

Отзыв

о диссертации А. К. Курносова «Теория электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах, учитывающая совокупность процессов одно- и многоквантового VV обмена, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика

Диссертация А.К. Курносова посвящена исследованию столкновительных процессов в активной среде СО-лазера и влияния этих процессов на характеристики активной среды указанного лазера. Основные особенности СО-лазера, открытого в 1964 г., связаны с рекордным для газовых лазеров кпд этого устройства, превышающим 50%, а также с огромным количеством лазерных переходов в спектральном диапазоне 5 – 7 мкм и 3 – 4 мкм. Эти особенности обусловлены механизмом возбуждения лазера, согласно которому энергия электрического поля передается колебательно возбужденным молекулам в результате электронно-молекулярных соударений, а дальнейшая эволюция колебательной энергии происходит в результате процессов соударений с участием колебательно возбужденных молекул. По этой причине кинетика столкновений с участием колебательно возбужденных молекул СО и N₂ является ключевым фактором, определяющим характеристики СО-лазера. Данная проблема начиная с 1970 годов привлекла внимание таких известных исследователей, как С.А. Лосев, Б.Ф. Гордиец, А.Н. Старостин, А.П. Напартович, С.А. Жданок, В.Я. Панченко, Н.П. Зарецкий, А. Ликальтер, С.Е. Treanor, М. Capitelli и др. Однако число исследователей, например, в области физики высокотемпературной плазмы и термоядерного синтеза значительно превышает размер указанного списка, но это не мешает более 70 лет получать новые результаты и защищать кандидатские и докторские диссертации в этой области. Несмотря на активные усилия перечисленных и других ученых, многие вопросы, относящиеся к данному направлению, остались до конца не выясненными. В первую очередь это касается последовательного расчета сечений и констант скорости процессов резонансного и квазирезонансного обмена колебательной энергией при столкновениях молекул. Такой расчет требует последовательного определения потенциала межмолекулярного взаимодействия в зависимости от расстояния между центрами молекул, взаимной ориентации сталкивающихся молекул и их вращательного состояния. Эта задача поставлена и решена в рассматриваемой диссертационной работе.

Первая глава диссертации содержит описание используемых методов расчета сечений и констант скорости процессов колебательного обмена и колебательной релаксации при столкновениях с участием колебательно возбужденных молекул СО и N₂. Используя полуклассический метод, в котором колебательное движение сталкивающихся молекул рассматривается на основании квантовой механики, а поступательное и вращательное движение – классически, автору удалось получить существенно более надежные значения сечений и констант скорости указанных процессов по сравнению с результатами ранних расчетов, основанных на теории возмущений. В особенности это касается процессов

обмена несколькими колебательными квантами, для которых, как оказалось, неприменимы общеизвестные выражения. Впечатляет количество процессов, (более 400) для которых были вычислены значения констант скорости колебательного обмена. Эти данные, собранные в отдельные таблицы Приложения, представляют самостоятельную ценность и могут быть использованы не только в физике газовых лазеров, но также в физике ударных волн, физике верхней атмосферы и лазерной химии.

Вторая глава диссертации содержит описание расчетов кинетики столкновительных процессов в СО лазере. В отличие от ранних работ на данную тему, в диссертации А.К. Курносова наряду с процессами одноквантового колебательного обмена в рассмотрение включены процессы обмена несколькими квантами. Расчеты, результаты которых, в частности, показаны на рис. 2.5 и 2.9, показывают, что учет многоквантовых процессов существенно, в пределах порядка величины, снижает константу скорости обмена колебательными квантами и увеличивает характерное время жизни колебательно возбужденных молекул на высших уровнях. Тем самым кинетическая модель с учетом процессов многоквантового обмена этих процессов позволяет правильно определить спектр генерации на переходах с высших колебательных состояний. В диссертации отмечено, что, поскольку эффективная колебательная температура высших колебательных состояний молекул в условиях генерации превышает температуру электронов, столкновения электронов с высоковозбужденными молекулами СО и N₂ способствует нагреву электронов и разрушению инверсной заселенности. Кинетическая модель, учитывающая этот эффект, позволяет правильно описать спектр генерации лазера в области высоких колебательных состояний, в соответствии с результатами экспериментов. В этой же главе диссертации рассмотрены нестационарные явления в активной среде СО-лазера, возникающие после ее возмущения при генерации в режиме модуляции добротности короткого импульса частотно-селективного излучения. Реакция лазерной среды на кратковременное селективное возмущение определяется совокупностью столкновительных процессов, приводящих к восстановлению лазерной инверсии на рассматриваемом переходе. Выполненное сопоставление теории и эксперимента по динамике восстановления инверсии населенностей на лазерном переходе после импульса генерации выявило существенно лучшую (по сравнению с разработанными ранее моделями) применимость предложенной в диссертации теоретической модели для описания динамики восстановления инверсии на переходах с верхним лазерным уровнем $v > 14$.

В третьей главе диссертации анализируются результаты диагностики коэффициентов усиления слабого сигнала (КУСС) в активной среде, полученные при ее зондировании пробным пучком частотно-селективного излучения непрерывного СО лазера. Наблюдаемые изменения коэффициентов усиления на отдельных переходах определяются совокупностью столкновительных процессов, влияющих на населенности колебательных уровней. Поэтому сравнение результатов расчетного описания кинетики изменения коэффициента усиления слабого сигнала при возбуждении активной среды в импульсном

разряде с соответствующими экспериментами является основой для верификации вычисленных значений констант скорости процессов, включенных в кинетическую модель. В частности, такое сравнение позволило определить значения констант скоростей процессов колебательного обмена между молекулами CO и O₂, входящими в состав активной среды лазера. В этой же главе обсуждается возможность выявления в экспериментах влияния неупругих соударений электронов с молекулами CO в высоких колебательных состояниях на энергетический баланс активной среды лазера и, в частности, на колебательную функцию распределения (КФР) молекул и динамику КУСС. Представлены результаты самосогласованных расчетов колебательной кинетики и уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергии, сформулированы параметры электро-ионизационного разряда, для которых неупругие соударения электронов с молекулами CO в высоких колебательных состояниях могут заметно сказываться на динамике КУСС.

Последняя, четвертая глава диссертации посвящена исследованию характеристик СО-лазера на обертоном, с изменением колебательного квантового числа на 2. Спектр излучения такого лазера попадает в область 3 – 4 мкм, которая представляет интерес для многих приложений, а число возможных линий генерации (около 400) усиливает интерес исследователей и пользователей к этой системе. На основе анализа кинетики столкновительных процессов в активной среде при импульсном возбуждении в разряде установлена роль процессов асимметричного квазирезонансного обмена двух квантов молекулы CO на высоких колебательных уровнях на один квант молекул CO или N₂ на нижних уровнях. В результате этих процессов происходит передача колебательного возбуждения на нижние уровни молекул, а не диссипация энергии в процессах VT релаксации, что может приводить к большему КПД лазера. Эти квазирезонансные процессы способствуют разрушению высоких колебательных состояний молекулы CO и ограничивают границы спектров излучения СО лазера на основных и обертоновых переходах на уровне 8.9 и 4.3 мкм, что соответствует переходам с верхним лазерным уровнем $v < 41$.

Диссертация не свободна от недостатков, которые, впрочем, не снижают значимости ее основных результатов. Так, на с. 75 утверждается, что **«вероятности квазирезонансных процессов VV обмена при низких температурах близки к единице уже для колебательного уровня $v \approx 10$ и продолжают расти далее с номером v , достигая значений значительно больше единицы. Столь высокие расчетные вероятности указывают на непригодность указанного приближения для расчета констант скорости VV обмена между молекулами CO даже на сравнительно низких уровнях и ставят под вопрос адекватность моделирования колебательной кинетики подобным образом»**. Это утверждение вызывает вопрос прежде всего по отношению к понятию «вероятности перехода», которое в диссертации определено недостаточно убедительно. Если оно определяется как отношение сечения перехода к сечению газокинетического соударения, то такая вероятность может значительно превышать единицу. Так, указанное

отношение составляет несколько порядков величины для процесса резонансной передачи электронного возбуждения при столкновении возбужденного и невозбужденного атомов. Сечение резонансного обмена колебательными квантами также может превышать газокинетическое значение.

Вызывает вопросы выполненный в Главе 3 анализ влияния неупругих соударений электронов с молекулами CO в высоких колебательных состояниях на энергетический баланс активной среды лазера и, в частности, на колебательную функцию распределения молекул и динамику КУСС. Здесь следует заметить, что процедура восстановления констант основана на модели, включающей в себя только процессы одноквантового и двухквантового возбуждения молекул электронным ударом, в то время как процессы с изменением колебательного квантового числа более чем на два также, несомненно, должны вносить сопоставимый вклад в кинетику формирования колебательной функции распределения молекул. Так, эксперименты указывают на возбуждение электронным ударом колебательных состояний молекул CO и N₂ с $v = 1 - 8$. Нет сомнений, что и высоковозбужденные молекулы могут изменять свое колебательное состояние более чем на единицу при соударениях с электронами. С целью разрешения указанного противоречия считал бы целесообразным выполнить и включить в диссертацию теоретический анализ процесса неупругого взаимодействия электрона с высоковозбужденными молекулами.

Рассмотренный на с. 176 вопрос о чередовании интенсивностей сильных и слабых колебательных полос в спектре излучения CO лазера изложен недостаточно ясно и требует более детального уточнения.

Неудачное выражение на с. 7. «нагрев AC за счет тепловыделения в процессах VV обмена и колебательно-поступательной (VT) релаксации распределён по широкому интервалу номеров колебательных уровней v ».

Рис. 1.13. Не указано, для какой молекулы приведена зависимость.

Несмотря на указанные недостатки, диссертация А.К. Курносова производит благоприятное впечатление. Автор демонстрирует высокий научный уровень и хорошее понимание проблем, стоящих в данной области физики газовых лазеров. Задачи, решенные в диссертации, – актуальны, а полученные результаты имеют важное научное, методическое и практическое значение. Защищаемые положения и выводы диссертации А.К. Курносова характеризуются высокой степенью обоснованности. Полученные расчетные данные соответствуют результатам экспериментов, многие из которых выполнены при участии автора. Указанное соответствие, а также рецензирование материалов диссертации при их публикации в ведущих научных журналах, позволяют сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Высокий уровень, степень трудности и актуальность решенных в диссертации задач показывают, что работа А.К. Курносова отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о порядке присуждения научных степеней, утвержденным постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических

наук по специальности 1.3.19. – лазерная физика. Автореферат соответствует содержанию публикаций.

Официальный оппонент:

Профессор Национального Исследовательского Университета МЭИ

доктор физико-математических наук,

профессор



Елецкий Александр Валентинович

«21» февраля 2022 года

Почтовый адрес: Москва, 111250, Красноказарменная ул., д. 14.

Тел: 89169053637

Email: eletskaa@mail.ru

Подпись д.ф.-м.н. Елецкого А.В.

удостоверяю:



ЗАМЕСТИТЕЛЬ
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТАМ



Список основных публикаций официального оппонента А.В. Елецкого по тематике диссертации А.К. Курносова за последние 5 лет

1. G. S. Bocharov, A. V. Eletsii, A. V. Zakharenkov, O. S. Zilova, A. P. Sliva, E. V. Terentyev, S. D. Fedorovich, and G. N. Churilov "Optimization of Steel-Surface Hardening by Carbon Nanostructures Followed by Treatment with High-Intensity Energy Sources" *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **12**(1), pp. 27–32. (2018)
2. N. Abusaif, G. S. Bocharov, A. V. Eletsii, A. V. Uvarov, S. D. Fedorovich "Surface reinforcement of metals by carbon nanomaterials followed by high intense energy irradiation" *Advanced Materials Letters*. **9** (10), pp 733-736 (2018).
3. Г.С. Бочаров, А.В. Дедов, А.В. Елецкий, А.В. Захаренков, О.С. Зилова, А. Нуха, С.Д. Федорович «Упрочнение стальной поверхности в результате покрытия фуллереном C_{60} с последующей обработкой лазерным излучением». Доклады РАН. 483, №4 (2018)
4. А.В. Елецкий, А.В.Захаренков, О.В.Чудина, С.Д. Федорович, Е.В.Терентьев " Упрочнение стальной поверхности фуллеренами C_{60} с использованием лазерного нагрева». *Упрочняющие технологии и покрытия* **14** 333-336 (2018)
5. G.S. Bocharov, A.V. Eletsii, A.V. Uvarov and S.D. Fedorovich «Laser Reinforcement of a Steel Surface by Partially Reduced Graphene Oxide» *J. of Physics. AIP Conf. Proc.* **2041** 020003-1–020003-4 (2019)