

Теоретический анализ механизмов влияния добавок водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди

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

Построена кинетическая модель активной среды лазера на парах меди с добавками водорода. Проведено ее тестирование по имеющимся экспериментальным данным. Дан подробный анализ различных точек зрения на улучшение генерационных характеристик лазера при введении добавок водорода. Показано, что улучшение генерационных характеристик при добавлении водорода связано с различными механизмами: для низких частот следования импульсов возбуждения – с увеличением начальной плотности атомов меди в основном состоянии и с тушением метастабильных состояний атома меди, для высоких частот – с уменьшением предимпульсной концентрации и температуры электронов.

Ключевые слова: лазер на парах меди, кинетическая модель, добавка водорода.

1. Введение

Введение водорода в активную среду лазера на парах меди при определенных экспериментальных условиях приводит к существенному росту эффективности генерации [1, 2]. Увеличение генерационных характеристик лазеров на парах металлов с небольшими примесями водорода в последнее время отмечалось во множестве работ (см., напр., [3–10]). На данный момент лазеры, содержащие небольшую (порядка нескольких процентов) примесь водорода к буферному газу, являются самыми эффективными (1%–3%); их средние мощности равны 100–200 Вт [2]. Улучшение характеристик лазера на парах меди при введении добавок водорода отмечалось в работах [3, 4]. Улучшение происходит и для лазеров на парах CuVg [5–7], а также для CuCl-лазеров [8], хотя в этом случае влияние водорода может быть и опосредованным – через образование молекул галогеноводородов. Созданию кинетических моделей лазеров на парах меди с добавками водорода посвящены работы [9, 11].

2. Описание кинетической модели

Для определения механизмов влияния примеси водорода на генерационные характеристики была разработана кинетическая модель с использованием ранее построенной модели для лазера на парах чистой меди [12, 13]. Она описывает изменение во времени средних по объему значений населенностей уровней атома меди, молекулярного и атомарного водорода, плотности ионов меди и водорода, температуры электронов и интен-

сивности лазерного излучения на зеленой и желтой линиях атома меди и т.д.

В модели учтены 9 состояний атома меди: Cu($4s^2S_{1/2}$), Cu($4s^2D_{5/2}$), Cu($4s^2D_{3/2}$), Cu($4p^2P_{3/2}$), Cu($4p^2P_{1/2}$), Cu($5s^2S_{1/2}$)), основное состояние иона меди и два состояния, объединяющие соответственно три Cu* (Cu($4P^0$), Cu($4D^0$), Cu($4F^0$)) и четыре Cu** (Cu($5p^2P_{3/2}$), Cu($5p^2P_{1/2}$), Cu($4d^2D_{5/2}$), Cu($4g^2D_{3/2}$)) близкорасположенных возбужденных уровней (подробнее см. [12, 13]). У неона учитывались основное и первое возбужденное состояния атома (Ne и Ne*), а также основное состояние иона Ne⁺. Учтены также основное (H) и возбужденное (H*) атомарные состояния водорода и ионы H⁺, H⁻; в молекулярном водороде учитывались основное состояние H₂, состояния колебательно-возбужденных уровней $v = 1, 2$, молекулярные ионы H₂⁺ и H₃⁺. Рассмотрено также основное состояние молекулы CuH. Кинетические реакции с участием водорода, учитывавшиеся в модели, приведены в Приложении.

Уравнения для интенсивности $I(\lambda)$ для линий генерации с $\lambda = 510.6$ и 578.2 нм, а также выражения для описания временной зависимости температуры электронов имели вид, аналогичный представленному в работах [12, 13], с соответствующими дополнениями, которые учитывали влияние водорода.

Уравнение баланса для температуры газа не рассматривалось, т.к. время интегрирования уравнений не превышает межимпульсный интервал, за который температура газа практически не меняется.

Плотность электрического тока j через активную среду описывается в модели двумя способами. В одном случае самосогласованно с решением кинетических уравнений для концентраций различных реагентов и с уравнением баланса для температуры электронов решались также уравнения Кирхгофа для электрической цепи. В другом случае непосредственно использовалась экспериментальная зависимость тока от времени. Это было особенно важно при тестировании кинетической модели по экспериментальным данным.

Нестационарные уравнения для концентраций раз-

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

Г.С.Евтушенко, О.В.Жданев. Томский политехнический университет, Россия, 634034 Томск, просп. Ленина, 30; Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 1

Поступила в редакцию 9 декабря 2002 г., после доработки – 14 апреля 2003 г.

личных реагентов, уравнения баланса для температуры электронов и (при необходимости) уравнения Кирхгофа для электрической цепи (всего 39 уравнений) решались самосогласованно с помощью пакета программ ПЛА-ЗЕР [14, 15]. Всего в модели учитывалось ~ 200 кинетических реакций.

3. Механизмы влияния примеси водорода

Перечислим выдвинутые в различных работах предположения о механизмах влияния примеси водорода на работу лазеров на парах металлов:

3.1. В работе [1] не сообщается о сколько-нибудь значительном улучшении генерационных характеристик лазера на парах меди при добавках водорода. Однако [1] является, по-видимому, первой работой, в которой был сделан вывод о том, что примесь водорода приводит к увеличению оптимальной частоты следования импульсов генерации. В ней отмечено, что основным механизмом рекомбинации плазмы является амбиполярная диффузия, а оптимальная частота следования импульсов повышается за счет усиления тройной рекомбинации при введении водорода.

3.2. Согласно работам [12, 13, 16–19], уменьшение предимпульсной концентрации электронов и атомов меди в метастабильном состоянии приводит к увеличению мощности и частоты следования импульсов лазеров на парах металлов. Данные изменения могут обеспечивать добавки водорода: большое сечение упругих [3, 4] столкновений с водородом позволяет электронам эффективно охлаждаться в межимпульсный период, что приводит к уменьшению концентрации атомов меди в метастабильном состоянии; охлаждение электронов, в свою очередь, вызывает увеличение скорости рекомбинации положительных ионов меди, приводящее к снижению предимпульсной концентрации электронов.

3.3. Уменьшение предимпульсной концентрации электронов в активной среде лазера возможно также [5–7] из-за прилипания электронов к атомарному водороду и вследствие диссоциативного прилипания электронов к молекулам водорода (в особенности к колебательно-возбужденным молекулам).

3.4. Улучшение согласования газоразрядной трубки (ГРТ) со схемой возбуждения позволяет осуществлять более эффективное возбуждение активной среды и, следовательно, обеспечивает более высокую эффективность устройства. Данное улучшение согласно [4–7, 9, 10] происходит вследствие более низкой начальной проводимости ГРТ.

3.5. В работах [7, 20] отмечено, что при введении водорода в активную среду наблюдается уменьшение источника основного состояния меди в течение импульса возбуждения в сочетании с более резким восстановлением меди в межимпульсном интервале, особенно на начальном этапе (первые несколько микросекунд). Увеличение скорости восстановления концентрации атомов меди в основном состоянии позволит в оптимальном режиме увеличить энергоэффективность. Отметим, что в работах [5–7] механизмы, рассмотренные в пп. 3.3–3.5, обсуждались применительно к CuVg-лазерам.

3.6. Улучшение генерационных характеристик ЛПМ при введении водорода объясняется возрастанием концентрации атомов меди в основном состоянии в активной среде из-за повышения температуры стенки ГРТ [10],

которое по-видимому, связано с увеличением вкладываемой в разряд энергии. Отметим, что данный механизм может стать причиной образования негативной положительной обратной связи: возрастание введенной мощности приводит к увеличению температуры стенки, а следовательно, к увеличению концентрации меди, из-за чего по причине увеличения частоты столкновений растет сопротивление плазмы и т.д.; в конечном итоге это может привести к срыву генерации.

3.7. Согласно работе [10], в результате увеличения теплопроводности активной среды при добавлении водорода уменьшается температура газа на оси ГРТ, что приводит к уменьшению концентрации атомов меди в метастабильных состояниях (на нижних лазерных уровнях) и соответственно к увеличению мощности излучения лазера. В отношении изменения теплопроводности плазмы после введения водорода в настоящее время не существует единого мнения. Некоторые исследования [10, 21] подтверждают изменение радиального профиля температуры газа, другие указывают на то, что эти изменения минимальны [6]. Следует отметить, что улучшение однородности радиального распределения температуры газа благоприятно сказывается на работе лазера, поскольку облегчает борьбу с перегревом активной среды.

3.8. Снижение общей мощности излучения при концентрации водорода выше оптимального значения связывается в [4] с увеличением потерь энергии на неупругие процессы возбуждения и ионизации молекулярного водорода. В [10] отмечается, что при чрезмерном добавлении водорода уменьшаются концентрация и температура электронов, что ограничивает заселение верхних лазерных уровней.

3.9. На улучшение параметров лазера согласно [22, 23] может оказывать влияние увеличение скорости тушения метастабильных атомов меди колебательно-возбужденными молекулами водорода с образованием молекулы CuH.

Детальное сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными и расчетными данными из работ [9, 10], наиболее подробных из известных авторам, приведено в разд.5. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с полученными в этих работах, поэтому выявление механизмов влияния примеси водорода на кинетику активной среды было проведено с использованием экспериментальных условий работы лазера из [9] (табл.1).

Табл.1. Параметры ГРТ, использовавшиеся в расчетах при моделировании условий работы лазеров, из [9, 10].

Работа	l (см)	d (см)	f (кГц)	p_{Ne} (Тор)	N_{H_2} (см $^{-3}$)
[9]	150	3.8	12	36	2×10^{15}
[10]	90	4	5	30	10^{15}

Примечание: l – длина активной среды, d – диаметр ГРТ; f – частота следования импульсов возбуждения; p_{Ne} – давление неона; N_{H_2} – концентрация водорода.

4. Анализ выдвинутых предположений

Проанализируем выдвинутые ранее предположения об изменении кинетики процессов, протекающих в активной среде, при введении водорода. Нумерация анализируемых в разд.4 предположений соответствует нумерации предположений, приведенных в разд.3.

Оценка значимости различных процессов в расчетах существенно упрощается при использовании потоков реакций (см., напр., [24]). Поток реакции в интервале между моментами времени t_1 и t_2 определяется как

$$F(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} k N_1 \dots N_n dt,$$

где k – скорость реакции; N_i – концентрации входящих в реакцию реагентов. Соотношения значений этих функций непосредственно говорят нам о роли реакций в данном временном промежутке в наработке или исчезновении какого-либо реагента. Если нас интересует вклад какой-либо реакции в энергобаланс электронов, то этот вклад определяется произведением величины потока данной реакции на энергию, передаваемую в электроны за счет элементарного акта, определяемого данной реакцией.

4.1. В [1] утверждается, что основной вклад в уменьшение концентрации электронов вносит амбиполярная диффузия. Согласно проведенным расчетам, например для условий эксперимента [9], амбиполярная диффузия существенно меньше влияет на снижение концентрации электронов, чем объемная рекомбинация. Релаксация плазмы в условиях импульсных лазеров на парах металлов определяется трехчастичной рекомбинацией. Этот факт давно отмечен в работах по лазерам на парах металлов, например в [2, 25]. С другой стороны, в [1] отмечается, что введение атомарного водорода предпочтительнее, чем молекулярного. Согласно результатам нашего моделирования, основной вклад в охлаждение электронов вносят как раз диссоциация и колебательное возбуждение молекулярного водорода в период импульса возбуждения (см. п.4.8). Удельный же вклад упругого охлаждения электронов на молекулярном и атомарном водороде должен быть примерно одинаков. Однако увеличение частоты следования импульсов генерации при добавлении водорода действительно связано с уменьшением плотности электронов из-за их более интенсивного охлаждения. Как видно из рис.1,а, на начальном этапе межимпульсного периода присутствие примеси водорода значительно увеличивает скорость спада температуры электронов, что в свою очередь приводит к более быстрому снижению концентрации электронов. Данный механизм оказывается наиболее существенным при высоких частотах следования импульсов возбуждения (низкие частоты следования рассмотрены в п.4.6).

4.2. В работе [4] был предложен механизм влияния водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди, основанный на том, что молекула водорода имеет большое сечение упругого столкновения с электроном, и данное обстоятельство, по мнению авторов работы [4], должно приводить к улучшению выходных параметров вследствие охлаждения электронов. Результаты численных экспериментов свидетельствуют, что влияние данного механизма на кинетику процессов пренебрежимо мало (табл.2).

Действительно, при сопоставлении потоков реакций следует помнить, что вследствие малой энергии, передаваемой в упругом столкновении, вклад реакций упругого охлаждения в снижение температуры электронов будет меньше вклада остальных реакций, хотя ее поток больше по сравнению с другими потоками. Дело в том, что в уравнении баланса для температуры электронов

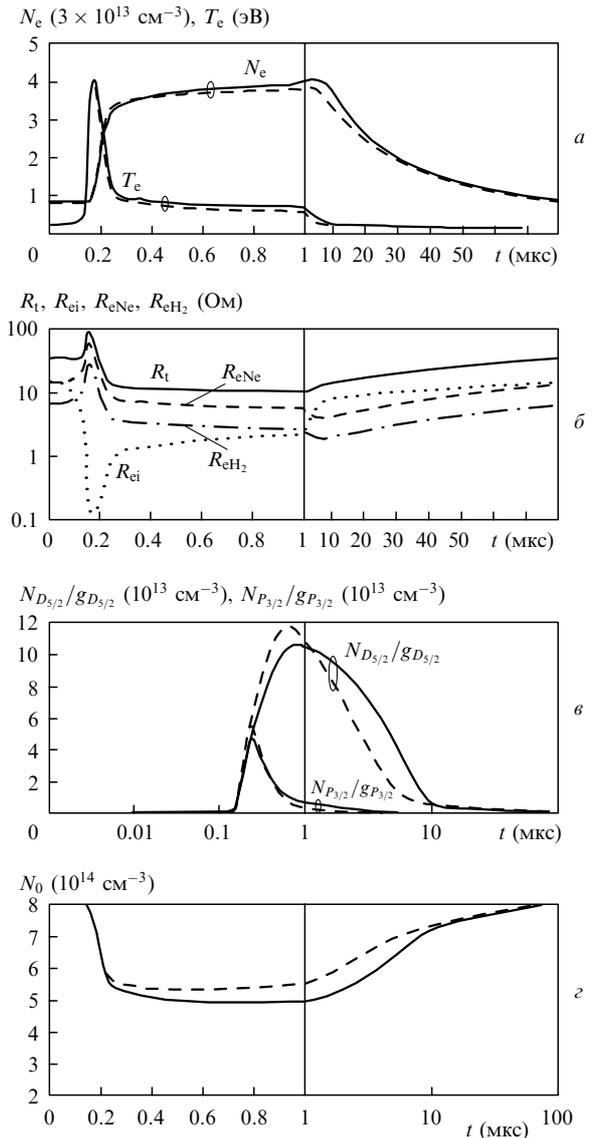


Рис.1. Временные зависимости: а – концентрации и температуры электронов в течение импульса возбуждения и межимпульсного интервала (сплошная кривая – $N_{Cu} = 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 0$, штриховая кривая – $N_{Cu} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 2\%$); б – сопротивления плазмы (сплошная кривая), вклада кулоновских электрон-ионных (пунктирная кривая) и электрон-атомных столкновений (штриховая кривая), вклада столкновений с водородом (штрих-пунктирная кривая) в течение импульса возбуждения и межимпульсного интервала для $N_{H_2} = 2\%$; в – населенностей уровней $N_{D_{5/2}}/g_{D_{5/2}}$ и $N_{P_{3/2}}/g_{P_{3/2}}$ в течение импульса возбуждения (сплошные кривые – $N_{Cu} = 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 0$, штриховые кривые – $N_{Cu} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 2\%$); г – концентрации атомов меди в основном состоянии в течение импульса возбуждения и межимпульсного интервала (сплошная кривая – $N_{Cu} = 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 0$, штриховая кривая – $N_{Cu} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2} = 2\%$). Параметры ГРТ приведены в табл.1, значения реагентов плазмы, использовавшиеся в расчетах – в табл. 3 (для $N_{H_2} = 0$) и табл.4 (для $N_{H_2} = 2\%$, что соответствует начальной концентрации молекулярного водорода в смеси $1.65 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

вклад какого-либо неупругого процесса равен $E_{ik} k_{ik} N_e N$, где E_{ik} – энергия, передаваемая при неупругом столкновении электронов (концентрация N_e) с атомной (молекулярной) компонентой (концентрация N); k_{ik} – скорость данной реакции. Вклад же упругих столкновений равен $3\delta k_{el}(T_e - T_g) N_e N$, где $\delta = m_e/m$ – отношение массы электрона к массе атома или молекулы (концентрация N); k_{el} – скорость упругого процесса; T_e , T_g – темпера-

Табл.2. Потоки реакций охлаждения и нагрева электронов F (3 мкс, 80 мкс) в межимпульсный период для 2 %-ной примеси водорода.

Реакция	Энергия (эВ)	Потоки реакций (см ⁻³)	Суммарные потоки реакций (см ⁻³)
$Ne^+ + 2e \rightarrow Ne^{**} + e$	3.1	$+1.41 \times 10^{13}$	$+1.41 \times 10^{13}$
Кулоновское охлаждение	$-5.43 \times 10^{-4}(T_e - T_g)$	-6.272×10^{19}	-6.272×10^{19}
$Cu(P_{3/2}) + e \rightarrow Cu + e$	3.817	$+2.1 \times 10^{13}$	$+2.1 \times 10^{13}$
$Cu(P_{1/2}) + e \rightarrow Cu + e$	3.786	$+1.138 \times 10^{13}$	$+1.138 \times 10^{13}$
$Cu + e \rightarrow Cu(D_{5/2}) + e$	1.389	-5.139×10^{14}	-5.17×10^{13}
$Cu(D_{5/2}) + e \rightarrow Cu + e$		$+4.618 \times 10^{14}$	
$Cu + e \rightarrow Cu(D_{3/2}) + e$	1.642	-2.06×10^{14}	$+1.32 \times 10^{14}$
$Cu(D_{3/2}) + e \rightarrow Cu + e$		$+3.38 \times 10^{14}$	
$Cu(D_{5/2}) + e \rightarrow Cu(D_{3/2}) + e$	0.253	-1.233×10^{15}	-1.1×10^{14}
$Cu(D_{3/2}) + e \rightarrow Cu(D_{5/2}) + e$		$+1.122 \times 10^{15}$	
$Cu(P_{3/2}) + e \rightarrow Cu(P_{1/2}) + e$	0.0313	$+4.395 \times 10^{15}$	-8×10^{12}
$Cu(P_{1/2}) + e \rightarrow Cu(P_{3/2}) + e$		-4.403×10^{15}	
$Cu^+ + 2e \rightarrow Cu^{**} + e$	1.58	$+6.542 \times 10^{13}$	$+6.542 \times 10^{13}$
Электронная теплопроводность	–	-1.601×10^{14}	-1.601×10^{14}
$H^+ + e = H + e$	10.2	$+2.724 \times 10^{12}$	$+2.724 \times 10^{12}$
$H_2 + e = H_2(v=1) + e$	0.5	-8.36×10^{14}	$+1.105 \times 10^{14}$
$H_2(v=1) + e = H_2 + e$		$+9.465 \times 10^{14}$	
$H_2(v=1) + e = H_2(v=2) + e$	0.5	-1.203×10^{14}	$+2.76 \times 10^{13}$
$H_2(v=2) + e = H_2(v=1) + e$		$+1.479 \times 10^{14}$	
$H_2 + e = H_2(v=2) + e$	1	-1.394×10^{13}	-1.394×10^{13}
$H_2(v=3) + e = H_2(v=2) + e$	0.5	$+2.878 \times 10^{13}$	$+2.878 \times 10^{13}$
$H_2 + e = H_2 + e$	$-5.43 \times 10^{-4}(T_e - T_g)$	-1.07×10^{15}	-1.07×10^{15}

Примечание. Знаки «+» («-») означают нагрев (охлаждение) электронов. Чтобы полностью исключить влияние импульса возбуждения, аргумент t_1 функции F положен равным 3 мкс, окончание межимпульсного периода t_2 соответствует 80 мкс ($f = 12$ кГц); параметры ГРТ приведены в табл.1, начальные концентрации реагентов активной среды – в табл. 4.

туры электронов и газа соответственно. Видно, что отношение вклада упругих реакций ко вкладу неупругих по порядку величины равно произведению потоков реакций на множитель $\delta(T_e - T_g)/E_{ik} \ll 1$.

Раз уж мы затронули вопрос уменьшения предимпульсной концентрации электронов вследствие охлаждения, остановимся на нем подробнее. Уменьшение концентрации электронов, благотворно влияющее согласно п.3.2 на характеристики генерации, возможно также в силу причин, указанных в п.3.3. Как уже отмечалось, проведенные ранее исследования [12, 13, 16, 18, 19] показали, что предимпульсная концентрация электронов оказывает непосредственное влияние на характеристики лазера, в частности на достижимые частотные и энергетические параметры. Исходя из этого мы могли бы ожидать положительного эффекта от уменьшения предимпульсной концентрации электронов. Однако, как показали проведенные исследования (см. также п.4.5), этот эффект становится существенным только при высокой частоте следования импульсов возбуждения. При низких же частотах основной вклад в увеличение энергии излучения происходит опосредованно, через возрастание концентрации меди в активной среде (см. п.4.4). Более того, если бы при введении водорода не происходило процессов, описанных в п.4.4, то полученное уменьшение предимпульсной концентрации электронов не смогло бы компенсировать отрицательного эффекта неупругих потерь, обусловленных добавками водорода (см. п.4.8 и рис.1.а).

4.3. Диссоциативное прилипание электронов к молекулярному водороду практически не оказывает влияния на улучшение генерационных характеристик лазера. Дан-

ная реакция происходит с низкой эффективностью вследствие как малого ($10^{-21} - 10^{-20}$ см²) сечения, так и довольно значительного (3.724 эВ для основного и 3.224 эВ для первого колебательного уровня молекулы водорода) порога данной реакции. Скорость реакции с атомарным водородом составляет порядка 10^{-28} см³/с.

4.4. В экспериментальных работах [4–7] было отмечено, что при введении в активную среду лазера примеси водорода происходит изменение электрических процессов в разрядном контуре, вызванное изменением проводимости плазмы (см. также рис.1.б, где представлено расчетное поведение сопротивления плазмы). В работе [4] данный эффект сводится к увеличению вкладываемой в разряд мощности, что соответственно вызывает увеличение температуры стенки (газа) и концентрации меди в активной среде ГРТ. Как отмечено в разд.2, уравнение баланса для температуры газа не решалось. Однако ясно, что при введенном в смесь водороде температура газа будет больше температуры газа без добавок водорода за счет, например, реакций диссоциации молекул водорода электронным ударом и упругого охлаждения электронов на молекулах водорода (см. Приложение, реакции № 9 и 53). Итак, введение водорода меняет начальную концентрацию атомов меди в основном состоянии.

Для проверки данного предположения мы принудительно увеличили концентрацию атомов меди в активной среде лазера без введения водорода (но температуру стенки ГРТ (и газа) при этом не меняли) и провели серию расчетов. В результате мы получили даже большее увеличение энергии излучения, чем при введении примеси водорода (табл.3, 4). Таким образом, вероятно, именно

Табл.3. Начальные значения параметров плазмы и удельных энергий генерации за импульс при частоте 12 кГц.

N_{H_2} (cm^{-3})	N_{Ne^+} (cm^{-3})	N_{Cu^+} (cm^{-3})	$N_{D_{5/2}}$ (cm^{-3})	$N_{D_{3/2}}$ (cm^{-3})	N_{Cu}^{min} (cm^{-3})	N_{H^-} (cm^{-3})	N_{CuH} (cm^{-3})	N_{H_2} ($\nu = 1$) (cm^{-3})	N_{H_2} ($\nu = 2$) (cm^{-3})	T_e (эВ)	E_{tot} (10^{-6} Дж/ cm^3)	E_{510} (10^{-6} Дж/ cm^3)	E_{578} (10^{-6} Дж/ cm^3)
0	6.25×10^{12}	1.96×10^{13}	7.54×10^{11}	1.06×10^{11}	4.91×10^{14}	—	—	—	—	0.171	3.00	2.14	0.86
1.65×10^{15}	6.13×10^{12}	1.90×10^{13}	7.38×10^{11}	1.01×10^{11}	5.07×10^{14}	1.63×10^9	7.98×10^{10}	7.70×10^{13}	2.90×10^{11}	0.170	2.95	2.10	0.85
3.30×10^{15}	5.96×10^{12}	1.79×10^{13}	6.31×10^{11}	8.66×10^{10}	5.20×10^{14}	2.01×10^9	1.19×10^{11}	1.39×10^{14}	4.77×10^{11}	0.165	2.92	2.09	0.833
1.65×10^{16}	4.25×10^{12}	1.20×10^{13}	1.94×10^{11}	2.10×10^{10}	5.73×10^{14}	2.36×10^9	6.35×10^{10}	2.80×10^{14}	4.08×10^{11}	0.1465	2.72	1.95	0.765
3.30×10^{16}	2.80×10^{12}	8.35×10^{12}	9.65×10^{10}	8.23×10^9	5.98×10^{14}	1.80×10^9	1.83×10^{10}	1.85×10^{14}	8.01×10^{10}	0.146	2.45	1.77	0.674
4.95×10^{16}	2.02×10^{12}	6.70×10^{12}	7.40×10^{10}	5.33×10^9	6.16×10^{14}	1.54×10^9	7.75×10^9	1.09×10^{14}	1.49×10^{10}	0.146	2.20	1.61	0.59

Примечание. Концентрации $N_{Cu} = 8 \times 10^{14} cm^{-3}$ и $N_H = 10^{15} cm^{-3}$ для всех случаев, когда $N_{H_2} \neq 0$. Начальные значения реагентов плазмы получены в результате самосогласованного расчета (см. разд.5), параметры ГРТ приведены в табл.1; E_{tot} – общая удельная энергия генерации, E_{510} , E_{578} – удельные энергии генерации на длинах волн 510.6 и 578.2 нм, N_{Cu}^{min} – минимальная концентрация меди в течение импульса возбуждения.

за счет увеличения температуры ГРТ (газа) и соответственно концентрации меди в активной среде в экспериментах было получено увеличение выходной мощности.

В той же работе [4] был проведен эксперимент с лазером на парах чистой меди, в котором температура ГРТ принудительно повышалась до той, которая была получена с введенной примесью водорода. Однако увеличение излучаемой мощности составило лишь несколько процентов от ее роста, достигнутого при введении молекулярной добавки водорода. Анализ данного обстоятельства показывает, что при принудительном подогреве ГРТ мы не только изменяем концентрацию меди, чего хотели добиться экспериментаторы в работе [4], но и одновременно повышаем уровень, к которому релаксирует температура электронов в межимпульсный период, соответственно определяя равновесную концентрацию атомов меди в метастабильном состоянии. Следовательно, при принудительном повышении температуры газа одновременно будут протекать два конкурирующих процесса: увеличение плотности меди в активной среде и увеличение предимпульсной населенности метастабильного уровня атомов меди. Исходя из этого мы можем сделать вывод о том, что увеличение концентрации атомов меди в метастабильном состоянии не приводит к значительному увеличению выходной мощности при использовании лазера без добавок водорода.

И действительно, рост концентрации меди в основном состоянии, вызванный увеличением энергетического вклада (повышением температуры газа), при введении водорода в активную среду сопровождается, согласно расчетам, уменьшением предимпульсных концентраций атомов меди в метастабильном состоянии вследствие тушения колебательно-возбужденными молекулами водорода (при этом предимпульсные концентрации метастабильных состояний меди различаются на 12% – 14% (для 2%-ной примеси водорода), общая энергия излучения растет на 18% – с 3.00×10^{-6} Дж/ cm^3 за импульс до

3.56×10^{-6} Дж/ cm^3 (см. табл.3, 4 и рис.1,б), а КПД повышается на 20% – с 0.421% до 0.505%).

Итак, согласно нашим расчетам, увеличение выходной мощности при введении водорода в экспериментах было получено в основном вследствие увеличения температуры газа и соответственно концентрации меди в активной среде при одновременном уменьшении предимпульсной населенности метастабильных уровней за счет их тушения молекулами водорода (см. также п.4.1).

4.5. Анализ механизмов истощения содержится в пп.4.4, 4.6, 4.8.

4.6. В работе [6] при добавлении водорода наблюдалось уменьшение истощения и более быстрое восстановление предимпульсной концентрации атомов меди в основном состоянии. В наших численных экспериментах мы также получили данный эффект. В табл.5 (см. также рис.1,з) приведены основные потоки реакций, изменяющие населенность основного уровня атома меди. Видно, что при введении водорода потоки уменьшаются, что ведет к общему увеличению минимального значения, до которого уменьшается концентрация атомов меди в основном состоянии.

Примесь водорода оказывает косвенное воздействие на населенность основного состояния атома меди через изменение концентрации и температуры электронов, поскольку из табл.5 следует, что по абсолютным значениям реакции с участием водорода существенного влияния на концентрацию атомов меди в основном состоянии не оказывают. Из табл.5 видно также, что молекулярный водород «перехватывает» энергию импульса возбуждения, направляя его в том числе и на диссоциацию и возбуждение первых колебательных уровней молекулы водорода. Таким образом, на возбуждение атомов меди расходуется меньший поток энергии по сравнению со случаем отсутствия водорода (см. также п.4.4).

4.7. С целью выявления изменения электронной теплопроводности при введении водорода был проведен ряд

Табл.4. Начальные значения параметров плазмы и удельных энергий генерации за импульс при частоте 12 кГц.

N_{H_2} (cm^{-3})	N_{Ne^+} (cm^{-3})	N_{Cu^+} (cm^{-3})	$N_{D_{5/2}}$ (cm^{-3})	$N_{D_{3/2}}$ (cm^{-3})	N_{Cu}^{min} (cm^{-3})	N_{H^-} (cm^{-3})	N_{CuH} (cm^{-3})	N_{H_2} ($\nu = 1$) (cm^{-3})	N_{H_2} ($\nu = 2$) (cm^{-3})	T_e (эВ)	E_{tot} (10^{-6} Дж/ cm^3)	E_{510} (10^{-6} Дж/ cm^3)	E_{578} (10^{-6} Дж/ cm^3)
0	4.86×10^{12}	2.12×10^{13}	9.33×10^{11}	1.31×10^{11}	5.91×10^{14}	—	—	—	—	0.171	3.63	2.58	1.05
1.65×10^{15}	4.75×10^{12}	2.05×10^{13}	8.80×10^{11}	1.23×10^{11}	6.49×10^{14}	1.65×10^9	9.92×10^{10}	7.80×10^{13}	3.06×10^{11}	0.170	3.56	2.53	1.03
3.30×10^{15}	4.66×10^{12}	1.96×10^{13}	7.18×10^{11}	9.70×10^{10}	6.63×10^{14}	2.06×10^9	1.53×10^{11}	1.42×10^{14}	5.17×10^{11}	0.167	3.54	2.52	1.02
1.65×10^{16}	3.41×10^{12}	1.32×10^{13}	2.23×10^{11}	2.39×10^{10}	7.25×10^{14}	2.46×10^9	8.17×10^{10}	2.96×10^{14}	4.72×10^{11}	0.1465	3.31	2.37	0.942

Примечание. Величины $N_{Cu} = 10^{15} cm^{-3}$, $N_H = 10^{15} cm^{-3}$ (см. прим. к табл.3).

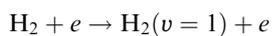
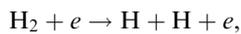
Табл.5. Потоки реакций истощения и восстановления концентрации атома меди F (0, 500 нс) в основном состоянии в течение импульса возбуждения.

Реакция	$N_{\text{Cu}} = 0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (без H_2)		$N_{\text{Cu}} = 0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2% H_2)		$N_{\text{Cu}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2% H_2)	
	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(P_{3/2}) + e$ $\text{Cu}(P_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-1.515×10^{14} $+6.751 \times 10^{13}$	-8.399×10^{13}	-1.402×10^{14} $+6.061 \times 10^{13}$	-7.959×10^{13}	-1.671×10^{14} $+6.689 \times 10^{13}$	-9.314×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(P_{1/2}) + e$ $\text{Cu}(P_{1/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-7.232×10^{13} $+3.276 \times 10^{13}$	-3.956×10^{13}	-6.689×10^{13} $+2.946 \times 10^{13}$	-3.743×10^{13}	-7.977×10^{13} $+3.598 \times 10^{13}$	-4.379×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$ $\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-1.293×10^{14} $+3.494 \times 10^{13}$	-9.436×10^{13}	-1.229×10^{14} $+3.446 \times 10^{13}$	-8.844×10^{13}	-1.568×10^{14} $+4.553 \times 10^{13}$	-1.115×10^{14}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{3/2}) + e$ $\text{Cu}(D_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-1.137×10^{14} $+6.053 \times 10^{13}$	-5.317×10^{13}	-1.068×10^{14} $+5.852 \times 10^{13}$	-4.828×10^{13}	-1.351×10^{14} $+7.631 \times 10^{13}$	-5.879×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}^* + e$ $\text{Cu}^* + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-1.191×10^{13} $+8.66 \times 10^{10}$	-1.182×10^{13}	-1.107×10^{13} $+7.283 \times 10^{10}$	-1.1×10^{13}	-1.317×10^{13} $+8.643 \times 10^{10}$	-1.308×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}^+ + 2e$	-1.916×10^{13}	-1.916×10^{13}	-1.842×10^{13}	-1.842×10^{13}	-2.135×10^{13}	-2.135×10^{13}
$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu} + \text{Cu}$	$+1.63 \times 10^{10}$	$+1.63 \times 10^{10}$	$+1.656 \times 10^{10}$	$+1.656 \times 10^{10}$	$+2.606 \times 10^{10}$	$+2.606 \times 10^{10}$
$\text{Cu}(D_{3/2}) + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu} + \text{Cu}$	$+4.13 \times 10^9$	$+4.13 \times 10^9$	$+4.118 \times 10^9$	$+4.118 \times 10^9$	$+6.407 \times 10^9$	$+6.407 \times 10^9$
$\text{Ne}^* + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{Ne} + e$	-3.612×10^{12}	-3.612×10^{12}	-3.712×10^{12}	-3.712×10^{12}	$+4.033 \times 10^{12}$	$+4.033 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(P_{3/2}) \rightarrow \text{Cu}$	$+2.68710^{12}$	$+2.68710^{12}$	$+2.492 \times 10^{12}$	$+2.492 \times 10^{12}$	$+2.919 \times 10^{12}$	$+2.919 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(P_{1/2}) \rightarrow \text{Cu}$	$+1.368 \times 10^{12}$	$+1.368 \times 10^{12}$	$+1.27 \times 10^{12}$	$+1.27 \times 10^{12}$	$+1.49 \times 10^{12}$	$+1.49 \times 10^{12}$
$\text{NeCu}^+ + e \rightarrow \text{Cu} + \text{Ne}$	$+5.53 \times 10^{10}$	$+5.53 \times 10^{10}$	$+5.09 \times 10^{10}$	$+5.09 \times 10^{10}$	$+5.793 \times 10^{10}$	$+5.793 \times 10^{10}$
$\text{CuH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{Cu}$	–	–	$+7.934 \times 10^{10}$	$+7.934 \times 10^{10}$	$+9.898 \times 10^{10}$	$+9.898 \times 10^{10}$
$\text{Cu}(P_{1/2}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2$	–	–	$+1.493 \times 10^{12}$	$+1.493 \times 10^{12}$	$+1.752 \times 10^{12}$	$+1.752 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(P_{3/2}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2$	–	–	$+2.892 \times 10^{12}$	$+2.892 \times 10^{12}$	$+3.391 \times 10^{12}$	$+3.391 \times 10^{12}$

Примечание. Выбор аргументов t_1, t_2 функции F обусловлен длительностью импульса тока накачки. Параметры ГРТ приведены в табл.1, начальные концентрации реагентов плазмы – в табл.3, 4). Знаки «+» («–») означают увеличение (уменьшение) концентрации меди.

численных экспериментов. Их результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на значительное полное сечение рассеяния электронов молекулярным водородом, заметного вклада в изменение электронной теплопроводности водород не вносит вследствие его низкого по сравнению с буферным газом содержания (поток электронной теплопроводности при введении 2%-ной добавки водорода изменяется менее чем на 1%).

4.8. В работе [4] предполагается, что одним из возможных отрицательных факторов изменения кинетики лазера на парах меди при введении водорода могут быть потери энергии на неупругие процессы ионизации и возбуждения молекулярного водорода. Был проведен детальный анализ данной гипотезы. Оказалось, что в течение импульса возбуждения введенный в активную среду молекулярный водород оказывает значительное влияние на кинетику процессов. В частности, реакции



(см. Приложение) в течение первых сотен наносекунд оказывают существенное влияние на температуру электронов (табл.6). При этом наблюдается также уменьшение концентрации электронов (см. рис.1,а), причем с увеличением процентного содержания примеси водорода процессы диссоциации и возбуждения первых колебательных уровней молекулярного водорода играют все более существенную роль, приводя к общему изменению кинетических процессов, происходящих в активной среде лазера.

К концу межимпульсного периода при низких частотах следования импульсов возбуждения существенного уменьшения температуры электронов и соответственно концентрации меди в метастабильном состоянии не происходит вследствие тушения колебательно-возбужденных уровней молекулы водорода электронами. Это вызывает замедление скорости снижения концентрации электронов, что негативно отражается на скорости рекомбинации плазмы. Так, при низких (порядка 10 кГц) частотах следования импульсов возбуждения предимпульсные значения концентрации и температуры электронов уменьшаются незначительно (примерно на 10%–15%, см. рис.1,а). При увеличении частоты следования импульсов возбуждения снижение предимпульсных значений концентрации и температуры электронов может, однако, привести к положительным эффектам (см. предыдущий абзац, а также п.4.5).

Перехват энергии, вкладываемой в возбуждение меди при введении водорода и проиллюстрированный выше (см. также п.4.6), отрицательно влияет на характеристики лазера на парах меди. Тем не менее в оптимуме улучшение генерационных характеристик вследствие описанного в п.4.4 эффекта превышает рассмотренное здесь негативное воздействие.

4.9. В работе [22] был предложен и исследован механизм тушения атомов меди в метастабильном состоянии за счет взаимодействия с колебательно-возбужденными молекулами водорода. Мы провели анализ влияния данного процесса на изменение населенности метастабильных уровней атома меди, вычислив потоки реакций, изменяющих концентрацию атомов меди в метастабильном состоянии. В табл.7 в качестве примера приведены

Табл.6. Потоки реакций охлаждения и нагрева электронов $F(0, 500 \text{ нс})$ в течение импульса возбуждения (см. примечание к табл.5).

Реакция	$N_{\text{Cu}} = 0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (без H_2)		$N_{\text{Cu}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2 % H_2)	
	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})
$\text{Ne} + e \rightarrow \text{Ne}^* + e$	-1.756×10^{14}		-1.791×10^{14}	
$\text{Ne}^* + e \rightarrow \text{Ne} + e$	$+2.614 \times 10^{13}$	-1.494×10^{14}	$+2.007 \times 10^{13}$	-1.59×10^{14}
$\text{Ne} + e \rightarrow \text{Ne}^+ + 2e$	-4.157×10^{12}	-4.157×10^{12}	-4.295×10^{12}	-4.295×10^{12}
$\text{Ne}^* + e \rightarrow \text{Ne}^{**} + e$	-2.926×10^{14}		-2.016×10^{14}	
$\text{Ne}^{**} + e \rightarrow \text{Ne}^* + e$	$+1.334 \times 10^{14}$	-1.592×10^{14}	$+8.392 \times 10^{13}$	-1.177×10^{14}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(P_{3/2}) + e$	-1.459×10^{14}		-1.139×10^{14}	
$\text{Cu}(P_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	$+6.527 \times 10^{13}$	-8.063×10^{13}	$+4.076 \times 10^{13}$	-7.314×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(P_{1/2}) + e$	-6.962×10^{13}		-5.421×10^{13}	
$\text{Cu}(P_{1/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	$+3.170 \times 10^{13}$	-3.792×10^{13}	$+1.990 \times 10^{13}$	-3.431×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$	-1.301×10^{14}	-1.301×10^{14}	-9.005×10^{13}	-9.005×10^{13}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{3/2}) + e$	-1.132×10^{14}	-1.132×10^{14}	-7.586×10^{13}	-7.586×10^{13}
$\text{Cu}(D_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	$+6.199 \times 10^{13}$	$+6.199 \times 10^{13}$	$+4.444 \times 10^{13}$	$+4.444 \times 10^{13}$
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}^* + e$	-1.148×10^{13}	-1.148×10^{13}	-9.217×10^{12}	-9.217×10^{12}
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}^+ + 2e$	-1.853×10^{13}	-1.853×10^{13}	-1.699×10^{13}	-1.699×10^{13}
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu}^* + e$	-1.809×10^{13}	-1.809×10^{13}	-7.318×10^{12}	-7.318×10^{12}
$\text{Cu}(P_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu}^* + e$	-3.689×10^{13}	-3.689×10^{13}	-2.173×10^{13}	-2.173×10^{13}
$\text{Cu}(P_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(P_{1/2}) + e$	$+1.366 \times 10^{16}$		$+8.531 \times 10^{15}$	
$\text{Cu}(P_{1/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(P_{3/2}) + e$	-1.369×10^{16}	-3×10^{13}	-8.547×10^{15}	-1.6×10^{13}
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H} + \text{H} + e$	—	—	-6.931×10^{13}	-6.931×10^{13}
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$	—	—	-1.044×10^{13}	-1.044×10^{13}
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2(v=1) + e$	—	—	-6.407×10^{14}	-6.407×10^{14}

Примечание. Знаки «+» («-») означают нагрев (охлаждение) электронов.

Табл.7. Потоки реакций уменьшения и увеличения населенности уровня $D_{5/2}$ атома меди $F(3 \text{ мкс}, 80 \text{ мкс})$ в течение межимпульсного периода (см. прим. к табл.2).

Реакция	Потоки реакций (см^{-3})	Суммарные потоки (см^{-3})
$\text{Cu} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$	$+4.618 \times 10^{14}$	
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu} + e$	-5.139×10^{14}	-5.21×10^{13}
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(P_{3/2}) + e$	-6.206×10^{10}	
$\text{Cu}(P_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(D_{3/2}) + e$	$+5.643 \times 10^{12}$	$+5.58 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(D_{3/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$	$+1.122 \times 10^{15}$	
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu}(D_{3/2}) + e$	-1.233×10^{15}	-1.11×10^{14}
$\text{Cu}^* + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$	$+7.525 \times 10^{10}$	
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu}^* + e$	-1.107×10^{10}	$+6.418 \times 10^{10}$
$\text{Cu}(D_{5/2}) + e \rightarrow \text{Cu}^{**} + e$	-5.758×10^6	
$\text{Cu}^{**} + e \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + e$	$+8.307 \times 10^9$	$+8.301 \times 10^9$
$\text{Cu}(D_{3/2}) + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + \text{Cu}$	$+1.72 \times 10^{12}$	$+1.72 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu} + \text{Cu}$	-2.35×10^{11}	-2.35×10^{11}
$\text{Cu}(P_{3/2}) \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2})$	$+6.752 \times 10^{12}$	$+6.752 \times 10^{12}$
$\text{Cu}^{**} \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2})$	$+7.468 \times 10^{12}$	$+7.468 \times 10^{12}$
$\text{Cu}(P_{3/2}) + h\nu \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + 2h\nu$	$+3.081 \times 10^7$	$+3.081 \times 10^7$
$\text{Cu}(D_{5/2}) + h\nu \rightarrow \text{Cu}(P_{3/2})$	-1.046×10^9	-1.046×10^9
$\text{Cu}(P_{3/2}) \rightarrow \text{Cu}(D_{5/2}) + h\nu$	$+1.385 \times 10^9$	$+1.385 \times 10^9$
$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=1) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	-2.533×10^{13}	-2.533×10^{13}
$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=2) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	-1.693×10^{12}	-1.693×10^{12}
$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=3) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	-2.407×10^{11}	-2.407×10^{11}

Примечание. Знаки «+» («-») означают увеличение (уменьшение) населенности уровня $D_{5/2}$.

потоки реакций для уровня $D_{5/2}$. Можно отметить, что тушение метастабильного уровня атома меди колебательно-возбужденными молекулами водорода оказывается одним из наиболее значимых процессов, влияющих на его населенность, особенно в начале межимпульсного периода, что ранее было отмечено в работе [23].

При низких частотах импульсов возбуждения действие данного механизма подробно описано в п.4.4.

5. Тестирование модели

Тестирование модели осуществлялось в ходе экспериментов, проведенных в [9, 10]. Эти работы содержат наиболее подробные из известных нам результатов теоретических и экспериментальных исследований влияния добавок водорода на характеристики лазера на парах меди.

В расчетах использовалась экспериментально измеренная временная зависимость тока, протекающего через газоразрядную трубку в течение импульса возбуждения. Согласно работам [9, 10] и нашим расчетам, зависимость тока от времени при введении примеси водорода меняется незначительно (для концентраций, близких к оптимальным (единицы процентов)).

При сопоставлении расчетов с данными работы [10] начальная концентрация атомов меди в расчетах соответствовала начальной концентрации, приведенной в [10]. Начальные значения остальных реагентов рассчитывались в модели (вычислялись на основе итераций). Задавались начальные концентрации реагентов, после чего рассчитывались их значения к началу следующего импульса. Итерации прекращались, когда различие на-

Табл.8. Начальные концентрации реагентов плазмы для расчетов по тестированию эксперимента [10].

Концентрация неона	$1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Концентрация меди	$1.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Начальная концентрация ионов меди	$9.85 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$
Начальная населенность уровня $D_{3/2}$	$2.34 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$
Начальная населенность уровня $D_{5/2}$	$2.43 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$
Начальная концентрация колебательно-возбужденного водорода для $\nu = 1$	$1.02 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Начальная концентрация колебательно-возбужденного водорода для $\nu = 2$	$2.68 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$
Начальная концентрация молекул CuH	$3.07 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$
Начальная концентрация отрицательных ионов водорода	$2.81 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$

Примечание. За исключением концентраций неона и меди в основном состоянии параметры вычислялись самосогласованно в рамках модели (см. разд.2 и п.5.1). Параметры ГРТ приведены в табл.1.

чальных и конечных значений составляло менее 1%. Данная процедура возможна вследствие отмечавшейся выше слабой зависимости формы импульса тока от времени при введении примеси водорода.

5.1. Сопоставление с результатами работы [10]

Параметры газоразрядной трубки, использовавшейся в работе [10], и соответствующие значения концентраций реагентов активной среды приведены в табл.1 и 8.

5.1.1. Напряжение

В отсутствие водорода зависимость напряжения от времени хорошо согласуется как с экспериментальной, так и с расчетной зависимостями, приведенными в [10] (рис.2,а). При добавлении в смесь 1% H_2 вычисленное с использованием нашей модели напряжение на ГРТ приблизительно в 1.5 раза превышает рассчитанное в работе [10], хотя очень близко ему по форме (рис.2,а). Несмотря на малое относительно содержания основных реагентов активной среды количество водорода, он существенно увеличивает максимальное сопротивление (см. рис.1,б). Поэтому полученное расхождение может объясняться тем, что, вероятно, авторы работы [10] не учли в своих расчетах влияние примеси водорода на проводимость.

5.1.2. Населенность метастабильных уровней

Расчет по представленной модели дает более низкие значения предимпульсной населенности метастабильного уровня $D_{5/2}$ по сравнению с данными работы [10] (рис.2,б). Это объясняется более низкой температурой электронов в конце межимпульсного периода в наших расчетах.

5.1.3. Температура и концентрация электронов

Были также сопоставлены временные зависимости концентрации и температуры электронов (рис.2,в и г). Как и в расчетах работы [10], наблюдается снижение максимального значения концентрации электронов при увеличении примеси водорода. Согласно нашим расчетам, существует задержка начала роста концентрации электронов в зависимости от времени (см. рис.2,г). Однако, в отличие от результатов [10], где эта задержка растет с увеличением процентного содержания водорода в активной среде, в расчетах с использованием представленной здесь модели такого эффекта не наблюдается. При со-

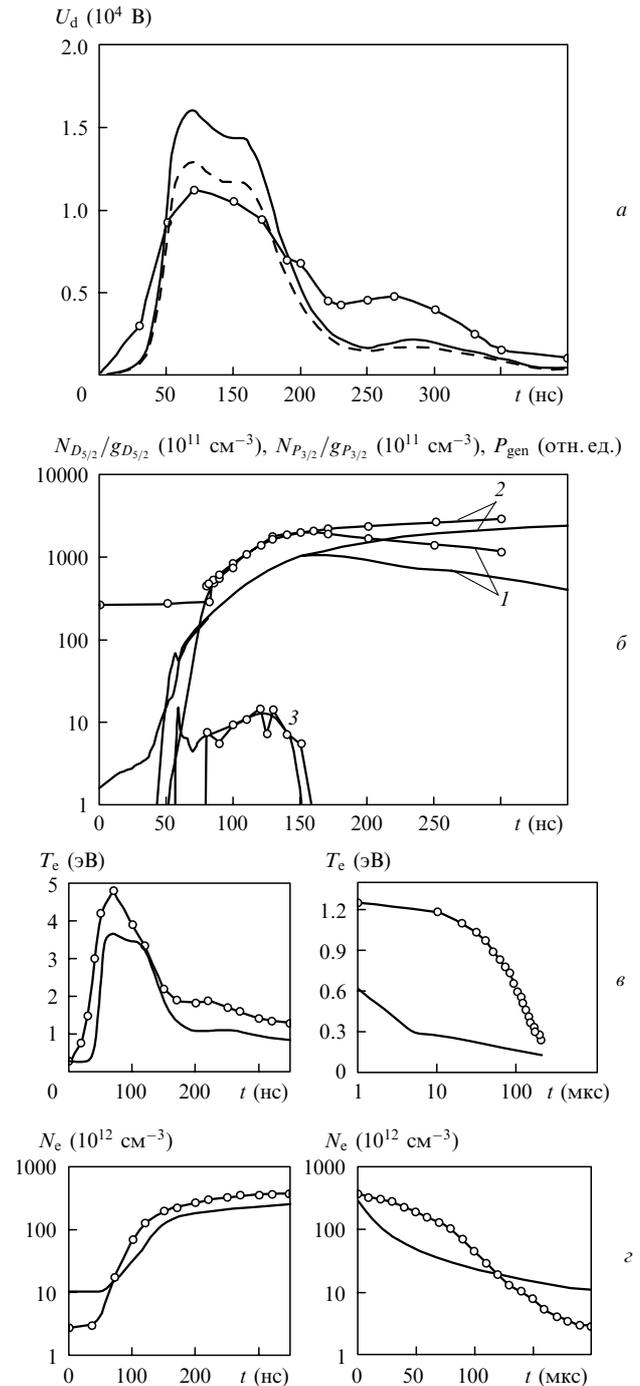


Рис.2. Временные зависимости: а – напряжения на ГРТ (точки – эксперимент [10]; результаты нашего моделирования: штриховая кривая – расчет без учета вклада водорода в проводимость плазмы, сплошная кривая – расчет с учетом вклада водорода); б – населенностей уровней $N_{P_{3/2}}/g_{P_{3/2}}$ (1) и $N_{D_{5/2}}/g_{D_{5/2}}$ (2), а также импульса генерации (3) (точки – расчет [10] для оси ГРТ, сплошная кривая – данная работа); в – температуры электронов в течение импульса возбуждения и в межимпульсный период (точки – расчет [10] для оси ГРТ, сплошная кривая – результаты нашего моделирования); г – концентрации электронов в течение импульса возбуждения и в межимпульсный период (точки – расчет [10] для оси ГРТ, сплошная кривая – результаты настоящей работы) (г). Параметры ГРТ приведены в табл.1, значения реагентов плазмы, использовавшиеся в расчетах, – в табл.8.

поставлении зависимостей температуры электронов от времени можно отметить, что в наших расчетах максимум температуры в течение импульса возбуждения имел

меньшее значение (рис.2,в). Кроме того, в работе [10] температура электронов как при введении примеси водорода, так и без нее релаксировала приблизительно к одному уровню. Это не совсем понятно, поскольку начальные значения населенности метастабильных уровней значительно различались (для случая с введенной примесью водорода предимпульсная концентрация атомов меди в метастабильном состоянии была в два раза выше при 1 %-ной добавке водорода). Различались и временные зависимости температуры электронов в межимпульсный период.

В наших расчетах наблюдается четкое разделение периода релаксации на два этапа: резкий спад температуры в первые несколько микросекунд и затем медленное ее снижение в течение остального межимпульсного периода. Это является характерным для лазера на парах меди [2, 25, 26]. В то же время в работе [10] наблюдается противоположная ситуация: вначале медленный спад, а в конце межимпульсного периода – значительное снижение температуры электронов (рис.2,в).

В работе [10] отмечается увеличение предимпульсной концентрации электронов при введении водорода. Таким образом, по данным [10] добавки водорода приводят к увеличению концентраций как метастабильных состояний, так и электронов, что ухудшает предимпульсные условия и находится в противоречии с результатами наших расчетов.

5.2. Сопоставление с результатами работы группы Пайпера [9]

При сопоставлении временных зависимостей концентраций атомов меди в основном состоянии (рис.3,а) начальная концентрация меди в расчетах выбиралась равной 10^{15} см^{-3} . Данное значение определялось тем, что отношение температуры газа к температуре стенок ГРТ T_g/T_{gw} составляло $\sim 1.3-1.5$ (при расчете температурного поля использовалось выражение из [27]), а также с учетом приведенного в работе [9] значения пристеночной концентрации меди. При начальной плотности меди 10^{15} см^{-3} также наблюдалось довольно хорошее согласие с экспериментально измеренными мощностями генерации (табл.9).

Рассчитанная нами временная зависимость концентрации электронов имеет следующие отличия от приведенной в работе [9]: предимпульсная концентрация электронов, полученная в наших расчетах, примерно в два раза меньше, а максимальное значение, достигаемое в течение импульса генерации, на 5 % меньше. В течение межимпульсного периода в наших расчетах наблюдается более высокая скорость снижения концентрации электронов, чем в работе [9] (рис.3,б).

Табл.9. Сопоставление расчетных мощностей генерации с результатами работы [9].

Содержание водорода (%)	Эксперимент P (Вт)	Модель		
		P (Вт)	$P_{510.6}$ (Вт)	$P_{578.2}$ (Вт)
Отсутствует	59.6	61.04	43.48	17.56
2	67.2	70.83	50.42	20.41

Примечание. Параметры ГРТ приведены в табл.1, концентрации реагентов активной среды – в табл.3, 4. Предимпульсная концентрация меди в основном состоянии для чистого неона в расчетах принималась равной $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, для 2 %-ной примеси водорода – 10^{15} см^{-3} (см. п.3.4 и 5.2); P – полная мощность, $P_{510.6}$ – мощность на $\lambda = 510.6 \text{ нм}$, $P_{578.2}$ – мощность на $\lambda = 578.2 \text{ нм}$.

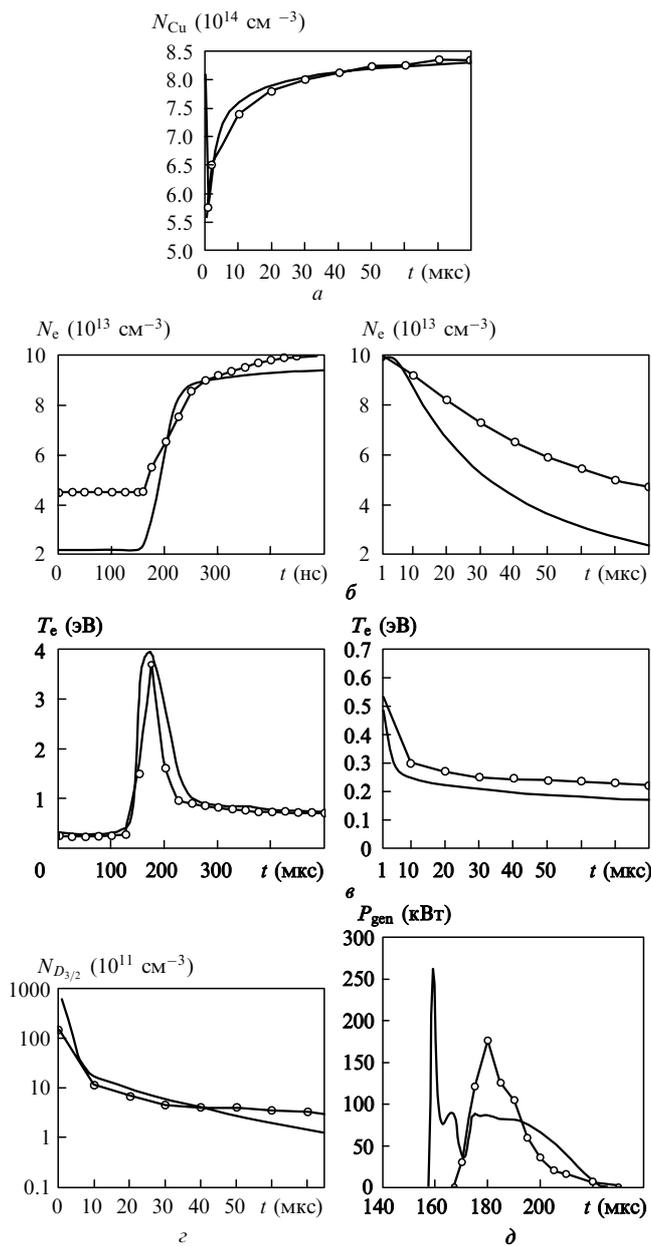


Рис.3. Временные зависимости: а – концентрации атомов меди в основном состоянии в течение импульса возбуждения и межимпульсного интервала (точки – расчет концентрации меди на оси ГРТ [9], сплошная кривая – результаты настоящей работы, нормированные на данные работы [9]; в расчетах [9] $N_{Cu} = 0.83 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в нашем расчете $N_{Cu} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, см. п.5.2); б – концентрации электронов в течение импульса возбуждения и в межимпульсный период (точки – расчет концентрации электронов на оси ГРТ из [9], сплошная кривая – результаты настоящей работы); в – температуры электронов в течение импульса возбуждения и в межимпульсный период (точки – температура электронов на оси ГРТ [9], сплошная кривая – результаты нашего моделирования); г – населенности уровня $D_{3/2}$ в течение межимпульсного интервала (точки – расчет концентрации атомов меди в состоянии $D_{3/2}$ на оси ГРТ [9], сплошная кривая – результаты настоящей работы); д – импульсы генерации (точки – расчет импульса генерации на оси ГРТ [9], сплошная кривая – результаты настоящей работы). Параметры ГРТ приведены в табл.1, значения реагентов плазмы, использовавшиеся в расчетах, – в табл. 4.

Температура электронов в течение импульса возбуждения близка к температуре, полученной в [9]. Температурная зависимость электронов на протяжении межимпульсного периода подобна зависимости из работы [9], однако имеет меньшее значение (рис.3,в).

Наблюдается также хорошее согласие временных зависимостей для населенностей основного и метастабильного $D_{3/2}$ -уровней, однако вследствие большей концентрации меди в активной среде в [9] зависимость для населенности основного уровня проходит выше вычисленной в работе [9] (рис.3,а, з).

При сопоставлении импульсов генерации можно отметить, что рассчитанный в настоящей работе импульс имеет более ярко выраженную колебательную структуру в начале генерации (рис.3,д).

6. Импульсы возбуждения с высокой частотой следования

При низких частотах следования импульсов возбуждения положительный эффект уменьшения предимпульсных концентраций электронов и атомов меди в метастабильном состоянии нивелируется потерями, вызванными преимущественно потерями вводимой энергии на диссоциацию и возбуждение первых колебательных уровней молекулы водорода (п.4.8). Однако в экспериментальных работах [28–30] с лазером на парах меди именно применение водорода позволило достичь высоких частот повторения импульсов генерации. Несмотря на то что в работах [29, 30] исследованы лазеры на парах бромида меди, механизмы, выявленные для случая чистой меди с добавками водорода, могут действовать и в активной среде лазера на парах бромида. При постоянной форме импульса тока накачки энергия генерации при введении водорода возрастает даже при неизменной концентрации атомов меди в основном состоянии, причем для случая с частотой повторения 100 кГц увеличение энергии излучения более существенно (табл.10, 11). Конечно, в реальном эксперименте амплитуда и форма импульса тока будут несколько изменяться с увеличением частоты повторения импульсов возбуждения, однако такие изменения достаточно трудно учесть при моделировании, поскольку конкретные изменения зависят от конкретных экспериментальных условий. Кроме того (см. разд.3 и 4), могут меняться также температура газовой среды и другие параметры. Учет всех этих факторов привел бы к существенному усложнению модели, тем более что экспериментальные данные довольно скудны и

не позволяют судить о величине этих изменений при работе лазера с введенной примесью водорода. В этом случае выводы, полученные на основе чисто теоретических положений, могли бы не совсем соответствовать реальной ситуации. Кроме того, даже если бы все отмеченные выше факторы и были учтены в модели, то это только затруднило бы понимание ситуации (из-за большого числа факторов). В связи с этим импульс тока в расчетах считался неизменным, однако уже из полученных результатов (табл.10, 11) видна возможность существенного повышения генерационных характеристик.

7. Заключение

Для выяснения вопроса о влиянии добавок водорода в активную среду лазеров на парах меди составлена подробная кинетическая модель активной среды Ne–Cu–H₂, сопоставленная с имеющимися экспериментальными данными.

Из проведенного анализа следует, что увеличение мощности излучения лазеров при добавлении молекулярного водорода имеет, по-видимому, различную природу при низких и высоких частотах повторения импульсов.

При высоких частотах повторения импульсов ($f \gg 10$ кГц) увеличение мощности излучения лазеров может происходить за счет снижения предимпульсных концентраций 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) отмеченных выше механизмов становится недостаточно. Увеличение мощности излучения лазеров происходит вследствие увеличения концентрации атомов меди в активной среде за счет повышения температуры ГРТ при введении водорода и одновременного уменьшения предимпульсной концентрации метастабилей в результате тушения этих уровней молекулами водорода в колебательно-возбужденных состояниях. Кроме того, при введении водорода в активную среду уменьшается значение тока, протекающего в межимпульсный интервал через газоразрядную трубку, что ускоряет релаксационные процессы в плазме. Следует отметить также и негативные эффекты,

Табл.10. Начальные значения параметров плазмы и удельных энергий генерации за импульс при частоте 50 кГц.

N_{H_2} (см ⁻³)	N_{Ne^+} (см ⁻³)	N_{Cu^+} (см ⁻³)	$N_{D_{5/2}}$ (см ⁻³)	$N_{D_{3/2}}$ (см ⁻³)	N_{H^-} (см ⁻³)	N_{CuH} (см ⁻³)	N_{H_2} ($v=1$) (см ⁻³)	N_{H_2} ($v=2$) (см ⁻³)	T_e (эВ)	E_{tot} (10 ⁻⁶) Дж/см ³	E_{510} (10 ⁻⁶) Дж/см ³	E_{578} (10 ⁻⁶) Дж/см ³
0	4×10^{12}	7.31×10^{13}	3.62×10^{12}	6.94×10^{11}	—	—	—	—	0.218	1.96	1.49	0.47
3.3×10^{15}	4.02×10^{12}	6.95×10^{13}	3.53×10^{12}	6.92×10^{11}	1.48×10^{10}	3.66×10^{12}	4.4×10^{14}	8.75×10^{12}	0.222	1.92	1.46	0.46
1.65×10^{16}	4×10^{12}	5.15×10^{13}	1.75×10^{12}	3.17×10^{11}	2.8×10^{10}	4.02×10^{12}	1.42×10^{15}	1.87×10^{13}	0.201	2.14	1.61	0.53
3.3×10^{16}	3.7×10^{12}	3.8×10^{13}	7.75×10^{11}	1.15×10^{11}	2.18×10^{10}	2.2×10^{12}	1.65×10^{15}	2.04×10^{13}	0.173	2.07	1.55	0.52
4.95×10^{16}	3.39×10^{12}	2.92×10^{13}	3.96×10^{11}	5.08×10^{10}	1.55×10^{10}	1×10^{12}	1.5×10^{15}	8.47×10^{12}	0.165	1.96	1.47	0.49

Примечание. Концентрации $N_{Cu} = 8 \times 10^{14}$ см⁻³, $N_H = 10^{15}$ см⁻³ (см. прим. к табл.3).

Табл.11. Начальные значения параметров плазмы и удельных энергий генерации за импульс при частоте 100 кГц.

N_{H_2} (см ⁻³)	N_{Ne^+} (см ⁻³)	N_{Cu^+} (см ⁻³)	$N_{D_{5/2}}$ (см ⁻³)	$N_{D_{3/2}}$ (см ⁻³)	N_{H^-} (см ⁻³)	N_{CuH} (см ⁻³)	N_{H_2} ($v=1$) (см ⁻³)	N_{H_2} ($v=2$) (см ⁻³)	T_e (эВ)	E_{tot} (10 ⁻⁶) Дж/см ³	E_{510} (10 ⁻⁶) Дж/см ³	E_{578} (10 ⁻⁶) Дж/см ³
0	4.5×10^{11}	1.25×10^{14}	7.14×10^{12}	1.54×10^{12}	—	—	—	—	0.21	5.83	5.83	0
1.65×10^{16}	1.19×10^{12}	9.05×10^{13}	5.5×10^{12}	1.1×10^{12}	7.6×10^{10}	2.82×10^{13}	2.33×10^{15}	7.05×10^{13}	0.211	1.17	0.966	0.204
3.3×10^{16}	1.74×10^{12}	6.95×10^{13}	2.22×10^{12}	4.12×10^{11}	7×10^{10}	1.75×10^{13}	3.2×10^{15}	7.5×10^{13}	0.202	1.4	1.13	0.266
4.95×10^{16}	1.92×10^{12}	5.45×10^{13}	1.12×10^{12}	$.85 \times 10^{11}$	5.37×10^{10}	1.01×10^{13}	3.26×10^{15}	5.06×10^{13}	0.185	1.43	1.15	0.28

Примечание. Концентрации $N_{Cu} = 8 \times 10^{14}$ см⁻³, $N_H = 10^{15}$ см⁻³ (см. прим. к табл.3).

сопровождаящие введение примеси водорода. Это расхождение значительной части энергии, вкладываемой в плазму в течение импульса накачки, на диссоциацию и колебательное возбуждение молекулярного водорода, а

также некоторое замедление релаксации плазмы в межимпульсный период вследствие выделения энергии в электронной компоненте в процессе термализации колебательно-возбужденных молекул водорода.

Приложение

Табл.12. Кинетические процессы с участием атомарного и молекулярного водорода (n – число реагентов, участвующих в реакции).

№	Реакция	Скорость реакции ($\text{см}^{3(n-1)} \cdot \text{с}^{-1}$)	Вклад в температуру электронов (эВ)	Литература
1	$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	$2 \times 10^{-8} \exp(-13.6/T_e)$	-13.6	[31]
2	$\text{H}^* + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	$4 \times 10^{-5}/T_e^3 \exp(-3.4/T_e)$	-3.4	[32]
3	$\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}^* + e$	$5.4 \times 10^{-27} T_e^{-9/2}$	3.4	[32]
4	$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^* + e$	$2 \times 10^{-8} \exp(-10.2/T_e)$	-10.2	[33]
5	$\text{H}^* + e \rightarrow \text{H} + e$	2×10^{-8}	10.2	[32]
6	$\text{H}_2^+ + 2e \rightarrow 2\text{H} + e$	$5.4 \times 10^{-27} T_e^{-9/2}$	4.4	[31]
7	$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$	2×10^{-9}	-	[34]
8	$\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$1 \times 10^{-7} T_e^{-1/2}$	$-1.5T_e$	[35]
9	$\text{H}_2 + e \rightarrow 2\text{H} + e$	$2 \times 10^{-8} \exp(-8.8/T_e)$	-8.8	[32]
10	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$	$2 \times 10^{-8} \exp(-15.4/T_e)$	-15.4	[29]
11	$2\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	$8.59 \times 10^{-34} T_g^{-0.61}$	-	[36]
12	$2\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$4.70 \times 10^{-33} T_g^{-0.95}$	-	[36]
13	$\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + e$	1.3×10^{-9}	-	[31]
14	$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2^+ + 2\text{H}$	1.5×10^{-9}	-	[37]
15	$\text{H}_2^+ + e \rightarrow 2\text{H}$	$5.34 \times 10^{-8} T_e^{-0.4}$	$-1.5T_e$	[35]
16	$2\text{H} + \text{Ne} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Ne}$	$3. \times 10^{-33}$	-	[34]
17	$\text{H}_2(v=1) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$3.09 \times 10^{-11} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
18	$\text{H}_2(v=2) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=1) + \text{H}$	$2.06 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
19	$\text{H}_2(v=3) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=2) + \text{H}$	$8.76 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
20	$\text{H}_2(v=2) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$1.53 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
21	$\text{H}_2(v=3) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$3.81 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
22	$\text{H}_2(v=3) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=1) + \text{H}$	$5.05 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
23	$\text{H}_2(v=1) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	$7.85 \times 10^{-10} T_g^{-4.3}$	-	[38, 39]
24	$\text{H}_2(v=2) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=1) + \text{H}_2$	$2.62 \times 10^{-9} T_g^{-4.3}$	-	[38, 39]
25	$\text{H}_2(v=3) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=2) + \text{H}_2$	$8.50 \times 10^{-9} T_g^{-4.3}$	-	[38, 39]
26	$\text{H}_2(v=4) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{H}_2$	$2.06 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
27	$\text{H}_2(v=5) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=4) + \text{H}_2$	$4.12 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
28	$\text{H}_2(v=4) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$1.03 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
29	$\text{H}_2(v=4) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=1) + \text{H}$	$0.99 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
30	$\text{H}_2(v=4) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=2) + \text{H}$	$1.5 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
31	$\text{H}_2(v=5) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$3.60 \times 10^{-10} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
32	$\text{H}_2(v=5) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=1) + \text{H}$	$1.22 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
33	$\text{H}_2(v=5) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=2) + \text{H}$	$1.74 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
34	$\text{H}_2(v=5) + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{H}$	$2.41 \times 10^{-9} \exp(-0.1205/T_g)$	-	[38, 39]
35	$\text{H}_2(v=4) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{H}_2$	$1.96 \times 10^{-9} T_g^{-4.3}$	-	[38, 39]
36	$\text{H}_2(v=5) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2(v=4) + \text{H}_2$	$4.58 \times 10^{-8} T_g^{-4.3}$	-	[38, 39]
37	$\text{H}_2(v=1) + \text{H}_2(v=1) \rightarrow \text{H}_2(v=2) + \text{H}_2$	7.6×10^{-13}	-	[38]
38	$\text{H}_2(v=1) + \text{H}_2(v=2) \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{H}_2$	1.1×10^{-12}	-	[38]
39	$\text{H}_2(v=1) + \text{H}_2(v=3) \rightarrow \text{H}_2(v=4) + \text{H}_2$	8.4×10^{-13}	-	[38]
40	$\text{H}_2(v=1) + \text{H}_2(v=4) \rightarrow \text{H}_2(v=5) + \text{H}_2$	1.1×10^{-12}	-	[38]
41	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2(v=1) + e$	*	-0.5	[40]
42	$\text{H}_2(v=1) + e \rightarrow \text{H}_2 + e$	*	0.5	[40]
43	$\text{H}_2(v=1) + e \rightarrow \text{H}_2(v=2) + e$	*	-0.5	[40]
44	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2(v=2) + e$	*	-1	[40]
45	$\text{H}_2(v=2) + e \rightarrow \text{H}_2 + e$	*	-1	[40]
46	$\text{H}_2(v=2) + e \rightarrow \text{H}_2(v=3) + e$	*	-0.5	[40]
47	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2(v=3) + e$	*	-1.5	[38]
48	$\text{H}_2(v=3) + e \rightarrow \text{H}_2 + e$	*	1.5	[42]
49	$\text{H}_2(v=2) + e \rightarrow \text{H}_2(v=1) + e$	3×10^{-9}	0.5	[38]

№	Реакция	Скорость реакции ($\text{см}^{3(n-1)} \cdot \text{с}^{-1}$)	Вклад в температура электронов (эВ)	Литература
50	$\text{H}_2(v=3) + e \rightarrow \text{H}_2(v=2) + e$	5×10^{-9}	0.5	[38]
51	$\text{H}_2(v=4) + e \rightarrow \text{H}_2(v=3) + e$	5.5×10^{-9}	0.5	[38]
52	$\text{H}_2(v=5) + e \rightarrow \text{H}_2(v=4) + e$	5.5×10^{-9}	0.5	[38]
53	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2 + e$	*	$-5.43 \times 10^{-4}(T_e - T_g)$	[40]
54	$\text{H} + 2e \rightarrow \text{H}^- + e$	$3.31 \times 10^{-28} T_e^{-1}$	-0.754	[40]
55	$\text{H}^- + e \rightarrow \text{H} + 2e$	$10^{-6} \exp(-0.754/T_e) T_e^{0.5}$	0.754	[40]
56	$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$	*	-3.724	[41]
57	$\text{H}_2(v=1) + e \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$	*	-3.224	[41]
58	$\text{H}_2(v=2) + e \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$	*	-2.724	[41]
59	$\text{H}_2(v=3) + e \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$	*	-2.224	[41]
60	$\text{H}_2(v=4) + e \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$	*	-1.724	[41]
61	$\text{Cu}(D_{3/2}) + \text{H}_2(v=1) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
62	$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=1) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
63	$\text{Cu}(D_{3/2}) + \text{H}_2(v=2) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
64	$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=2) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
65	$\text{Cu}(D_{3/2}) + \text{H}_2(v=3) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
66	$\text{Cu}(D_{5/2}) + \text{H}_2(v=3) \rightarrow \text{CuH} + \text{H}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
69	$\text{CuH} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2(v=3) + \text{Cu}$	2×10^{-10}	-	[22, 23]
70	$\text{Cu}(P_{1/2}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2$	10^{-10}	-	Оценка
71	$\text{Cu}(P_{3/2}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2$	10^{-10}	-	Оценка
72	$\text{Cu}^+ + \text{H}^+ + \text{Ne} \rightarrow \text{Cu} + \text{H} + \text{Ne}$	$1.28 \times 7.01 \times 10^{-31} / T_g^3$	-	[42]
73	$\text{Ne}^+ + \text{H}^- + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne} + \text{H} + \text{Ne}$	$1.34 \times 7.01 \times 10^{-31} / T_g^3$	-	[42]
74	$\text{H}^+ + \text{H}^- + \text{Ne} \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{Ne}$	$2.05 \times 7.01 \times 10^{-31} / T_g^3$	-	[42]
75	Амбиполярная диффузия H^+	$11.1 \times (2.7 \times 10^{19} / [\text{Ne}]) (0.026 / T_g)^{**}$	-	[43]
76	Амбиполярная диффузия H_2^+	$7.5 \times (2.7 \times 10^{19} / [\text{Ne}]) (0.026 / T_g)^{**}$	-	[43]

Примечание. В выражениях для скоростей реакций T_e и T_g измеряются в электронвольтах; * скорость реакции вычислялась на основе данных по сечениям, взятых из соответствующих работ, и в предположении максвелловской функции распределения электронов по энергиям; ** данное выражение использовалось для вычисления подвижности ионов в зависимости от концентрации Ne и T_g с целью получения оценок времени амбиполярной диффузии.

1. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. *Квантовая электроника*, **7**, 1264 (1980).
2. Батенин В.М., Бучанов В.В. и др. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
3. Huang Z.G., Namba J., Shimizu F. *Jap. J. Appl. Phys.*, **25**, 1677 (1986).
4. Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *Opt. Commun.*, **110**, 699 (1994).
5. Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *Opt. Commun.*, **56**, 279 (1985).
6. Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1927 (1988).
7. Astadjov D.N., Isaev A.A., Petrash G.G., Ponomarev I.V., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1966 (1992).
8. Sabotinov N.V., Vuchkov N.K., Astadjov D.N. *Opt. Commun.*, **95**, 55 (1993).
9. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *IEEE J. Quant. Electron.*, **36**, 438 (2000).
10. Cheng C., Sun W. *Opt. Commun.*, **144**, 109 (1997).
11. Ivanov V.V., Klopovskii K.S., Mankelevich Yu. A., Mootvilov S.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 128 (2002).
12. Бойченко А.М., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **32**, 172 (2002).
13. Boichenko A.M., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **12**, 1007 (2002).
14. Boichenko A.M., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **10**, 1159 (2000).
15. *Труды ИОФ АН*, **21** (1989).
16. Бохан П.А. *Лазеры на парах металлов со столкновительным возбуждением нижних рабочих состояний* Докт. дис. (Новосибирск, ИОА, 1988).
17. Carman R.J., Mildren R.P., et al. *Opt. Commun.*, **157**, 99 (1998).
18. Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **30**, 501 (2000).
19. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **11**, 580 (2001).
20. Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. *IEEE J. Quant. Electron.*, **34**, 2275 (1998).
21. Hayashi K., Iseki Y., et al. *Jap. J. Appl. Phys.*, **31**, L1689 (1992).
22. Garcia-Prieto J., Ruiz M.E., et al. *J. Chem. Phys.*, **81**, 5920 (1984).
23. Carman R.J., Mildren R.P., Piper J.A., Marshal G.D., Coutts D.W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 215 (2001).
24. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Феденеев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **24**, 697 (1997).
25. Petrash G.G. *Laser Phys.*, **10**, 994 (2000).
26. Гудзенко Л.И., Яковленко С.И. *Плазменные лазеры* (М.: Атомиздат, 1978).
27. Kushner M.J., Warner B.E. *J. Appl. Phys.*, **54**, 2970 (1983).
28. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **26** (9), 80 (1983).
29. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **28**, 220 (1999).
30. Евтушенко Г.С. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 254 (2000).
31. Смирнов Б.М. *Ионы и возбужденные атомы в плазме* (М.: Наука, 1974).
32. Lotz W. *Astrophysic. J. Suppl.*, **15**, 207 (1967).
33. Mewe R. *Astronomy and Astrophys.*, **20**, 265 (1972).
34. Phelps A.V. *J. Phys. Chem. Refer. Data*, **19**, 656 (1990).
35. *Физика ион-ионных и электрон-ионных столкновений* (М.: Мир, 1986).
36. Даутов Н.Г., Старик А.М. *ТВТ*, **31**, 292 (1993).
37. Johnson R., Bionoli M. *J. Chem. Phys.*, **61**, 2112 (1974).
38. *Неравновесная колебательная кинетика*. Под ред. М.Капителли (М.: Мир, 1989).
39. *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса, Дж.Ботта (М.: Мир, 1980).
40. Mazevet S., et al. *J. Phys. B*, **32**, 1269 (1999).
41. Gallup G.A., Xu Y., Fabrikant I.I. *Phys. Rev. A*, **57**, 2596 (1998).
42. Thomson J. *Phil. Mag. S.6*, **47** (278), 337 (1924).
43. McDaniel E.W. *Collision Phenomena in Ionized Gases* (New York: Wiley, 1964).