Наши выводы согласуются, в частности, с выводами работ [5, 6, 10] относительно роли разогрева при работе на низких частотах (которые только и рассмотрены в [5, 6, 10]). О влиянии ускоренного тушения метастабильных атомов меди колебательно-возбужденными молекулами водорода говорится и в [12, 13], и в наших работах.

Рассмотрим теперь положения, выдвинутые Г.Г.Петрашом, в которых делается попытка доказать «необоснованность» наших работ.

1. Утверждается, что наше моделирование нельзя считать самосогласованным. По мнению Г.Г.Петраша, понятие самосогласованной модели состоит в том, что вначале должны задаваться общие параметры, соответствующие не включенной установке, и затем проследиваться режим выхода на рабочий режим. Разумеется, так никто не поступает из-за бессмысленности такого рода расчетов и из-за необходимого для этого огромного времени. Ведь выход на рабочий режим в экспериментах длится обычно более часа. Утверждение Г.Г.Петраша, что в работах [5–11] «моделируется реальный процесс перехода к регулярным импульсам», не соответствует действительности.

2. Г.Г.Петраш утверждает, что итерационной процедурой для определения предимпульсных концентра-

ций различных реагентов пользоваться нельзя, т. к. «такие итерации не соответствуют никакому реальному процессу». Это утверждение ошибочно. Итерации не должны соответствовать физическому процессу, они должны сходиться к правильному решению. Отметим, что итерации используются и в работах [5, 6], которые Г.Г.Петраш ставит нам в пример.

В наших работах используется экспериментальная зависимость тока от времени, соответствующая установившемуся режиму. Путем итераций проводится согласование предимпульсных значений концентрации и температуры электронов со значениями, рассчитанными для конца межимпульсного интервала. Задавать экспериментально измеренный импульс тока в рассматриваемых случаях значительно надежнее, чем моделировать электрическую цепь, данных о которой, к тому же, обычно недостаточно. Кстати, в тех случаях, когда это нужно, мы моделируем и электрическую цепь [1].

3. Утверждается, что «серьезные отступления от самосогласованности модели связаны также с тем, что в [1–4] не проводится расчет температуры газа». Но температура газа T_g практически не меняется за время импульса. Проще и надежнее ее не рассчитывать, а использовать в модели значение, взятое из эксперимента.

4. Отмечается, что температура газа T_g в наших статьях не указана. В работах [1, 2] это действительно так. Дело в том, что знание T_g наиболее существенно лишь при определении предимпульсных населенностей атомов меди в основном состоянии. При сравнении же расчетов нашей модели с расчетами и экспериментами [5, 6] предимпульсные концентрации атомов меди в основном состоянии в наших расчетах мы выбирали равными их значениям из этих же работ. Это представляется нам более надежным.

Значение $T_g = 0.146$ эВ, использовавшееся нами в некоторых расчетах кинетики в [1, 2], было действительно несколько занижено по сравнению с реальной температурой газа. Поэтому нами был проведен пересчет как предимпульсных параметров различных реагентов, так и энергий генерации для $T_g = 0.215$ эВ. Оказалось [4], что энергии генерации отличаются от прежних значений примерно на 1%. Данные пересчета были предоставлены Г.Г.Петрашу год назад в диссертации [14] (см. табл. 1, 2). Причина нечувствительности энергии генерации к температуре газа обусловлена отмеченным выше правильным

А.М.Бойченко, Г.С.Евтушенко, О.В.Жданев, С.И.Яковленко. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: syakov@kapella.gpi.ru

Табл.1. Начальные значения реагентов плазмы, полученные в результате самосогласованного расчета [1, 2] при частоте 12 кГц ($N_{Cu} = 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$) ($N_H = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для всех случаев, где N_{H_2} отлична от нуля). В расчетах по моделированию кинетики использовалась температура газа $T_g = 0.146 \text{ эВ}$.

Параметры плазмы и энергии генерации	$N_{H_2} (10^{16} \text{ см}^{-3})$					
	0	0.165	0.33	1.65	3.3	4.95
$N_{Ne}^+ (10^{12} \text{ см}^{-3})$	6.25	6.13	5.96	4.25	2.8	2.02
$N_{Cu}^+ (10^{13} \text{ см}^{-3})$	1.96	1.9	1.79	1.2	0.835	0.67
$N_{D_{5/2}} (10^{11} \text{ см}^{-3})$	7.54	7.38	6.31	1.94	0.965	0.74
$N_{D_{3/2}} (10^{11} \text{ см}^{-3})$	1.06	1.01	0.866	0.21	0.0823	0.0533
$N_{Cu}^{min} (10^{14} \text{ см}^{-3})$	4.91	5.07	5.2	5.73	5.98	6.16
$T_e \text{ (эВ)}$	0.171	0.17	0.165	0.1465	0.146	0.146
$N_{H^-} (10^9 \text{ см}^{-3})$	–	1.63	2.01	2.36	1.8	1.54
$N_{CuH} (10^{10} \text{ см}^{-3})$	–	7.98	11.9	6.35	1.83	0.775
$N_{H_2} (10^{14} \text{ см}^{-3}) (v = 1)$	–	0.77	1.39	2.8	1.85	1.09
$N_{H_2} (10^{11} \text{ см}^{-3}) (v = 2)$	–	2.9	4.77	4.08	0.801	0.149
$E_t (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	3.00	2.95	2.92	2.72	2.45	2.20
$E_{510} (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	2.14	2.1	2.09	1.95	1.77	1.61
$E_{578} (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	0.86	0.85	0.833	0.765	0.674	0.59

Примечание. Здесь и в табл.2 E_t – общая удельная энергия генерации, E_{510} – удельная энергия генерации на длине волны 510.6 нм, E_{578} – удельная энергия генерации на длине волны 578.2 нм, N_{Cu}^{min} – минимальная концентрация меди в течение импульса возбуждения. Энергии генерации для различных температур газа ($T_g = 0.146 - 0.215 \text{ эВ}$) меняются примерно на 1 %, если в расчетах берутся одни и те же плотности атомов меди в основном состоянии.

Табл.2. Начальные значения реагентов плазмы, полученные в результате самосогласованного расчета [1, 2] при частоте 12 кГц ($N_{Cu} = 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$) ($N_H = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для всех случаев, где N_{H_2} отлична от нуля). В расчетах по моделированию кинетики использовалась температура газа $T_g = 0.215 \text{ эВ}$.

Параметры плазмы и энергии генерации	$N_{H_2} (10^{16} \text{ см}^{-3})$					
	0	0.165	0.33	1.65	3.3	4.95
$N_{Ne}^+ (10^{13} \text{ см}^{-3})$	3.3	3.2	3.06	2.08	1.3	0.92
$N_{Cu}^+ (10^{13} \text{ см}^{-3})$	–	–	–	–	–	–
$N_{D_{5/2}} (10^{12} \text{ см}^{-3})$	6.7	6.6	5.6	1.7	0.86	0.66
$N_{D_{3/2}} (10^{11} \text{ см}^{-3})$	9.5	9.1	7.7	1.9	0.74	0.48
$N_{Cu}^{min} (10^{14} \text{ см}^{-3})$	4.9	5.1	5.2	5.7	6.0	6.2
$T_e \text{ (эВ)}$	0.225	0.224	0.223	0.22	0.217	0.216
$N_{H^-} (10^9 \text{ см}^{-3})$	–	2.5	3.1	3.6	2.7	2.3
$N_{CuH} (10^{11} \text{ см}^{-3})$	–	2.2	3.2	1.7	0.51	0.21
$N_{H_2} (10^{14} \text{ см}^{-3}) (v = 1)$	–	0.84	1.5	3.1	2.02	1.2
$N_{H_2} (10^{11} \text{ см}^{-3}) (v = 2)$	–	5.6	9.2	7.9	1.5	0.287
$E_t (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	3.00	2.90	2.92	2.72	2.40	2.20
$E_{510} (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	2.1	2.1	2.1	1.9	1.7	1.6
$E_{578} (10^{-6} \text{ Дж/см}^3)$	0.9	0.8	0.82	0.8	0.7	0.6

выбором предимпульсных концентраций меди. Как и следовало ожидать, проверка показала, что все результаты работ [1, 2], в частности конкретные значения критических плотностей метастабильных состояний, остаются справедливыми.

5. Г.Г.Петраш утверждает, что в наших работах температура электронов T_e опускается ниже температуры газа T_g , а это, с его точки зрения, противоречит законам термодинамики. Для ясности отметим, что, во-первых, в наших работах [1, 2] T_e не опускается ниже T_g , а в приводимой Г.Г.Петрашом таблице строки 3, 4, 6, 7 не содержат наших данных. Во-вторых, нами используются кинетические коэффициенты, удовлетворяющие принципу детального равновесия, что исключает противоречие с термодинамикой.

На самом деле T_e может на некоторое время опускаться ниже T_g при сравнительно большой концентрации молекулярных добавок [3, 4, 5], и это не противоречит

термодинамике. Дело в том, что возбужденные колебательные состояния молекулы водорода исчезают вследствие химических реакций, учитываемых в моделях [3–5]. В результате возбуждение колебаний электронами не вполне компенсируется обратными переходами, и это приводит к неравновесному охлаждению электронов.

Отметим, что снижение электронной температуры ниже газовой имеет место в расчетах работы [5], правильность которой не подвергается Г.Г.Петрашом сомнению. Более того, эта работа ставится нам в пример. Из анализа рис.8, 9 работы [5], проведенного с использованием связи T_g и концентрации атомов меди в основном состоянии [9], следует, что в этих расчетах температура газа на оси трубки больше температуры электронов ($T_g > 0.22 \text{ эВ}$, $T_e < 0.19 \text{ эВ}$).

Итак, нами рассмотрены все выдвинутые в заметке Г.Г.Петраша замечания в адрес работ [1–4]. Все его общие критические утверждения просто не верны. Верные

же частные замечания были нами учтены ранее и, как было показано, они не влияют на выводы наших работ.

1. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **13**, 1231 (2003).
2. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **33**, 1047 (2003).
3. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В., Яковленко С.И. *Оптика атмосферы и океана*, **16**, 1036 (2003).
4. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **14**, 1031 (2004).
5. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 438 (2000).
6. Cheng C., Sun W. *Opt. Commun.*, **144**, 109 (1997).
7. Carman R.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1876 (1994).
8. Carman R.J., in *Pulsed Metal Vapour Lasers*. Ed. by C.E.Little, N.V.Sabotinov. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 203–214).
9. Carman R.J. *J. Appl. Phys.*, **82**, 71 (1997).
10. Ivanov V.V., Klopovskii K.S., Mankelevich Yu. A., Motovilov S.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 128 (2002).
11. Marshall G.D. *Kinetically Enhanced Copper Vapour Lasers. PhD Thesis* (Clarendon Laboratory, Oxford, 2002).
12. Garcia-Prieto J., Ruiz M.E., Poulain E., Ozin G.A., Novaro O. *J. Chem. Phys.*, **81**, 5920 (1984).
13. Carman R.J., Mildren R.P., Piper J.A., Marshall G.D., Coutts D.W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 215 (2001).
14. Жданеев О.В. *Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой. Канд. дис.* (Томск, ТПУ, ИОФ СО РАН; М., ИОФ РАН, 2004).