

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ**  
**ИНСТИТУТ**  
*имени*  
*П.Н.Лебедева*



**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

Г.Г.ПЕТРАШ

**4**

**О МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАЗЕРА  
НА ПАРАХ МЕДИ С ДОБАВКАМИ  
ВОДОРОДА**

МОСКВА 2005

## **Аннотация**

Рассматриваются результаты моделирования импульсного лазера на парах меди с добавками водорода, представленные в статьях А.М.Бойченко и др. Обсуждаются результаты тестирования модели. Отмечается, что принятая в рассматриваемых статьях модель приводит к явно ошибочным значениям предимпульсной температуры электронов, которая в большинстве случаев оказывается ниже не только оцененной температуры газа, но даже ниже температуры стенки разрядной трубки. Обсуждаются некоторые другие ошибочные результаты и выводы. Анализируются возможные причины, приводящие к ошибочным результатам. Делается вывод, что наиболее вероятные причины – несамосогласованность модели и отсутствие расчета температуры газа.

## **Summary**

The results of pulsed copper vapor lasers with hydrogen additives presented in the papers of A.M.Boichenko et al are considered. It is stated that the model accepted in the papers gives evidently erroneous values of pre-pulse electron temperature which in many cases is not only below estimated gas temperature but below even of discharge tube wall temperature. Some other erroneous results and conclusions are also discussed. Possible reasons leading to the erroneous results are analyzed. It was concluded that the most probable reasons of these results are non self consistence of the model and absence of gas temperature computations.

## 1. Введение.

В Квантовой электронике №12 за 2003 год опубликована обширная статья А.М.Бойченко и др. [1] «Теоретический анализ механизмов влияния добавок водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди». В ней описывается теоретическая модель этого лазера, и приводятся результаты расчетов характеристик генерации и плазмы импульсного разряда, а также плотностей основных компонентов плазмы. Тот же вопрос обсуждается в другой статье тех же авторов [2]. Эта статья содержит в основном те же результаты с небольшими добавлениями и использует ту же модель. В работе [3] тех же авторов также приводятся результаты моделирования лазера на парах меди с добавками водорода, на этот раз промышленного лазера «Кристалл-ЛТ-40». Наконец, в недавно опубликованной работе [4], практически идентичной работе [3] (с точностью до перевода и некоторых изменений, которые обсуждаются далее) также моделируется лазер «Кристалл-ЛТ-40». Во всех этих работах используется одна и та же модель, и результаты моделирования имеют одни и те же характерные особенности.

Развитие методов теоретического моделирования импульсных лазеров на парах металлов, и в частности теоретическое исследование влияния различных добавок на работу этих лазеров, представляет несомненный интерес. Однако результаты разных работ заметно отличаются. Поэтому необходимо проанализировать достоинства и недостатки методов моделирования. Цель настоящей работы – обсудить особенности моделирования в указанных выше работах.

## 2. Особенности моделирования в [1-4].

В этих работах в большинстве случаев не моделируются процессы в системе импульсного питания газоразрядной трубки (ГРТ). Вместо этого из эксперимента берется измеренный импульс тока  $J(t)$  через ГРТ, соответствующий условиям, установившимся в режиме регулярных импульсов. С использованием этого тока рассчитываются все характеристики плазмы разряда и характеристики генерации. В начале задаются какие-то начальные условия, которые в этих работах не приводятся, и далее с тем же импульсом тока проводятся итерации, т.е. просчитываются последовательно процессы в импульсах возбуждения и в межимпульсные периоды во многих импульсах до тех пор, пока результаты не перестанут меняться от импульса к импульсу. В работах приводятся таблицы начальных (предимпульсных) значений основных параметров активной среды, полученные таким образом, которые рассматриваются как *самосогласованные*. Соответственно *самосогласованными* считаются, видимо, все полученные с этими начальными условиями значения параметров и все зависимости, характеризующие работу моделируемого лазера. Такой подход позволяет заметно упростить расчеты.

Другая особенность моделирования в [1-4] состоит в том, что не решаются уравнения для температуры газа  $T_g$ . Как авторы учитывали нагрев газа, и какую предполагали  $T_g$ , в статьях, к сожалению, не указывается.

Еще одно отличие рассматриваемых работ от последних работ по моделированию лазера на парах меди (ЛПМ) состоит в том, что в [1-4] рассчитываются средние по объему значения вычисляемых величин. Как проводится усреднение, не уточняется. Видимо, просто предполагается однородное распределение всех входящих в игру величин по сечению ГРТ. Такое моделирование может дать только довольно грубое описание процессов в ЛПМ, т.к. хорошо известно, что распределения наиболее важных параметров, таких как температура и плотность электронов  $T_e$  и  $n_e$ ,  $T_g$ , плотности меди и других компонентов активной среды, населенности уровней, заметно неоднородны по сечению ГРТ (см. например [5,6]), и они меняются как в процессе перехода к регулярным импульсам, так и при изменении внешних условий работы лазера, в частности при введении различных добавок. Например, в работах [7,8] указывалось, что добавки водорода приводят к изменению распределения средней мощности генерации от распределения с максимумом вблизи стенок ГРТ к распределению с максимумом на оси.

Кроме того, для ГРТ с диаметром разрядного канала 3-4 см и более заметную роль играет скин-эффект [9,10]. Электрическое поле проникает в плазму с заметной задержкой, сравнимой со временем формирования инверсии. Как следствие возбуждение уровней и образование инверсии неоднородно по сечению ГРТ, и эта неоднородность меняется со временем.

Расчет средних по объему величин не учитывает всех этих особенностей, и это должно приводить к заметным систематическим ошибкам. К сожалению, в [1-4] этот вопрос не рассматривается, и не делается попыток оценить возможные погрешности моделирования, связанные с расчетом средних по объему величин.

### **3. Тестирование модели.**

После введения и описания своей модели авторы [1,2] обсуждают различные механизмы влияния добавок водорода на работу ЛПМ. В процессе анализа этих механизмов авторы, пользуясь в основном результатами уже своего моделирования, часть из них отвергают, с другими соглашаются. Нам представляется более правильным начать обсуждение с результатов тестирования модели. Тестирование проводилось путем сравнения с результатами экспериментальных измерений и компьютерного моделирования, представленными в работах [11,12], в которых, как считают авторы [1,2], изложены наиболее подробные результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния добавок водорода на работу ЛПМ. При тестировании в своих расчетах авторы [1,2] использовали экспериментально

измеренные зависимости тока, протекающего через ГРТ в режиме регулярных импульсов, от времени.

### 3.1. Сравнение с работой [11].

Рассмотрим сначала результаты тестирования путем сравнения с работой [11]. Некоторое удивление вызывает, почему выбрана для сравнения именно эта работа. Она, в общем, посвящена не исследованию влияний добавок водорода, а моделированию «кинетически улучшенного» (kinetically enhanced) ЛПМ, использующего добавки HCl и водорода. Механизмы влияния добавок водорода к ЛПМ тут не обсуждаются, а сам ЛПМ с добавкой 2% водорода выбран только для сравнения.

Гораздо подробнее влияние добавок водорода исследовалось в работе [7], также цитируемой в [1,2]. В ней представлены результаты измерений основных характеристик лазера при различных добавках водорода, а также для сравнения при добавках гелия, аргона, ксенона и некоторых других газов, в том числе, содержащих водород. Это сравнение позволяет привести дополнительные аргументы в пользу выбора механизма влияния водорода. Более детально эти исследования и их результаты изложены в [13].

Сравнение средней мощности генерации, измеренной в [11], с рассчитанной в [1,2] показало хорошее согласие (см. таблицу 1). Заметно хуже согласие с результатами моделирования [11]. Особенно большое отличие имеет место для случая, когда отсутствует добавка водорода. Измеренная для этого случая в [11] средняя мощность составила 59,6 Вт, по модели [11] -33,5 Вт, а по модели [1,2] -61,04 Вт. Однако авторы [11] не очень доверяют указанной измеренной величине мощности. Они считают, что различие между измеренной и рассчитанной ими мощностью связано с наличием в эксперименте остаточного водорода. Действительно, рост мощности при добавке водорода в эксперименте [11] оказался заметно меньше (13%), чем обычно наблюдается. Так что совпадение результатов экспериментов [11] и расчетов [1,2] не столь уж убедительно.

Таблица 1. Сравнение средней мощности генерации в работах [11] и [1,2].

Содержание водорода	P, Вт, [10], эксперимент	P, Вт, [10], модель	P, Вт, [1,2], модель
?	59,6	33,5	61,4
2%	67,2	76,8	70,83

При моделировании лазера [11] в [1,2] использовалась начальная концентрация меди в основном состоянии  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Такое значение принято из тех соображений, что «отношение температуры газа к температуре стенки ГРТ составляет  $\sim 1,3-1,5$ , а также с учетом приведенного в [11] значения

пристеночной концентрации меди. При этой плотности меди наблюдалось довольно хорошее согласие с экспериментально измеренными мощностями генерации». К сожалению, и здесь остается только гадать, какая же реально в расчетах принималась температура газа.

В дальнейшем в [1,2] на рис. 3 проводится сравнение некоторых зависимостей, полученных в эксперименте [11], и соответствующих зависимостей по модели [1,2]. Надо отметить, что прямо сравнивать эти результаты невозможно, т.к. в [11] все результаты по кинетике ( $T_e(t)$ ,  $N_e(t)$ ,  $N_{Cu}(t)$ ,  $N(D_{3/2})$ ) приведены для оси ГРТ, в то время как в [1,2] рассчитывались средние по сечению величины. Так, рассчитанные в [1,2] зависимости средних значений  $T_e(t)$  в импульсе возбуждения практически совпадают с зависимостями, рассчитанными в [11], в то время как на оси ГРТ  $T_e$  обычно заметно больше, чем средние по сечению. Заметное расхождение имеет место и в поведении  $T_e(t)$  в межимпульсный период. Между тем, от поведения  $T_e(t)$  как в импульсе возбуждения, так и в межимпульсный интервал, существенно зависят характеристики генерации ЛПМ. Следует, однако, отметить, что в [1,2] и в [11] нигде не указано, что принято за начало отсчета  $t = 0$  на оси времени на графиках, соответствующих импульсу возбуждения. Действительно ли совпадали сравниваемые зависимости во времени или они на рисунках совмещались, остается не ясным. Отметим, что рассчитанный в [1,2] импульс генерации начинается значительно раньше, чем в эксперименте [11], хотя, судя по рис. 3,  $T_e$  и  $N_e$  развиваются во времени практически одинаково как в [11], так и в [1,2]. Отметим, что обычно импульс генерации четко привязан к  $T_e(t)$  и  $N_e(t)$ . Так что и здесь трудно говорить о согласии результатов.

Рис. 3 в [1,2] выполнен в таком масштабе, что трудно достаточно точно считать значения приведенных величин. Более точные рассчитанные значения предимпульсных  $T_e$  и населенностей метастабильных уровней приведены в таблицах 3 и 4. Поскольку эти величины существенно влияют на работу лазера, и этому влиянию в работах авторов [1,2] уделяется особое внимание, мы рассмотрим их более подробно.

Ниже в таблице 2 приведены значения  $T_e$  в эВ и населенностей метастабильных уровней меди, рассчитанные по модели [1,2] для лазера из [11], а также для удобства сравнения значения  $T_e$  в К и значения указанных населенностей, соответствующие равновесию с  $T_e$ . Напомним, что концентрация меди выбиралась в [1,2], исходя из пристеночного значения, приведенного в [11] (что соответствует  $T_{ст} \approx 1770$  К) и предположения, что температура газа  $T_g \approx (1,3-1,5) T_{ст} \approx 2300-2655$  К.

Практически во всех работах, посвященных ЛПМ, предполагается, что в межимпульсный период  $T_e$  приближается к  $T_g$ , оставаясь к концу периода несколько выше  $T_g$ . При этом населенность метастабильных уровней

определяется в основном взаимодействием с электронами и к концу межимпульсного периода близка к равновесной с  $T_e$ . Это же утверждается и в [1,2]. Учитывая сказанное, результаты моделирования, представленные в таблице 2, вызывают вопросы.

Таблица 2. Предимпульсные значения  $T_e$  и населенностей метастабильных уровней.

$N_{H_2}, \text{см}^{-3}$	$T_e, \text{эВ}$	$T_e, \text{К}$	$N_{D_{5/2}}, \text{см}^{-3}$	$N_{D_{5/2}}, \text{см}^{-3}$ Равн. с $T_e$	$N_{D_{3/2}}, \text{см}^{-3}$	$N_{D_{3/2}}, \text{см}^{-3}$ Равн. с $T_e$
0	0,171	1984	$7,54 \cdot 10^{11}$	$8,85 \cdot 10^{11}$	$1,06 \cdot 10^{11}$	
$1,65 \cdot 10^{14}$	0,170	1973	$7,38 \cdot 10^{11}$	$6,75 \cdot 10^{11}$	$1,01 \cdot 10^{11}$	$9,96 \cdot 10^{10}$
$3,3 \cdot 10^{15}$	0,165	1914	$6,31 \cdot 10^{11}$	$5,27 \cdot 10^{11}$	$8,66 \cdot 10^{10}$	$7,43 \cdot 10^{10}$
$1,65 \cdot 10^{16}$	0,1465	1700	$1,94 \cdot 10^{11}$	$1,82 \cdot 10^{11}$	$2,10 \cdot 10^{10}$	$2,107 \cdot 10^{10}$
$3,3 \cdot 10^{16}$	0,146	1694	$9,65 \cdot 10^{10}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$8,23 \cdot 10^9$	$2,027 \cdot 10^{10}$
$4,65 \cdot 10^{16}$	0,146	1694	$7,40 \cdot 10^{10}$	$1,76 \cdot 10^{11}$	$5,33 \cdot 10^9$	$2,027 \cdot 10^{10}$

Как видно из таблицы 2, с ростом добавок водорода рассчитанная в [1,2]  $T_e$  уменьшается от 1984 К до 1694 К, что все время ниже предполагаемой температуры газа, а при больших добавках водорода даже ниже, чем  $T_{ст}$ . При этом рассчитанные значения населенности метастабильных уровней  ${}^2D_{5/2}$  и  ${}^2D_{3/2}$  при небольших добавках водорода несколько превышают равновесные с  $T_e$  значения, (что соответствует ожидаемой ситуации), а при больших добавках водорода эти населенности оказываются ниже равновесных с  $T_e$  и даже ниже равновесных с  $T_{ст}$ . Рассчитанные значения населенностей в двух нижних строках таблицы 2 заметно отличаются при одной и той же  $T_e = 1694$  К.

Вызывает удивление, что авторы не замечают и никак не обсуждают эти особенности результатов своего моделирования. Имея такие результаты, они должны были бы либо отказаться от предположения, что  $T_e$  релаксирует к  $T_g$ , либо отказаться от упомянутой оценки  $T_{ст}$  и  $T_g$ , либо признать наличие значительных ошибок моделирования. Кроме того, следовало бы объяснить, какой процесс понижает населенность метастабильных уровней ниже равновесной с  $T_e$  и  $T_g$ . Можно предположить, что авторы принимали  $T_g = T_{ст}$  (что само по себе должно приводить к серьезным ошибкам), что и способствовало получению низких значений предимпульсной  $T_e$ . Однако это не объясняет, почему рассчитанные  $T_e < T_{ст}$ . Значения же  $N_D$  ниже

равновесных могут быть результатом систематических ошибок, свойственных использованной модели. Для прояснения ситуации полезно обсудить результаты тестирования модели путем сравнения с работой [12].

### 3.2. Сравнение с работой [12].

В расчетах [1,2] в этом случае начальная концентрация меди соответствовала приведенной в [12]. Принималась также плотность неона  $1,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Начальные значения остальных параметров вычислялись с помощью итераций. Соответствующие значения принятых концентраций меди и неона и рассчитанные начальные населенности метастабильных уровней, взятые из таблицы 8 [1,2], приведены ниже в таблице 3.

Как видно из этой таблицы, и в этом случае начальные населенности метастабильных уровней весьма низкие. Они соответствуют равновесным с  $T_e$ , которую мы приводим для сравнения в указанной таблице. Эти значения и здесь ниже, чем предполагаемая  $T_{ст}$ , которая здесь должна быть выше, чем в [11], т.к. принята более высокая концентрация меди. Какая принималась  $T_g$ , и здесь не указывается. Можно оценить  $T_g$ , используя принятые значения давления неона (30 Торр) и его концентрации. Эта оценка дает:  $T_g \geq 2896 \text{ К}$ , что намного больше, чем оцененные значения  $T_e$ , приведенные в таблице 3. Отметим также, что рассчитанная в [12] предимпульсная населенность метастабильного уровня  $^2D_{5/2}$  на оси ГРТ соответствует обычно наблюдаемой для ЛПМ. Но она примерно на два порядка больше, чем рассчитанная по модели [1,2]. Это кстати показывает, насколько важно надежно моделировать поведение  $T_e$ .

Таблица 3. Начальные концентрации реагентов плазмы для расчетов по тестированию путем сравнения с результатами [12].

Концентрация неона	$1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$T_g \geq 2896 \text{ К}$ (оценка)
Концентрация меди	$1.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	
Начальная населенность уровня $D_{3/2}$ (К)	$2,34 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$	( $T_e = 0,138 \text{ эВ} = 1601 \text{ К}$ )
Начальная населенность уровня $D_{5/2}$ (К)	$2.43 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$	( $T_e = 0,139 \text{ эВ} = 1613 \text{ К}$ )

Прямое сравнение результатов [1,2] и [12], относящихся к другим характеристикам, и здесь затруднено, т.к.  $T_e$ ,  $n_e$  и населенности уровней приведены в [12] для оси ГРТ, а в [1,2] рассчитывались средние по сечению величины. Кроме того, большинство результатов в [12] приведено для добавки водорода 0,3%, соответствовавшей максимальной мощности генерации, а в [1,2] эти результаты сравниваются со значениями, рассчитанными для добавки 1% водорода. Тем не менее, имеют место и заметные расхождения



между результатами [1,2] и [12], которые отмечают сами авторы [1,2]. В частности, заметно отличается напряжение на ГРТ. Как отмечается в [1,2], рассчитанное там максимальное напряжение примерно в 1,5 раза больше, чем приведенное в [12].

Учитывая сказанное, трудно согласиться с авторами [1,2], которые считают удовлетворительным согласие результатов своего моделирования с результатами [11,12].

### 3.3 Моделирование лазера «Кристалл LT-40» с добавками водорода [3,4].

В этом случае моделируется лазер, возбуждаемый тиратронным источником питания, описанный в работе [14]. В этой работе не приводится импульс тока для тиратронной системы питания (приведен импульс тока для ламповой системы питания, однако лазер с этой системой питания не моделируется). При моделировании использовался импульс тока, приведенный в [15,16]. Лазер отличался от рассмотренных выше более высоким давлением неона – 180 Торр. Добавка водорода, обеспечивавшая максимальную среднюю мощность генерации, составляла для этого лазера 5%.

Результаты расчета  $T_e$  здесь удивляют еще больше. В таблице 4 приведены значения концентрации меди, которая, как показали эксперименты [14], увеличивалась с ростом концентрации добавки водорода из-за увеличения температуры стенки ГРТ от 1500 до 1550 °С, и, следовательно, температуры газа, а также рассчитанные значения предимпульсной  $T_e$  и соответствующих населенностей метастабильных уровней меди. Для сравнения мы приводим и здесь значения  $T_e$  в К и равновесные с  $T_e$  населенности метастабильных уровней.

Как видно, с ростом концентрации добавленного водорода, и соответственно с ростом  $T_{ст}$  и  $T_g$ ,  $T_e$  непрерывно падает, оставаясь все время ниже и  $T_{ст}$  и  $T_g$ . При больших добавках водорода различие становится на наш взгляд катастрофическим. Так при 5% водорода рассчитанное по модели  $T_e = 1346$  К, а  $T_{ст} = 1825$  К. Отметим, что и для чистого неона без добавок водорода это различие тоже значительное:  $T_e = 1683$  К, а  $T_{ст} = 1773$  К. Так что такое поведение рассчитанных по модели предимпульсных значений  $T_e$  не связано, судя по этим результатам, только с моделированием влияния добавок водорода, а с каким-то пороком в самом методе моделирования.

Оценка средней температуры газа в этом случае может быть сделана, исходя из того, что оптимальное давление водорода в этом случае было 9 Торр (5% от давления неона 180 Торр), а принятая в расчете плотность водорода для этого случая  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Эта оценка дает  $T_g \geq 4300$  К. При такой средней температуре газа нельзя рассчитывать на сколько-нибудь эффективную работу лазера. Скорее всего, плотность водорода была в расчете произвольно занижена.

Таблица 4. Предимпульсные значения  $T_e$  и населенностей метастабильных уровней меди при разных добавках водорода для лазера «Кристалл ЛТ-40», приведенные в [3,4].

$N_{H_2}, \text{см}^{-3}$	0	$8,27 \cdot 10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$3,2 \cdot 10^{16}$
$N_{Cu}, \text{см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1,277 \cdot 10^{15}$	$1,424 \cdot 10^{15}$	$1,587 \cdot 10^{15}$	$1,765 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
$T_e, \text{эВ}$	0,145	0,147	0,13	0,121	0,116	0,103
$T_e, \text{К}$	1683	1590	1509	1404	1346	1195
$N_{D5/2}$	$2,5 \cdot 10^{11}$	$1,85 \cdot 10^{11}$	$1,42 \cdot 10^{11}$	$9,58 \cdot 10^{10}$	$7,91 \cdot 10^{10}$	$5,43 \cdot 10^{10}$
$N_{D5/2}$ Равн. с $T_e$	$2,06 \cdot 10^{11}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	$9,71 \cdot 10^{10}$	$4,88 \cdot 10^{10}$	$3,31 \cdot 10^{10}$	$8,265 \cdot 10^9$
$N_{D3/2}$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$1,32 \cdot 10^{10}$	$7,85 \cdot 10^9$	$5,99 \cdot 10^9$	$3,34 \cdot 10^9$
$N_{D3/2}$ Равн. с $T_e$	$2,34 \cdot 10^{10}$	$1,54 \cdot 10^{10}$	$9,01 \cdot 10^9$	$3,91 \cdot 10^9$	$2,42 \cdot 10^9$	$4,58 \cdot 10^8$
$N_{D5/2}$ Равн. с $T_{ст}$	$3,36 \cdot 10^{11}$				$7,608 \cdot 10^{11}$	
$T_{ст}, \text{К}$	1773				1825	
$T_g(\text{оценка})$					$\geq 4300\text{К}$	

Здесь надо отметить, что в [4] температура стенки ГРТ без добавок водорода указана как  $T_{ст}=1500 \text{ К}$ . Это очевидная ошибка или опечатка. В [3,14] определенно указано, что  $T_{ст}=1500 \text{ }^\circ\text{C}=1773 \text{ К}$ . К тому же принятая при моделировании плотность меди намного больше, чем плотность, соответствующая  $T_{ст}=1500 \text{ К}$ . При столь низкой  $T_{ст}$  генерации вообще не должно быть, т.к. для ГРТ производства «Исток» она возникает обычно при  $T_{ст} \approx 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Проще всего было бы считать, что  $T_{ст}=1500 \text{ К}$  – опечатка, однако в [4] в подписи к таблице 2 указано, что температура газа  $T_g=0,146 \text{ эВ}=1694 \text{ К}$ , что заметно ниже, чем разумная оценка  $T_{ст}=1500 \text{ }^\circ\text{C}=1773 \text{ К}$ . Там же утверждается, что энергия генерации практически не меняется при изменении  $T_g$  в интервале 0,146-0,215 эВ при сохранении начальной плотности меди. Никаких объяснений, почему в [4] приняты другие значения  $T_{ст}$  и  $T_g$ , сильно отличающиеся от принятых в [3,14] притом, что результаты расчетов в [3] и [4] идентичны, не приведено. Отметим также, что при  $N_{H_2} \geq 1,6 \cdot 10^{16}$  рассчитанная в [4]  $T_e$  ниже даже  $T_{ст}=1500 \text{ К}$ . Так что последняя публикация [4] ничего не объясняет, а только запутывает ситуацию.

### 3.4. ЛПМ при высокой частоте повторения импульсов.

В [1,2] рассматривается также влияние частоты следования импульсов. Там приведены результаты моделирования лазера при частотах 50 и 100 кГц.

Насколько можно понять по тому, на какие таблицы автор ссылается, речь идет о лазере из работы [11] с параметрами ГРТ: диаметр 3,8 см, длина 150 см, объем  $1700 \text{ см}^3$ . При этом импульс тока при изменении частоты повторения предполагался неизменным. В табл. 11 из работ [1,2] приводится рассчитанное для добавок водорода  $1,65 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  значение суммарной по двум линиям средней удельной энергии генерации при частоте повторения импульсов 100 кГц  $E_{\text{tot}} = 1,17 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/см}^3$ . Нетрудно подсчитать, что полная энергия импульса со всего объема ГРТ составит  $1,989 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ , а средняя мощность при 100 кГц, соответственно, 198,9 Вт.

Стоит упомянуть, что такой мощности при такой частоте повторения с лазером на переходах меди, да еще с таким диаметром разрядного канала, никто никогда не получал, в том числе и с бромидным, гибридным и с улучшенной кинетикой, где условия для работы при высокой частоте значительно лучше. Если принять, что КПД генерации при этой частоте 0,5% (а это очень оптимистическая величина, которая никогда не достигалась при такой частоте повторения), то мощность, необходимая для возбуждения лазера, составит 40 кВт. При этом активная среда будет заведомо перегрета, и генерации вообще не будет, или скорее трубка разрушится при еще меньшей вводимой мощности. В [11] вводимая мощность была намного меньше, и при этом небольшое ее повышение приводило к заметному перегреву активной среды. Так что и в этом случае результаты моделирования не соответствуют никакой реальности. Связано это, очевидно с тем, что в модели [1,2] не рассчитывается температура газа, которая на самом деле существенно ограничивает продвижение в область высоких частот повторения. Таким образом, результаты расчетов для высокой частоты повторения также не соответствуют реальной ситуации. При этом авторы еще пытаются делать выводы о том, что больше ограничивает мощность генерации при такой частоте.

В [2] также рассматривается влияние предимпульсной плотности электронов и метастабилей на мощность генерации. При этом, как и в других их работах, фиксируется один из этих параметров и рассчитывается, как изменяется мощность генерации при изменении другого. Такой подход не имеет смысла, так как эти параметры в реальности не могут изменяться независимо. Не имеет он смысла и потому, что, как сказано выше, начальные значения  $T_e(0)$ , ошибочны, а, следовательно, ошибочны и начальные значения плотности электронов и метастабилей.

### **3. Возможные причины ошибочных результатов моделирования.**

Возникает вопрос, в чем причина таких серьезных расхождений результатов моделирования [1-4] с результатами экспериментов и других моделей, да и просто с термодинамикой. К сожалению, выяснить эту причину трудно, т.к. в рассматриваемых статьях недостаточно полно описаны условия

моделирования. Как упоминалось, не указано, какая принималась температура газа. Используемые уравнения записаны в общем виде, так что неясно, какие процессы и как реально учитывались в расчетах. Не указано, какие начальные условия принимались при проведении итераций, и т.д. Так что читателю остается только гадать, каковы же были реальные условия моделирования.

Прежде всего, возникает вопрос, каким образом моделирование приводит к значениям  $T_e(0)$  намного меньшим не только  $T_g$ , но и  $T_{ст}$ . Такая ситуация возможна по двум причинам: или в уравнении учитывается какой-то существенный процесс охлаждения электронов, но не учитывается обратный ему процесс нагрева, или сам метод моделирования имеет серьезные пороки.

Следует отметить, что температура электронов – важнейший параметр, во многом определяющий работу ЛПМ. Так,  $T_e(0)$  определяет предимпульсную населенность метастабильных (нижних лазерных) уровней, которая по всем имеющимся данным в типичных условиях работы близка к равновесной с  $T_e$ , т.е. с хорошей точностью может быть описана формулой Больцмана. Это общепринятая позиция, обоснованная как экспериментальными измерениями, так и компьютерным моделированием (см. например монографии [5,6]). С этим, кстати, согласны и авторы [1-4] (см., например [3] стр. 1038).

С другой стороны, величина  $n_e(0)$ , которая в ЛПМ, в том числе с добавками водорода, определяется трехчастичной рекомбинацией, была, видимо, также рассчитана с серьезными ошибками, поскольку скорость трехчастичной рекомбинации резко зависит от  $T_e$  ( $\sim T_e^{-9/2}$ ). Между тем,  $n_e(0)$  и предимпульсная населенность метастабильных уровней существенно влияют на работу лазера, что неоднократно подчеркивали в своих работах и сами авторы [1-4].

Прежде всего, следует отметить, что модель, принятая в [1-4], не может считаться *самосогласованной*. В мировой литературе установилось определенное понятие о самосогласованной модели. В работах, в которых описываются самосогласованные модели [17-23], задаются начальные значения основных параметров задачи ( $T_{ст}$ ,  $N_{Ne}$ , характеристики ГРТ, характеристики системы импульсного питания и др.). Далее, начиная с этих исходных параметров, соответствующих началу импульсов возбуждения, последовательно, путем итераций просчитываются в ряду импульсов характеристики импульсов возбуждения (импульсы тока и напряжения на ГРТ), и на этой основе моделируется кинетика, т.е. рассчитываются  $T_e(t)$ ,  $n_e(t)$ ,  $T_g$ , населенности уровней, инверсия и импульс генерации, а также другие, входящие в игру величины. Эти расчеты проводятся от импульса к импульсу, как в течение импульсов возбуждения, так и в межимпульсные интервалы, до тех пор, пока рассматриваемые параметры не перестанут меняться от импульса к импульсу, т.е. пока не установится режим регулярных импульсов.

По мере увеличения числа импульсов происходит нагрев газа, в связи с чем из-за теплового вытеснения меняется плотность буферного газа и меди,

возникает градиент  $T_g$ ,  $T_e$  и  $n_e$ , растут величины  $n_e(0)$  и  $T_e(0)$  и их градиенты, происходит соответствующее изменение кинетики. При этом заметно изменяются и характеристики импульса возбуждения  $J(t)$  и  $U(t)$  (см., например [24-26]), согласование системы питания с ГРТ и т.д. Все эти процессы в большой степени взаимосвязаны, так что процесс перехода к режиму регулярных импульсов оказывается весьма сложным. В *самосогласованных* моделях просчитываются все эти изменения, т.е. моделируется реальный процесс перехода к регулярным импульсам.

В эксперименте, как правило, измеряются характеристики импульса возбуждения и генерации, а также параметры плазмы импульсного разряда и населенности уровней, соответствующие установившемуся режиму регулярных импульсов, которые и сравниваются с результатами расчетов по самосогласованным моделям.

В отличие от такого подхода, в [1-4] для расчетов используется импульс тока  $J(t)$ , соответствующий уже установившемуся режиму регулярных импульсов, и с этим током проводятся итерации для определения предимпульсных значений входящих в игру величин. Такие итерации не соответствуют никакому реальному процессу, поскольку начинаются с уже установившегося режима, в котором параметры задачи от импульса к импульсу уже не меняются. Как упоминалось, изменения предимпульсных параметров, в частности  $n_e(0)$ , приводят к изменениям импульса тока и напряжения, что в данной модели не учитывается. Поэтому такие итерации не обязаны приводить к правильным значениям предимпульсных параметров. Почему итерации используются в таком варианте, авторы не объясняют. Возможно, что эти итерации и приводят к явно ошибочным значениям  $T_e(0)$ ,  $n_e(0)$  и др.

Серьезные отступления от самосогласованности модели связаны также с тем, что в [1-4] не проводится расчет температуры газа. Это мотивируется тем, что «время интегрирования уравнений не превышает межимпульсный интервал, за который температура газа практически не меняется». То, что  $T_g$  почти не меняется за межимпульсный интервал, действительно соответствует типичным условиям работы импульсного лазера на парах меди, при которых время изменения  $T_g$  обычно много больше межимпульсного интервала. Однако это не означает, что можно не рассчитывать  $T_g$ , а, напротив, означает, что  $T_g$  сильно растет за много импульсов, и что вместо нестационарного можно решать стационарное уравнение для  $T_g$ . Сам же расчет  $T_g$  необходим, т.к. хорошо известно, что от  $T_g$  существенно зависят условия работы ЛПМ, в частности, средняя плотность меди и буферного газа, начальная населенность нижних лазерных (метастабильных уровней) и другие параметры. Нагрев газа, как хорошо известно, ограничивает достижимую среднюю мощность генерации и сильно затрудняет продвижение в сторону высоких частот повторения импульсов [4,5,27]. Как авторы учитывали нагрев газа, и какую

предполагали  $T_g$ , в статьях, к сожалению, не указывается. Видимо, они считали нагрев газа несущественным, что, несомненно, должно приводить к серьезным ошибкам моделирования. Есть основания предполагать, что  $T_g$  полагалась равной  $T_{ст}$ .

Заметим, что выводы о механизме влияния добавок водорода, сделанные в [1,2] отличаются от выводов, сделанных в работах других авторов, в том числе использовавших гораздо более обоснованные самосогласованные модели. Так, в [1,2] утверждается, что тестирование по работе [11] показало хорошее совпадение результатов. Естественно было ожидать, что и выводы совпадут. Однако, это не так. Так, в [1,2] сделан вывод, что при частоте повторения импульсов 10-12 кГц добавки водорода увеличивают мощность генерации за счет тушения метастабильных уровней меди в столкновениях с колебательно возбужденными молекулами  $H_2$ . В работах [7,13] предлагался другой, значительно лучше обоснованный механизм, за счет более быстрого спада  $T_e$  в упругих столкновениях с молекулами  $H_2$ . В работе же [28] определенно указывается, что тушение колебательно возбужденными молекулами  $H_2$  в ЛПМ с добавками водорода не играет роли, т.к. доминирует процесс столкновений с электронами.

#### 4. Заключение

Резюмируя изложенное выше, приходится констатировать, что метод моделирования лазера на парах меди, применяемый в работах [1-4] и основанный на использовании импульса тока, измеренного в режиме регулярных импульсов, приводит к явно ошибочным значениям предимпульсной температуры электронов. В большинстве случаев она оказывается существенно ниже температуры газа, и даже ниже температуры стенки ГРТ. Учитывая, что релаксация плазмы в лазере на парах меди определяется трехчастичной рекомбинацией, резко зависящей от температуры электронов, следует сделать вывод, что и расчет предимпульсной плотности электронов должен приводить к значительным ошибкам.

Поскольку работа лазера существенно зависит от предимпульсных параметров, то и другие результаты и выводы работ [1-4] должны содержать значительные ошибки. В частности, не могут считаться обоснованными выводы о механизме влияния добавок водорода и о факторах, ограничивающих достижимую частоту повторения импульсов. Причины, приводящие к ошибочным результатам в [1-4], определить в настоящий момент затруднительно, так как нет достаточно полного описания условий моделирования. Наиболее вероятная причина состоит в том, что, в отличие от утверждения авторов [1-4], их метод моделирования не является *самосогласованным*, а итерации, проводимые для определения предимпульсных параметров, не моделируют реальный процесс перехода к регулярным импульсам. Существенное отступление от самосогласованности

состоит также в том, что в [1-4] не проводится расчет температуры газа. Это, в частности, приводит к большим ошибкам при моделировании лазера с высокой частотой повторения импульсов.

В целом, метод моделирования в [1-4] представляет явный шаг назад по сравнению с опубликованными ранее самосогласованными моделями.

В заключение отметим, что изложенный выше анализ метода моделирования лазера на парах меди с добавками водорода представляется необходимым также и потому, что тот же метод моделирования те же авторы используют для моделирования этого лазера с добавками цезия, HBr и HCl. Результаты моделирования этих лазеров изложены в недавно опубликованных работах [29-31], и они также вызывают много вопросов. Однако анализ этих работ выходит за рамки настоящей статьи.

#### Литература

1. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В., Яковленко С.И., Квантовая электроника, **33**(12), 1047 (2003)
2. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V., Laser Physics, **13**(10), 1231 (2003).
3. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В., Яковленко С.И., Оптика атмосферы и океана, **16**(11), 1036 (2003).
4. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V., Laser Physics, **14**(8), 1031 (2004).
5. Little C.E., *Metal Vapour Lasers*, (Chichester, John Wiley and Sons 1999).
6. Батенин В.М., Бучанов В.В. и др., *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М. Научная книга, 1998).
7. Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A., Opt. Commun., **110**, 699 (1994).
8. Zhen-Guo Huang, Namba K., Shimizu F., Jap. J. Appl. Phys., **25**, 1677 (1986).
9. Kushner M.J., Warner B.E., J. Appl. Phys., **54**, 2970 (1983).
10. Blau P., in *Pulsed Metal Vapour Lasers*, C.E.Little, N.V.Sabotinov, Editors, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 215 (1996).
11. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A., IEEE J. Quant. Electronics, **36**, 438 (2000).
12. Cheng C., Sun W., Opt. Commun., **144**, 109 (1997).
13. Withford M.J., *Investigations of the effect of trace impurities on copper vapour laser performance*, PhD Dissertation, Macquarie University (1995).
14. Kazaryan M.A., Kolokolov I.S., Lyabin N.A. et al, Laser Physics, **12**(10), 1281, (2002).
15. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Угольников С.А. и др., Квантовая электроника, **31**(3), 191 (2001).
16. Лябин Н.А., Оптика атмосферы и океана, **13**(3), 258 (2000).

17. Kushner M.J., IEEE J. Quantum Electronics, **QE-17**, 1555 (1981).
18. Carman R.J., Brown D.J.W., Piper J.A., IEEE J. Quant. Electronics, **30**(8), 1876 (1994).
19. Carman R.J., in *Pulsed Metal Vapour Lasers*, C.E.Little, N.V.Sabotinov, Editors, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 201 (1996).
20. Carman R.J., J. Appl. Physics, **82**(1) 71 (1997).
21. Ivanov V.V., Klopovskii K.S., Mankelevich Yu.A. et al, Proc. SPIE, v. **4747**, 128 (2002).
22. Marshall G. D., *Kinetically Enhanced Copper Vapour Lasers*, PhD Thesis, Clarendon Laboratory, Oxford, (2002).
23. Chebotarev G.D., Prutsakov O.O., Latush E.L., Proc. SPIE, v. **5483**, 83 (2004)
24. Hogan G.P., *A Study of the Kinetics of Copper Vapour Lasers*, PhD Thesis, University of Oxford (1993).
25. Hogan G.P., Webb C.E., Optics Communications, v. **117**, 570 (1995).
26. Brown D.J.W., Withford M.J., Carman R.J., et al, Proc. SPIE, v. **3889**, 261 (2000).
27. Petrash G.G., Laser Physics, **10**, 994 (2000).  
Петраш Г.Г., Препринт ФИАН № 28, (1999).
28. Carman R.J., Mildren R.P., Piper J.A., et al., Proc. SPIE, **4184**, 215 (2001).
29. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V., Laser Physics, **14**(6), 818 (2004).
30. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V., Laser Physics, **14**(6), 835 (2004).
31. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V., Laser Physics, **14**(7), 930 (2004).



